

DOI: 10.30977/VEIT.2023.24.0

ISSN: 2226-9266



АВТОМОБІЛЬ І ЕЛЕКТРОНІКА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ



**ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ
СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ
ВИДАННЯ**

ВИПУСК

24

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)**

24/2023

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

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2023.24.0

Харків 2023

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

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2023.24.0

Випуск сформовано 25.12.2023.

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.), Бажинов О. В. (д-р техн. наук, проф.), Батигін Ю. В. (д-р техн. наук, проф.), Богаєвський О. Б. (д-р техн. наук, проф.), Богомолов 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.), Колодязний В. М. (д-р фіз.-мат. наук, проф.), Корогодський В. А. (д-р техн. наук, проф.), Мигаль В. Д. (д-р техн. наук, проф.), Михалеви́ч 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.), Сарасєв 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.), Янютін 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**

Павло Сохін

Дослідження автономної сонячної електростанції для автокемпера.....6

Станіслав Войтків

*Напрямки розвитку конструкцій маловантажних електромобілів в аспекті
ресурсозбереження.....15*

Олександр Хрулев, Олексій Сараєв, Ірина Сараєва

*Застосування логічних методів під час експертного аналізу відмов
автомобільних двигунів в експлуатації.....32*

Максим Товстокорий, Андрій Гнатов

*Аналіз та вплив принципів роботи систем активної безпеки автомобіля
на безпеку руху.....41*

Олег Смирнов, Анна Борисенко

*Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних
батареї електромобілів.....50*

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

Руслан Багач

*Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на
основі активного трифазного випрямляча струму.....62*

Віталій Буряківський

Аналітичний огляд технологій бездротової зарядки для електромобілів.....72

**ІНШІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І РЕМОНТУ АВТОТРАНСПОРТУ ТА
ПІДГОТОВКИ ВІДПОВІДНИХ СПЕЦІАЛІСТІВ**

Щасяна Аргун, Ірина Трунова, Андрій Гнатов, Ганна Гнатова

*Інноваційні підходи до навчання студентів технічних спеціальностей в умовах
війни в Україні.....83*

CONTENT

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

Pavlo Sokhin

Study of an autonomous solar power plant for a motorhome6

Stanislav Voytkiv

The development directions of light-duty electric vehicle designs in the aspect of resource saving
15-31

Alexander Khrulev, Olexii Saraiev, Iryna Saraieva

Application of logical methods in expert analysis of automotive engine failures in operation32

Maksym Tovstokoryi, Andrii Hnatov

Analysis of opportunities to increase the level of active car safety41

Oleh Smyrnov , Anna Borysenko

Comparative analysis of electrical models of lith-ium-ion batteries in electric vehicles50

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

Ruslan Bahach

*Research of electric vehicle battery packs and charging stations based on an
active three-phase rectifier*62

Vitalii Buriakivskyi

Analytical review of wireless charging technologies for electric vehicles72

OTHER PROBLEMS OF OPERATION AND REPAIR OF VEHICLES AND TRAINING OF RELEVANT SPECIALISTS

Shchasiana Arhun, Iryna Trunova, Andrii Hnatov, Hanna Hnatova

*Innovative approaches to the education of students of technical specialties
in the conditions of war in Ukraine*83

Дослідження автономної сонячної електростанції для автокемпера

Сохін П.А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У даному дослідженні проведено аналіз можливостей встановлення автономної сонячної електростанції на автокемпері типу Roller Team Sirio 599. Визначено потужність генерації електроенергії та розроблено концепцію автономної сонячної станції для даного автокемпера. В роботі також розглянуто графік генерації електроенергії та вивчено споживання електроенергії пристроями, які використовуються в автокемпері. Результати дослідження можуть бути корисні для розробки ефективних систем живлення в подібних транспортних засобах.

Ключові слова: автокемпер, сонячна електроенергія, генерація електроенергії, енергозберігаючі технології, енергоефективні технології, електромобілі, автономна сонячна електростанція.

Вступ

Автокемпер, або будинок на колесах, доволі часто являє собою втілення мрії багатьох людей, які люблять активно подорожувати та водночас мати можливість користуватися перевагами затишної та комфортної домівки. Це відмінний варіант для подорожі, адже тут є практично все необхідне для комфортного проживання: портативний душ, туалет, кухня і спальні місця. Автокемпер поєднує у собі дві основні особливості, які необхідні сучасним людям - це можливість відпочивати у незвичайних місцях і, водночас, працювати, якщо ваша робота передбачає віддалений доступ. На відміну від чітко запланованих перельотів або поїздок на поїзді, будинок на колесах дає можливість пересуватися куди завгодно і коли завгодно. Сподобалося місце в дорозі – зупинилися і провели там кілька днів. Хочете відпочити – звернули на узбіччя і влаштувалися на ночівлю в тій місцині, яка вам прийшла до вподоби [1].

Але, все ж таки, такий вільний спосіб життя, якщо ви звикли до благ цивілізації, вимагає більш уважно та прискіпливо ставитись до підбору місць зупинок. Бо виникає потреба у пошуку спеціально облаштованих стоянок, де можна приєднатися до мережі електроживлення, що дає змогу заживити всі

наявні технічні пристрої та гаджети. Звісно, приєднання до централізованої мережі електроживлення у спеціально підготовлених для цього місцях-стоянках є доволі зручним функціоналом, але, не є безкоштовним. Отже, виникає нагальна потреба у пошуку рішення, як забезпечити собі комфортні умови з точки зору електроживлення, та ще, по можливості, економити кошти. Одне з можливих та найбільш цікавих і ефективних рішень – це встановлення на автокемпер малопотужної сонячної електростанції на базі фотоелектричних модулів. Таке рішення дає можливість зупинитися у будь-якому місці, яке вам сподобалось, звісно, якщо це не обмежено законодавчими нормами та природними умовами, і, водночас, користуватися всіма наявними технологіями, що отримують живлення від електроенергії [2-4].

Аналіз публікацій

У статті [5] автори для живлення транспортного засобу використовують сонячну енергію разом із традиційною енергією від централізованої електромережі. Сонячна енергія, яку генерує сонячна панель, перетворюється на хімічну енергію та зберігається в акумуляторних батареях. Таким чином, електромобіль на сонячних панелях може

працювати з електродвигуном замість двигуна внутрішнього згорання. Крім того, двигун може працювати від змінного струму, який перетворюється інвертором, що живиться від акумуляторних батарей. Автори роботи пропонують встановити в автомобіль для його живлення літій-полімерний акумулятор на номінальну напругу 360 В з енергією, що накопичується акумуляторною батареєю 100 кВт·год.

В публікації [6] стверджується, що з розвитком автомобільних технологій більшість персональних автомобілів зможуть працювати на сонячній енергії. При цьому транспортні засоби будуть оснащені високоефективними тривимірними вигнутими сонячними панелями. Ці сонячні панелі є значно ефективніші ніж ті, що на цей час існують. Але проблема полягає в тому, що існуючий міжнародний стандарт IEC60904 базується на 2-D площині, і його необхідно розширити до 3-D. Автори в роботі [6] намагаються визначити тривимірне сонячне випромінювання та рейтинг для тривимірних вигнутих сонячних панелей. Це дозволить проводити розрахунки щодо встановлення необхідної кількості сонячних фотоелектричних модулів.

Досить багато сучасних робіт присвячено переобладнанню автомобіля з ДВЗ на електромобіль або гібрид [7-14]. При такій конверсії, досить часто передбачається встановлення сонячних фотоелектричних модулів на дах транспортного засобу. Їх призначення – це електроживлення як допоміжних, так і основних електричних систем автомобіля, а також додаткового електроустаткування. Так, в статті [9] зазначається, що транспортні засоби переобладнують з живлення від одного джерела енергії на подвійне або кілька джерел енергії через постійно зростаючі проблеми з паливом і проблеми, пов'язані з навколишнім середовищем. Незважаючи на те, що гібридні транспортні засоби є екологічно чистим варіантом, вони потребують складних механічних, електричних та електронних частин і систем. В кінцевому підсумку маємо те, що гібридні автомобілі дорожчі за звичайні автомобілі, що працюють на викопному паливі. Одним із економічно ефективних варіантів є переобладнання вживаних автомобілів з ДВЗ на електромобілі. В роботі [10] представлено процес переобладнання традиційного автомобіля з ДВЗ в електричний транспортний засіб. У розробленій силовій установці використовується трифазний ін-

вертор з польовим керуванням та просторово-векторною модуляцією. Розроблена бортова система заряду акумуляторів, що може працювати в режимах Grid to Vehicle та Vehicle to Grid. Тобто, вже переобладнаний транспортний засіб перетворюється у джерело електроживлення для зовнішніх (або внутрішніх) електроспоживачів. В статті [11] представлено дослідження щодо переобладнання існуючого автомобіля з ДВЗ в електромобіль та реалізація деяких функцій, що є в автономних транспортних засобах (у відповідності до рівнів автономності). В статтях [12-14] описано процес переобладнання міського автомобіля з ДВЗ на електромобіль. Приведено основні етапи вибору систем та агрегатів і того, як вони функціонують. Зроблено узагальнення щодо експлуатаційних параметрів електромобіля.

Компанія Monarch Power розробила систему заряджання електромобілів у новому форм-факторі під назвою Lotus Mobile. У розкладеному стані вона нагадує квітку, пелюстками якої є 18 сонячних панелей [15]. У розкладеному вигляді дзеркальна квітка має діаметр чотири метри. Площа поверхні, що збирає світло – 11 м². Винахідники даного пристрою розраховують, що в реальних умовах, з урахуванням усіх втрат і не найкращої погоди, апарат зможе генерувати 2-3 кВт електричної потужності. Крім того, оскільки батареї потрібно інтенсивно охолоджувати, система вироблятиме як побічний продукт гарячу воду. Розрахункова теплова потужність установки також становить від 2 кВт до 3 кВт.

Компанія Tesla також прийняла участь у розробці технічних рішень, що стосується тематики даної роботи. Так, вона представила розкладний сонячний трейлер, оснащений дев'ятьма панелями [16]. Даний причіп може забезпечити приблизно 80 кілометрів додаткового запасу ходу електромобіля. Його електрична потужність генерації електроенергії становить приблизно 2,7 кВт. У трейлері також представлено Starlink від SpaceX, супутниковий інтернет-хаб, який пропонує високошвидкісний широкопasmовий доступ до Інтернету з низькою затримкою у віддалених і сільських місцях шляхом підключення до супутника SpaceX Starlink на орбіті. Даний причіп не має акумулятора але може постійно жити підключеною супутникову антену Starlink, забезпечуючи постійний доступ до Інтернету, а також може служити зарядним

пристроєм для невеликих електронних пристроїв, крім того, сонячні батареї можуть заряджати батарею електромобіля від якої буде працювати кліматична система автомобіля.

Компанія Lifestylecamper являється українським виробником краплеподібних причепів-кемперів [17]. Lifestylecamper пропонує комплектацією кемпера стаціонарною сонячною панеллю та портативним модулем, рис. 1. Виробник стверджує, що навіть у похмуру погоду його сонячні панелі забезпечать необхідну кількість електроенергії для підтримки повноцінного заряду акумуляторів та безперебійної роботи холодильника, ноутбука та іншої електроніки. Сонячні панелі можна розмістити на самому кемпері або зберігати окремо, використовуючи лише тоді, коли це потрібно. Потужність панелей: 125 Вт та 130 Вт.



Рис. 1. Причіп-кемпер Lifestylecamper зі стаціонарною сонячною панеллю та портативним модулем

В той же час, в статті [18] докладно описується процес встановлення фотоелектричних модулів на фургон або автокемпер. Автор статті зазначає, що коли ви у подорожі, то може бути важко обійтися без деяких сучасних зручностей, для роботи яких потрібна електрика. Використання фотоелектричних модулів на автокемпері може значно покращити загальні умови подорожі, дозволяючи використовувати кондиціонер у теплу погоду або обігрівач у холодні місяці. Також приведено основні переваги та недоліки встановлення фотоелектричних модулів на автокемпер та надано рекомендації щодо вибору необхідного обладнання і визначення необхідної потужності у генерації електроенергії.

Наприкінці даного аналізу публікацій слід

зазначити, що приведені дослідження, це тільки невелика частина робіт, що присвячені даній тематиці. Сонячна енергія є одним із основних видів відновлюваної енергії. Перехід на останні сприяє розвитку чистішої економіки, яка захищає навколишнє середовище, покращує добробут людей і забезпечує стабільність компаній. На цей час сонячна енергія є одною з найефективніших і найдоступніших у секторі відновлюваних джерел. Це необмежене джерело енергії, крім того, що сприяє стійкому розвитку технологій і суспільства в цілому, так і залучає інвестиції, створює робочі місця та підвищує конкурентоспроможність компаній та підприємств [1-4, 19-21].

Отже, дослідження, що спрямовані на обладнання автокемперу сонячною електростанцією, що містить фотоелектричні модулі, являється актуальним і нагальним науково-технічним завданням.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення дослідження щодо встановлення на автокемпер автономної сонячної електростанції та визначення потужності генерації електроенергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити вольт-амперні характеристики фотоелектричних модулів та залежність генерованої потужності від електричного навантаження;
- вибір автокемпера для встановлення автономної сонячної електростанції та дослідження електричної потужності устаткування автокемпера для його автономної роботи;
- запропонувати автономну сонячну станцію для автокемпера та дослідити графік генерації нею електроенергії;
- дослідити споживання електроенергії пристроями автокемпера.

Дослідження фотоелектричних модулів

Для обладнання автокемпера сонячною електростанцією, що містить фотоелектричні модулі було вибрано одні з найпоширеніших на ринку України сонячних панелей. Це монокристалічний модуль (панель) FS-100M/100W та, полікристалічний модуль (панель) FS-110P/110W. Їх технічні характеристики описані в роботі [21].

Для досягнення поставленої мети та фор-

мування розуміння найбільш ефективної роботи вибраних фотоелектричних модулів у складі автономної сонячної електростанції на автокемпі, проведемо дослідження їх вольт-амперних характеристик та залежності потужності генерованої електроенергії від активного електричного навантаження. Результати цих досліджень допоможуть визначити опір навантаження при якому буде виконуватися критерій передачі максимальної потужності в [21].

За технічними характеристиками фотоелектричних модулів визначаємо їх внутрішній опір:

$$R_{вн} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}. \quad (1)$$

Відповідно до (1) внутрішній опір панелей дорівнює: $R_{вн}(\text{моно}) = 3,34 \text{ Ом}$; $R_{вн}(\text{полі}) = 3,04 \text{ Ом}$.

Не менш важливим параметром фотоелектричних модулів є коефіцієнт заповнення FF – параметр, який в поєднанні зі струмом короткого замикання і напругою холостого ходу визначає максимальну потужність на виході з даного фотоелектричного модуля:

$$FF = \frac{I_{ном} \cdot U_{ном}}{I_{кз} \cdot U_{кз}}. \quad (2)$$

Відповідно до (2) коефіцієнт заповнення досліджуваних фотоелектричних модулів дорівнює: $FF(\text{моно}) = 0,72$; $FF(\text{полі}) = 0,88$.

Схему дослідження фотоелектричних модулів наведено на рис. 2.

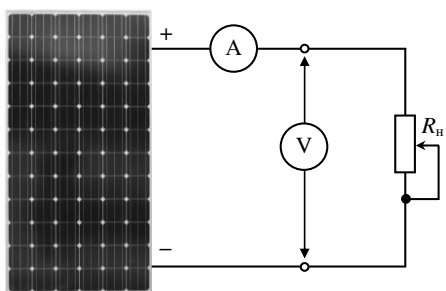
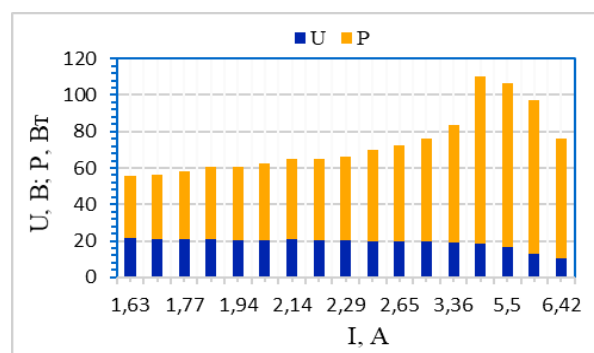


Рис. 2. Схема дослідження фотоелектричних модулів [21]

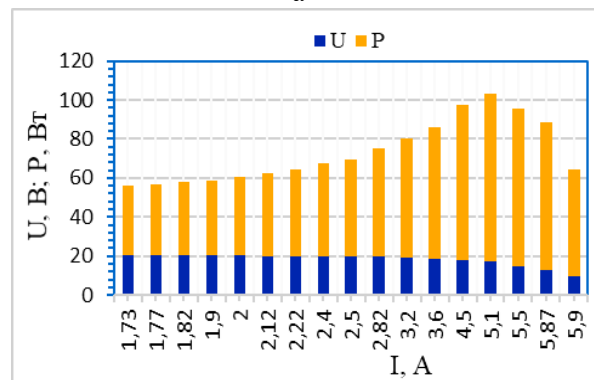
Результати досліджень фотоелектричних модулів приведено у вигляді графіків на рис. 3. Перша точка відповідає опору навантаження 10 Ом, остання – 2 Ом. Інші значення опору навантаження для вибраних фотоелектричних модулів FS-100M/100W та

FS-110P/110W досліджувати недоцільно у зв'язку з їх малою ефективністю роботи у цьому діапазоні навантаження. Це виходить з аналізу графіків, рис. 3.

Роблячи висновки за результатами проведених досліджень (рис. 3) можна стверджувати, що вибрані фотоелектричні модулі мають найбільшу ефективність роботи в діапазоні активного навантаження від 3 Ом до 3,5 Ом. Тобто, при виборі даних фотоелектричних модулів для розбудови автономної сонячної електростанції необхідно забезпечити їх навантаження у зазначеному діапазоні. При іншому навантаженні дані фотоелектричні модулі будуть працювати неефективно.



а



б

Рис. 3. Експериментальні дослідження фотоелектричних модулів: а – полікристалічна панель; б – монокристалічна панель

Беручи до уваги проведений огляд використання енергозберігаючих технологій на транспорті та проведені дослідження фотоелектричних модулів щодо їх ефективної роботи, пропонується на автокемпі встановити малопотужну автономну сонячну електростанцію на основі розглянутих монокристалічних та полікристалічних фотоелектричних модулів (панелях).

Автономна сонячна електростанція для автокемпера

Зазначимо основні аспекти встановлення автономної сонячної електростанції на автокемпер. Найважливішими компонентами автономної сонячної електростанції є сонячні панелі або фотоелектричні модулі, контролер заряду/інвертор та акумуляторна батарея для накопичення генерованої електроенергії.

Залежно від того, скільки електроенергії споживають електричні пристрої в автокемпері протягом дня, визначається, наскільки високою повинна бути потужність фотоелектричних модулів сонячної електростанції.

Сонячна електростанція для мобільного будинку коштує від 15000 до 50000 грн. На збирання та монтаж ще потрібно витратити до 20000 грн (залежно від типу автокемпера, вибраних компонентів, їх кількості, потужності тощо).

Автокемпер, на який пропонується встановлювати автономну сонячну електростанцію, після ретельного аналізу, пропонується Roller Team Sirio 599, рис. 4.

Характеристики Roller Team Sirio 599
Бренду: ROLLER TEAM, модель: SIRIO 599, рік випуску: 2006:

- двигун: FORD TRANSIT 2.0 TDCi (виробник Fiat);
- потужність: 125 CV din / 7 CV tax;
- розміри: (Д) 6,10 м x (Ш) 2,33 м x (В) 2,90 м;
- GVW / Порожня вага / CU: 3500 кг / 2546 кг / 954 кг;
- спальні місця: 4/4, включаючи 2/заднє двоярусне ліжко та 2/переднє ліжко Coachbuilt4
- баки EP / EU: 110л. / 100л.



Рис. 4. Автокемпер Roller Team Sirio 599

Устаткування автокемпера: USB-роутер; радіо-мультимедіа; камера заднього виду;

холодильник триходовий; водонагрівач TRUMA; передній обігрів Trumatic + Trumavent; мансардне вікно; електрична підніжка; телевизор; перемикач батареї; мікрохвильова піч; фотоелектричні модулі; супутникова антена; туалет; душ та інше.

Беручи до уваги наведені технічні характеристики автокемпера та номінальні показники електроживлення його устаткування, на нього можна встановити автономну сонячну електростанцію, потужністю до 1,2 кВт.

Отже, проведемо дослідження встановлення на автокемпер автономної сонячної електростанції з максимальною потужністю 1,2 кВт.

Даний тип сонячної електростанції призначений для роботи на даху автокемпера, як альтернатива його підключення до мережі електроживлення, яке є витратним або неможливим (в залежності від наявних умов). Також дана сонячна електростанція призначена для резервного електропостачання автокемпера в разі відключення електроенергії або зникнення напруги в електромережі, до якої підключено автокемпер.

Характеристики автономної сонячної станції для автокемпера Roller Team Sirio 599, рис. 5:

- потужність фотоелектричних модулів – 1,215 кВт;
- потужність навантаження, що підключається (потужність інвертора) – 2 кВт;
- тип фотоелектричних модулів – монокристалічні;
- вироблення ел.енергії за місяць (літній період) – до 175 кВт·год;
- вироблення ел.енергії за 8 місяців (з березня по жовтень) - до 1127 кВт·год;
- вироблення ел.енергії за 12 місяців – до 1277 кВт·год;
- ємність акумуляторних батарей – 100 А·год, 24 В (2,4 кВт·год).



Рис. 5. Автономна сонячна електростанція, $P = 1,2$ кВт для автокемпера

Фотоелектричні модулі можна використо-
вувати будь-які, головне, щоб їх сумарна но-
мінальна потужність складала 1,2 кВт. Та-
кож, відповідно до проведених досліджень,
потрібно відслідковувати точку максимал-
ної ефективності, що відповідає визначеному
опору навантаження.

З урахуванням результатів проведених
досліджень пропонуємо фотоелектричну па-
нель Sunport 405 Вт (монокристалічний тип),
яка за своїми габаритами та номінальною
потужністю повністю відповідає поставле-
ним завданням та без проблем може бути
змонтована на дах автокемпера Roller Team

Sirio 599 у кількості 3 штук. Щоб збільшити
кількість енергії, яку генерують фотоелект-
ричні модулі, слід використовувати сонячний
контролер із відстеженням максимальної по-
тужності (MPPT). В іншому випадку, слід
провести експериментальні дослідження
аналогічно представленим вище, щоб визна-
чити найбільш ефективний опір навантажен-
ня для даних фотоелектричних модулів.

Провівши аналіз роботи сонячних електрос-
танцій в широтах України, представлено усє-
реднені значення генерації електроенергії за-
пропонованою автономною сонячною елект-
ростанцією потужністю 1,2 кВт (рис. 6) [22].



Рис. 6. Генерація електроенергії автономною сонячною електростанцією потужністю 1,2 кВт

Враховуючи наведені вище дані узагаль-
нено склад і вартість основних компонентів
автономної сонячної електростанції, потуж-
ністю 1,2 кВт, призначеної для встановлен-
ня на автокемпер, табл. 1

Дана автономна сонячна електростан-
ція може забезпечити електроенергією
наступних електроспоживачів автокем-
пера, дивись табл. 2 [22].

Таблиця 1 – Склад і вартість основних
компонентів автономної сонячної електростанції,
 $P = 1,2$ кВт

Найменування	Вартість, грн
Фотоелектричний модуль Sunport spr405nh7h 405 Вт - 3 шт.	19320
Інвертор FSP Xpert Solar 2000VA PWM, 2 кВт - 1 шт.	11196
Акумуляторна батарея Challenger A12-100 (12В, 100 А·год) – 2 шт.	18214
Всього:	48730

Таблиця 2 – Споживання електроенергії пристроями автокемпера

Найменування	Потужність, Вт	Кількість	Час роботи, год. на добу	Споживання елект-роенергії, Вт·год на добу	Споживання елект-роенергії, кВт·год на місяць
Лампа світлодіодна	9	5	5	225	7,0
Зарядний пристрій м/тел.	5	2	1	10	0,3
Холодильник	125	1	10	1250	38,8
Ноутбук та USB-роутер	75	1	3	225	7,0
Телевізор	80	1	3	240	7,4
Супутникова антена	20	1	3	60	1,9
Мікрохвильова піч	800	1	0,2	160	5,0
Всього:	1114			2170	67,4

Висновки

Проведено дослідження щодо встановлення на автокемпер автономної сонячної електростанції та визначення потужності генерації електроенергії.

Аналіз публікацій за темою дослідження показав, що сонячна енергія є одним із основних видів відновлюваної енергії. Перехід на роботу від неї сприяє розвитку чистішої економіки, яка захищає навколишнє середовище, покращує добробут людей і забезпечує стабільність компаній та установ. На цей час сонячна енергія є одною з найефективніших і найдоступніших у секторі відновлюваних джерел. Це необмежене джерело енергії, крім того, що сприяє стійкому розвитку технологій і суспільства в цілому, так і залучає інвестиції, створює робочі місця та підвищує конкурентоспроможність компаній та підприємств.

Проведено дослідження вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів та залежність генерованої ними потужності електроенергії від навантаження. Досліджені фотоелектричні модулі мають найбільшу ефективність роботи в діапазоні активного навантаження від 3 Ом до 3,5 Ом. Тобто, при виборі фотоелектричних модулів даного типу для автономної сонячної електростанції необхідно забезпечити їх навантаження у зазначеному діапазоні опорів.

Визначено тип автокемпера, а саме, Roller Team Sirio 599 для встановлення автономної сонячної електростанції. Проведено дослідження його устаткування щодо споживання електроенергії.

Запропоновано автономну сонячну станцію для обраного автокемпера та досліджено графік генерації електроенергії даною станцією. Досліджено споживання електроенергії пристроями автокемпера.

Підсумовуючи проведені дослідження встановлення та роботи автономної сонячної електростанції на автокемпер Roller Team Sirio 599 можна зазначити, що починаючи з березня місяця вона повністю здатна забезпечити його електроспоживання. Взимку та в листопаді місяці, в кліматичних умовах України, дана сонячна електростанція може покрити лише частину потреб у електроспоживанні. А враховуючи, що для обігріву автокемпера використовують електричні прилади, то взагалі, не варто розраховувати на дану електростанцію, як основне джерело електроенергії.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Года, М. Будинок на колесах: історія, переваги та поради для тих, хто хоче мандрувати без обмежень. (2020). Retrieved from https://24tv.ua/budinok-kolesah-istoriya-perevagi-poradi-dlya-novini-ukrayini_n1395180. Hoda, M. Budynok na kolesakh: istoriia, perevahy ta porady dlia tykh, khto khoche mandruvaty bez obmezhen. [Motor home: history, benefits and advice for those who want to travel without restrictions] Retrieved from https://24tv.ua/budinok-kolesah-istoriya-perevagi-poradi-dlya-novini-ukrayini_n1395180. [in Ukrainian].
2. Hnatov, A., & Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International journal of automotive and mechanical engineering*, 14(4), 4649-4664.
3. Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Sokhin, P. (2021). Technical and economic calculation of a solar-powered charging station for electric vehicles. *Automobile Transport*, (49), 71–78. <https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2021.49.0.05>
4. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of a unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon) (pp. 248-253). IEEE.
5. Mohammadi, F. (2018). Design, analysis, and electrification of a solar-powered electric vehicle. *Journal of Solar Energy Research*, 3(4), 293-299.
6. Araki, K., Ota, Y., Nishioka, K., Tobita, H., Ji, L., Kelly, G., & Yamaguchi, M. (2018, June). Toward the Standardization of the Car-roof PV—The challenge to the 3-D Sunshine Modeling and Rating of the 3-D Continuously Curved PV Panel. In 2018 IEEE 7th world conference on photovoltaic energy conversion (WCPEC)(A joint conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC) (pp. 0368-0373). IEEE.
7. Гнатів, А. В., Аргун, Ш. В., Гнатова, Г. А., & Сохін, П. А. (2022). Переобладнання автомобіля з ДВЗ в електромобіль. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (21), 22–30. Hnatov, A. V., Arhun, Shch. V., Hnatova, H. A., & Sokhin, P. A. (2022). Pereobladnannia avtomobilia z DVZ v elektromobil. [Conversion of a car from an ICE into an electric car.] *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (21), 22–30. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.1> [in Ukrainian].

8. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Saraiev, O. (2022, May). Features of converting a car with an internal combustion engine into an electric car. In 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON) (pp. 1-6). IEEE.
 9. Karim, A., & Shahid, Z. (2018). Performance and cost analysis of conventional petrol car converted into solar-electric hybrid car. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(3), 032009.
 10. Pedrosa, D., Monteiro, V., Gonçalves, H., Martins, J. S., & Afonso, J. L. (2014, October). A case study on the conversion of an internal combustion engine vehicle into an electric vehicle. In 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (pp. 1-5). IEEE.
 11. Francis, J., Narayamparambil, A. B., Johnson, A., Mathew, J., Sankar, V., & George, J. M. (2021, November). Conversion of internal combustion engine car to semi-autonomous electric car. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2070, No. 1, p. 012203). IOP Publishing.
 12. Dankov, D., Madjarov, N., & Prodanov, P. (2021, September). Description of the conversion process and results on the Opel Corsa with an internal combustion engine into an electric car. In 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET) (pp. 1-5). IEEE.
 13. Vražić, M., Vuljaj, D., Pavasović, A., & Pauković, H. (2014, May). Study of a vehicle conversion from internal combustion engine to electric drive. In 2014 IEEE international energy conference (ENERGYCON) (pp. 1544-1548). IEEE.
 14. Lairenlakpam, R., Thakre, G. D., Gupta, P., Singh, Y., & Kumar, P. (2018, December). Electric conversion of a polluting gasoline vehicle into an electric vehicle and its performance and drive cycle analysis. In 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) (pp. 1-6). IEEE.
 15. "Сонячна квітка" дозволить електромобілям стати незалежними від станцій підзарядки. (2015). Retrieved from <https://vikna.if.ua/cikavo/42057/view>. "Soniachna kvitka" dozvolyt ektromobiliam staty nezaleznyymi vid stantsii pidzariadky. (2015) ["Sunflower" will allow electric cars to become independent from charging stations] Retrieved from <https://vikna.if.ua/cikavo/42057/view>. [in Ukrainian].
 16. Tesla unveils solar range extender trailer with SpaceX Starlink internet terminal. (2022). Retrieved from <https://electrek.co/2022/07/04/tesla-unveils-solar-range-extender-trailer-spacex-starlink-internet-terminal/>.
 17. Сонячна панель для кемпера. (n.d.). Retrieved from <https://lifestylecamper.ua/sonyachna-panel-dlya-kempera/>. Soniachna panel dlia kempera. (n.d.). [Solar panel for camper] Retrieved from <https://lifestylecamper.ua/sonyachna-panel-dlya-kempera/>. [in Ukrainian].
 18. Як встановити сонячні панелі на кемпер або фургон. Retrieved from <https://solarnipaneli.energy/uk/як-встановити-сонячні-панелі-на-кемпе/>. Yak vstanovyty soniachni paneli na kemper abo furhon. [How to install solar panels on a camper or van.] Retrieved from <https://solarnipaneli.energy/uk/як-встановити-сонячні-панелі-на-кемпе/>. [in Ukrainian].
 19. Гнатів, А. В., & Аргун, Ш. В. (2017). Аналіз схем сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів. *Автомобільний транспорт*, (41), 163-169. Hnatov, A. V., & Arhun, Shch. V. (2017). Analiz skhem soniachnykh elektrostantsii na fotoelektrychnykh moduliakh dlia zariadnykh stantsii elektromobiliv. [Analysis of schemes of solar power plants on photovoltaic modules for charging stations of electric vehicles.] *Avtomobylnyi transport*, (41), 163-169. [in Ukrainian].
 20. Гнатів, А. В., Аргун, Ш. В., Гнатова, Г. А., & Тарасов, К. С. (2020). Сонячна зарядна електростанція – комплекс для проведення лабораторних та практичних занять. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (17), 19-26. Hnatov, A. V., Arhun, Shch. V., Hnatova, H. A., & Tarasov, K. S. (2020). Soniachna zariadna elektrostantsiia – kompleks dlia provedennia laboratornykh ta praktychnykh zaniat. [The solar charging power station is a complex for conducting laboratory and practical classes.] *Vehicle and electronics. Innovative technologies*, (17), 19-26. [in Ukrainian].
 21. Paulus, A., Arhun, S., Hnatov, A., Dziubenko, O., & Ponikarovska, S. (2018, November). Determination of the best load parameters for productive operation of PV panels of series FS-100M and FS-110P for sustainable energy efficient road pavement. In 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (pp. 1-6). IEEE.
 22. Сонячні батареї 1,8 кВт для дачі та невеликого будинку. Soniachni batarei 1,8 kVt dlia dachi ta nevelykoho budynku [Solar batteries 1.8 kW for summer cottages and small houses] (2019, August 11). <https://alteco.in.ua/ua/rishennia-alternatyvnoi-enerhetyky/soniachni-eklektrostantsii-dlia-domu/soniachni-batarei-dlia-dachi-1-kvt-3a> [Ukraine]
- 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.

Study of an autonomous solar power plant for a motorhome

Abstract. Problem. An MH combines two essential features desired by modern travelers: the ability to relax in unconventional locations while still being able to work remotely if one's job requires remote access. However, if you're accustomed to the conveniences that rely on electrical power, you'll find yourself searching for places to connect to the centralized power grid. Alternatively, you'll need to seek solutions to this issue. One of the most intriguing and effective solutions is the installation of a low-power solar power station on the RV, based on photovoltaic modules. This solution enables you to park and enjoy any location you prefer while benefiting from all the available technologies powered by electricity. **Goal.** This study aims to investigate the installation of an autonomous solar power station on an RV and determine its electrical power generation capacity. **Methodology.** Analytical research methods were employed to explore the development and application of solar energy conversion methods and devices to generate electricity. Experimental research methods and mathematical techniques for processing experimental data were also utilized. **Results.** The RV type suitable for installing an autonomous solar power station has been identified, specifically the Roller Team Sirio 599. An investigation of its equipment in terms of electricity consumption has been conducted.

Furthermore, a self-sustaining solar station has been proposed for the selected RV, and the electricity generation schedule of this station has been studied. The electricity consumption by RV appliances has been thoroughly examined. **Originality.** This study explored the volt-ampere characteristics of photovoltaic modules and their power generation dependency on the load. The investigated photovoltaic modules demonstrate maximum operational efficiency in the active load range from 3 ohms to 3.5 ohms. **Practical Value.** The research findings indicate that starting from March, the solar power station on the RV is fully capable of meeting its electricity consumption needs. In the winter months, particularly in November, in Ukraine's climate conditions, this solar power station may only cover a portion of electricity consumption needs. Considering that electrical devices are often used for heating the RV, this solar power station should not be relied upon as the primary source of electrical power.

Key words: motorhome, solar electricity, electricity generation, energy-saving technologies, energy-efficient technologies, electric cars, autonomous solar power plant.

Sokhin Pavlo¹, 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.

Напрямки розвитку конструкцій маловантажних електромобілів в аспекті ресурсозбереження

Войтків С. В.¹

¹Науково-технічний центр «Автополіпром»

***Анотація.** У статті проведений аналіз тенденцій розвитку конструкцій та основних технічних параметрів маловантажних електромобілів категорій L та N1, запропонована їх класифікація за ознаками функціонального призначення та вантажопідйомності. Розглянуті перспективні напрямки створення таких максимально-уніфікованих транспортних засобів, зокрема, на основі застосування принципів модульного проектування технічних об'єктів виробництва. Наведені рекомендації з вибору оптимальних величин експлуатаційних параметрів проєктованих конкурентоспроможних маловантажних електромобілів у залежності від сфери застосування.*

***Ключові слова:** маловантажний електромобіль; електромобілі категорії L та N1; питома потужність; модульне проектування; класифікація маловантажних електромобілів; оптимізовані параметри електромобілів.*

Вступ

Маловантажні електромобілі уже широко застосовуються у багатьох сферах суспільного життя, зокрема, для перевезення різних вантажів масою до 1000 кг, для доставляння продуктів харчування та поштових відправлень за індивідуальними замовленнями. Окрім того, такі транспортні засоби використовуються для виконання багатьох технологічних операцій, наприклад, для прибирання територій та вивозу сміття з пішохідних зон центральних частинах міст тощо.

На протязі кількох останніх років спостерігаються відповідні спроби впровадження таких колісних транспортних засобів (КТЗ) у різні сфери життєдіяльності нашої держави, навіть за умови ведення війни. Так, на нещодавній виставці "Com Auto Trans", що проходила у м. Києві з 30 травня по 01 червня 2023 року, було презентовано кілька моделей маловантажних електромобілів. Зокрема, група компаній "БЕЕМ Металавтопром" показала перший дослідний зразок такого КТЗ моделі EN31 "Карпати" [1], спроектованого за участю автора, який являється першим маловантажним електромобілем, виготовленим в Ук-

раїні (а не зібраним у Китаї). Його конструкція успішно витримала приймальні та сертифікаційні випробування. Наразі ведуться підконтрольні експлуатаційні випробування електромобіля, роботи по вдосконаленню конструкції і технічної підготовки його дрібносерійного виробництва на заводі "Стрий-Авто" (Львівська обл.).

Аналіз публікацій

Дослідженням, пов'язаним з доцільністю проектування, організації дрібносерійного виробництва, придбання та експлуатації маловантажних електромобілів, присвячена велика кількість робіт зарубіжних та вітчизняних науковців. Особливо стосовно електромобілів, які здійснюють розвезення продуктів харчування, медикаментів та інших товарів до кінцевих споживачів за індивідуальними замовленнями. У іноземних англомовних виданнях їх називають "*electric vehicles performing last-mile delivery*" (LMD) – електромобілі, що здійснюють доставку на останню милю.

За тематикою сукупність проведених досліджень у сфері маловантажних електромобі-

білів можна об'єднати у п'ять груп, які присвячені розгляду питань екологічності та/ або економічності їх експлуатації, огляду автономних джерел електричної енергії (ДЕЕ), зокрема, тягових акумуляторних батарей (АКБ), аналізу пропонуваніх концепцій створення перспективних конструкцій та розвитку і застосуванню автономних моделей таких КТЗ.

Тенденції зростаючого впровадження маловантажних електромобілів у сферу розвезення вантажів до торговельних точок та індивідуальних замовників проаналізовані у роботі [2]. У ній зазначено, що найбільші світові компанії у сфері електронної комерційної діяльності та поштові оператори планують у найближчі 10-15 років повністю перейти на застосування КТЗ з електричним приводом. Наприклад, гігант електронної комерції американська компанія "Amazon.com Inc." одна із перших підписала "Climate Pledge" – зобов'язання повністю перейти на експлуатацію екологічно чистих КТЗ до 2040 року. Вона замовила 100 000 електричних фургонів доставки вантажів у американський виробника електромобілів "Rivian LLC", а також 1800 електричних фургонів "Mercedes-Benz" для свого європейського парку КТЗ. Ще одна американська транснаціональна логістична компанія "FedEx Corporation" теж планує електрифікувати весь свій парк КТЗ для доставляння вантажів замовникам до 2040 року. Крім того, компанія планує інвестувати 2 мільярди доларів США в створення та організацію виробництва вантажних електромобілів. Американська компанія UPS, що спеціалізується на експрес-доставці вантажів, інвестує в британського виробника електромобілів проекту "Arrival" і замовила 10 000 електромобілів для поповнення свого автопарку в Північній Америці та Європі.

Аналіз собівартості транспортного процесу по доставлянню вантажів замовникам на основі використання різних КТЗ наведений у роботах [3, 4]. Проведені дослідження свідчать, що експлуатація маловантажних електромобілів принаймні на 30 % дешевша за автомобілі, обладнані традиційними двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Окрім переваг зниження експлуатаційних витрат і загальної вартості володіння такими КТЗ, перехід до їх широкого застосування необхідний з умови швидкого зменшення запасів сировини для виробництва різних видів палива та негатив-

ного впливу транспортних засобів з ДВЗ на навколишнє середовище. Хоча однією з необхідних умов для цього являється створення інфраструктури зарядних станцій.

Техніко-економічний аналіз використання маловантажних електричних транспортних засобів у сфері доставляння продуктів харчування на основі оцінки викидів парникових газів (ПГ) у навколишнє середовище та економічних витрат наведений у дослідженні [5]. У ньому порівнюється економічна доцільність використання вантажних електромобілів у порівнянні з автомобілями, обладнаними ДВЗ, для транспортування агропродовольчої продукції та вплив на викиди ПГ. Результати, засновані на емпіричних даних, показують, що впровадження комерційного електромобіля не є економічно вигідним рішенням у короткостроковій перспективі, головним чином через початкову вартість їх придбання. Окрім того, з точки зору викидів ПГ, на коротких відстанях вантажні електромобілі мають більший вплив, ніж автомобілі з ДВЗ.

У дослідженні [6] зазначено, що навіть за високих початкових інвестицій в у сферу маловантажних електромобілів завдяки закупівельній ціні, яка майже вдвічі вища порівняно з КТЗ, обладнаними ДВЗ, нижчі експлуатаційні витрати роблять їх все ж конкурентоспроможним варіантом. особливо з огляду на екологічні аспекти, адже застосування електромобілів призводить до зменшення викидів парникових газів на 17 % (у випадку денного пробігу 20 км) та до 54 % (у випадку пробігу 120 км/день).

Доцільність застосування маловантажних електромобілів LMD для доставляння товарів у сільській місцевості на основі аналізу витрат електроенергії досліджується у роботі [7]. У ній показано, що ефективність їх використання залежить від характеристики конкретної місцевості, зокрема, відстані доставляння товарів, щільності споживачів тощо.

У ряді проведених досліджень у сфері маловантажних електромобілів пропонуються нові концепції їх проектування. Зокрема, у роботі [8] розглянуті питання, пов'язані з розрахунками необхідного енергетичного забезпечення, вибором типу тягових електродвигунів (ЕД) та тягових АКБ маловантажних електромобілів групи LMD. У тягових приводах таких КТЗ найчастіше застосовуються безщіткові тягові ЕД постійного або змінного струму та свинцево-кислотні або літій-іонні

тягові АКБ. Свого роду стандартними параметрами електромобілів LMD, на думку авторів, являються: напруга живлення ЕД – 48,0 В; максимальна швидкість руху – 40 км/год.; автономний пробіг – до 100 км.

Концептуальний проект модульного маловантажного електромобіля [9] ґрунтується на основі застосування базового мобільного шасі та кузовів різного функціонального призначення (рис. 1).



Рис. 1. Система модульної уніфікації маловантажних електромобілів

Проект спрямований на розробку транспортного засобу, що характеризується новим дизайном, у якому основним завданням являлось досягнення найнижчого співвідношення між спорядженою масою та вантажопідйомністю. Іншими важливими досліджуваними аспектами були визначення конкретних його сфер використання, діапазону автономного пробігу, тривалості та вартості заряджання різних типів тягових АКБ.

Цікава концепція КТЗ для доставляння вантажів замовникам запропонована у роботі [10]. Вона передбачає застосування системи з двох вантажних КТЗ, один з яких великої вантажопідйомності може бути обладнаний навіть двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ). Другий КТЗ – невеликий вантажний розкладний електромобіль групи LMD розміщений у кузові великого вантажного авто- або електромобіля. Щоразу, коли це необхідно, його вивантажують, розкладають і використовують для доставляння вантажу на вузьких вулицях, у пішохідних зонах або у випадку заторів. Така система гарантує гнучку та своєчасну доставку вантажів, оскільки проектування маловантажного електромобіля повинно враховувати регламентовані вимоги для руху по смугах, виділених для руху велосипедистів, та у пішохідних зонах населених пунктів. Конструкція такого триколісного електромобіля повинна мати запас ходу 40-60 км і електричний привід номінальною потуж-

ністю $2 \times 0,25$ кВт, що забезпечує максимальну швидкість руху до 40 км/год. Тягові АКБ електромобіля, який відноситься до категорії L2e-U можуть заряджатися від генератора великого вантажного автомобіля.

Проект маловантажного електромобіля подвійного призначення – для міських перевезень товарів до кінцевих споживачів з кузовом-фургоном та для виконання різних технологічних операцій у приміських та сільських місцевостях – наведений у [11]. На основі аналізу технічних параметрів електромобілів-аналогів у роботі рекомендовані їх граничні показники для перспективних моделей: довжина не більше 5,0 м, корисне навантаження не менше 600 кг, навантажувальна площа не менше 5 м^2 , ємність літій-іонних тягових АКБ 28,8-31,6 кВт·год., величина автономного пробігу за циклом тестування WLTP не менше 150 км. Окрім того, з метою покращення характеристик пропонованого маловантажного електро-мобіля порівняно з більшістю КТЗ аналогового призначення, встановлені додаткові умови: відношення потужності тягового ЕД до повної конструктивної маси понад 0,05 кВт/кг; співвідношення вантажо-підйомності до повної маси – не менше 0,4. Концепція пропонованого проекту теж базується на основі застосування модульної системи із базового мобільного шасі та кузовів різного функціонального призначення.

Проблеми, пов'язані зі створенням за використанням автономних маловантажних електромобілів LMD, розглядаються у дослідженнях [12-14]. Зокрема, у роботі [12] зазначено, що за статистичними даними на доставку товарів від складу до кінцевих споживачів припадає 53 % загальних витрат на їх транспортування від виробників. Одним з можливих напрямків зменшення цих витрат – використання автономних транспортних засобів доставки товарів (ADV). Очікується, що з 2019 року ринок ADV зростатиме на 11 % на рік та до 200 мільярдів доларів США до 2029 року. Проблеми, пов'язані із впровадженням інтелектуальних технологій у сферу доставляння товарів кінцевим споживачам автономними електромобілями LMD, розглянуті у роботі [13].

Оригінальна концепція створення та застосування автономних електромобілів LMD запропонована у дослідженні [14]. Пропонована система "Ducktrain" у вигляді автомобільного потяга базується на двох

типах КТЗ – триколісному маловантажному LMD, керованому водієм-кур'єром, та кількох чотириколісних маловантажних ADV з електричним тяговим приводом (рис. 2). Суть запропонованої системи – доставляння вантажів на останніх етапах одночасно кільком різним кінцевим споживачам окремими автономними електромобілями з метою зменшення часу їх доставляння, особливо під час заторів.



Рис. 2. Система доставляння товарів кінцевим споживачам "Ducktrain"

Проблемні питання ресурсозбереження у сфері міського електричного транспорту, зокрема, енергозбереження, до якої, безумовно, відносяться і маловантажні електромобілі LMD, розглядаються у багатьох дослідженнях вітчизняних науковців. Зокрема, у роботі [15] йдеться про значне підвищення енергетичної ефективності перспективних моделей електрорухомого складу шляхом застосування енергозберігаючого тягового приводу з рекуперативним гальмуванням.

Мета та постановка задачі

Мета роботи – визначення напрямків розвитку вітчизняної сфери проектування та дрібносерійного виробництва перспективних конкурентоспроможних моделей маловантажних електромобілів з урахуванням сучасних тенденцій ресурсозбереження та розробка рекомендацій щодо вибору значень їх основних технічних і експлуатаційних параметрів та характерних відносних показників.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз основних технічних параметрів сучасних моделей маловантажних електромобілів;
- класифікувати такі транспортні засоби за основним функціональним призначенням

та іншими характерними класифікаційними ознаками;

- встановити параметри, визначальні в аспекті ресурсо- та енергозбереження;
- проаналізувати можливі напрямки створення маловантажних електромобілів, зокрема, на основі застосування принципів їх модульного проектування;
- розробити і запропонувати найбільш доцільні напрямки формування систем модульного проектування маловантажних електромобілів для освоєння їх виробництва вітчизняними підприємствами.

Класифікація маловантажних електромобілів за експлуатаційними параметрами

На основі огляду та аналізу публікацій стосовно вантажних КТЗ, які використовуються в логістичних системах доставляння вантажів від підприємств-виробників до кінцевих споживачів, сукупність їх типів можна об'єднати у дві основні групи:

- КТЗ групи FMD (англ. *first mile delivery* – доставка першої милі), які призначені для транспортування товарів від виробників до складів або від великих оптових складів (регіональних) до менших оптово-роздрібних (районних) складів;
- КТЗ групи LMD (англ. *last mile delivery* – доставка останньої милі), основне призначення яких – доставляння товарів або поштових відправлень кінцевим замовникам та споживачам, зокрема, ха замовленнями фізичних осіб.

До групи FMD можна віднести вантажні КТЗ категорії N усіх підкатегорій, тобто, N1 повною масою до 3500 кг, N2, повна маса яких становить понад 3500 кг до 7500 кг, та N3 повною масою понад 7500 кг.

До групи LMD відносяться вантажні мототранспортні засоби категорії L. До цієї групи можна віднести також і КТЗ підкатегорії N1, вантажопідйомність яких становить 500-800 кг.

Маловантажні електромобілі категорії L за регламентованими ознаками [16] поділяються на п'ять підкатегорій (табл. 1).

Хоча, транспортні засоби підкатегорії L1e-A не зовсім коректно відносити до електричних. Вони, радше, відносяться до КТЗ з гібридним тяговим приводом [17], адже обладнані тяговими приводами двох типів – механічним (мускульним або педальним) та електричним (рис. 3).

Таблиця 1 – Класифікація маловантажних електромобілів категорії L за регламентованими ознаками

Категорія електромобіля	L1e-A	L2e-U	L5e-B	L6e-BU	L7e-CU
Кількість коліс, од.	3 або 4	3			4
Споряджена маса без маси АКБ, кг	-	≤ 270	≤ 1000	≤ 425	≤ 600
Номінальна потужність ЕД, кВт	≤ 1,0	-	-	≤ 6,0	≤ 15
Допустима довжина/ ширина, м	≤ 4,0/ ≤ 1,0	≤ 4,0/ ≤ 2,0		≤ 3,0	≤ 3,7
Максимальна швидкість, км/год.	≤ 25	≤ 50	-	≤ 45	≤ 90

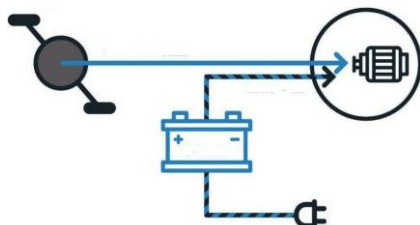


Рис. 3. Схема мускульно-електричного тягового приводу КТЗ підкатегорії L1e-A

Такі транспортні засоби можуть рухатися за допомогою тільки педального приводу, оскільки при досягненні максимальної швидкості руху 25 км/год. електричний тяговий привід вимикається.

Аналіз величин регламентованих параметрів маловантажних електромобілів категорії L показує, що їх експлуатаційні характеристики можуть бути доволі різними навіть для моделей однакових підкатегорій. Адже, їх вантажопідйомність, як і повна конструктивна маса, не регламентовані, хоча, формально, обмежені допустимою спорядженою масою

Таблиця 2 – Основні технічні параметри велоелектромобілів підкатегорії L1e-A

Модель електромобіля	Citkar	Mubea	EAV eCargo	CityQ
Довжина/ ширина, м	3,01/ 1,0	2,77/ 0,995	2,775/ 1,0	2,22/ 0,87
Повна/ споряджена маса, кг	415/ 200	500/ 300	420/ 170	350/ 100
Вантажопідйомність, кг	150	135	185	
Параметри тягового приводу:				
- номінальна потужність ЕД, кВт	0,25			
- тип тягових АКБ	літій-іонні			
- ємність тягових АКБ, кВт·год.	1,6	1,24	-	
- напруга тягових АКБ, В	-	48	48	-
Автономний пробіг, км	50-60	50	65	70-100

Велоелектромобілі підкатегорії L1e-A обладнані одномісними відкритими кабінами водія. Їх максимальна швидкість руху сягає регламентованої максимальної величини 25 км/год. Діапазон повної конструктивної маси 350-500 кг, корисна вантажопідйомність становить 135-185 кг а величина автономного пробігу – 40-100 км.

Вантажні електромобілі-трицикли підкатегорії L2e-U обладнуються відкритими або

без урахування маси тягових АКБ, від яких залежить величина автономного пробігу.

Отже, до додаткових визначальних ознак поділу маловантажних електромобілів на групи з адекватними або близькими експлуатаційними параметрами відносяться:

- вантажопідйомність;
- повна конструктивна маса;
- величина автономного пробігу.

Це основні експлуатаційні характеристики електромобілів LMD, адже саме від них залежить ефективність їх експлуатації. Звичайно, не маловажне значення належить і ринковій вартості таких КТЗ з адекватними величинами цих параметрів.

Для визначення діапазонів величин вантажопідйомності, автономного пробігу та повної конструктивної маси, характерних для кожної з підкатегорій маловантажних електромобілів категорії L, у табл. 2-6 наведені основні технічні параметри їх сучасних моделей.

закритими (наприклад, модель "Carver R+") одномісними кабінами. Їх характерною особливістю являється широкий діапазон вантажопідйомності – від 50 кг до 250 кг.

Характерною особливістю маловантажних трициклів підкатегорії L5e-B є застосування тягових ЕД доволі малої номінальної потужності – 3,0-9,7 кВт, хоча цей параметр не є регламентованим.

Таблиця 3 – Основні технічні параметри велоелектромобілів підкатегорії L2e-U

Модель електромобіля	Carver R+	GECO Truck XC V9	OAK Series	CT-Kargo	CT-Kube
Вмістимість кабіни, чол.	1				
Довжина/ ширина, м	2,89/ 0,98	2,89/ 1,2	2,1/ 0,75	2,92/ 0,98	2,1/ 0,75
Повна/ споряджена маса, кг	500/ 395	676/ 426	380/ 330	685/ 441	380/ 330
Вантажопідйомність	105	250	50	244	50
Параметри тягового приводу:					
- номінальна потужність ЕД, кВт	2x2,0	3,0	2x2,0	3,7	4,0
- тип тягових АКБ	Li-NCM	AGM	LiFePO ₄		
- ємність тягових АКБ, кВт·год.	7,1	4,3	4,86	6,99	4,86
- напруга тягових АКБ, В	-	72,0	51,2	-	51,2
Максимальна швидкість, км/год.	45	45	45	50	50
Автономний пробіг, км	130	50-60	110		120

Таблиця 4 – Основні технічні параметри велоелектромобілів підкатегорії L5e-B

Модель електромобіля	Carver S+	EVIG	Zbee	HeavyTruck XC
Вмістимість кабіни, чол.	1			
Довжина/ ширина, м	2,89/ 1,06	3,14/ 1,4	2,4/ 1,25	2,99/1,09
Повна/ споряджена маса, кг	500/ 395	-	280/	830/ 499
Вантажопідйомність	105	350	-	331
Параметри тягового приводу:				
- номінальна потужність ЕД, кВт	2x3,5	9,7	4,0	3,0
- тип тягових АКБ	Li-NCM	LiFePO ₄		AGM
- ємність тягових АКБ, кВт·год.	7,1	5,0 або 10,0 + 0,57 (сонячні панелі)		-
- напруга тягових АКБ, В	-		51,2	-
Максимальна швидкість, км/год.	80	60	45	
Автономний пробіг, км	120	75 або 150	80	30-80

Таблиця 5 – Основні технічні параметри велоелектромобілів підкатегорії L6e-BU

Модель електромобіля	Antric One	Geco Travel	J2-C	EBU YY-E-Van
Вмістимість кабіни, чол.	1	2	1	2
Довжина/ ширина, м	3,05/ 1,18	2,45/ 1,22	2,89/ 1,18	2,86/ 1,21
Повна/ споряджена маса, кг	615/ 193	905/ -	500/ 300	520/ 270 (300)
Вантажопідйомність, кг	422	275	200	250 (220)
Параметри тягового приводу:				
- номінальна потужність ЕД, кВт	3,0			
- тип тягових АКБ	LiFePO ₄			
- ємність тягових АКБ, кВт·год.	2,8	7,2	6,3	7,2 (10,2)
- напруга тягових АКБ, В	-	72,0	60	
Максимальна швидкість, км/год.	25	45		38-45
Автономний пробіг, км	50	100	80-100	100 (120)

Маловантажні електромобілі підкатегорії L6e-BU при обмеженій номінальній потуж-

ності тягових АКБ вирізняються досить великою вантажопідйомністю – 200-422 кг.

Таблиця 6 – Основні технічні параметри велоелектромобілів підкатегорії L7e-CU

Модель електромобіля	Cargo XC V2	Pacta BOX	Wuling E10	LE17
Вмістимість кабіни, чол.	2		1	
Довжина/ ширина, м	3,15/ 1,297	3,65/ 1,26	3,31/ 1,08	3,474/ 1,08
Повна/ споряджена маса, кг	1064/ 604	1000/ 500	885/ 265	865/ 250
Вантажопідйомність, кг	460	500	620	615
Параметри тягового приводу:				
- номінальна потужність ЕД, кВт	7,5	5,0	-	7,5
- тип тягових АКБ	LiFePO ₄	літій-іонні		
- ємність тягових АКБ, кВт·год.	10,08	12,36	9,0	8,0-10,0
- напруга тягових АКБ, В	72	60	-	
Максимальна швидкість, км/год.	76	52	-	
Автономний пробіг, км	150	100	115	80

Найбільшу вантажопідйомність мають чотириколісні вантажні електромобілі підкатегорії L7e-CU – 460-620 кг, хоча номінальна потужність їх тягових ЕД – всього 5,0-7,5 кВт – не перевищує 50 % від максимально допустимої – 15,0 кВт.

Що стосується автономних пробігів електромобілів LMD, діапазон яких дуже широкий – від 30 до 150 км, зрозуміло, що він залежить, у першу чергу, від енергоємності тягових АКБ. Тому, варто мати на увазі, що великий автономний пробіг або зменшує вантажопідйомність, або збільшує повну конструктивну масу електромобілів, що погіршує економічну ефективність їх експлуатації.

На основі величин основного, відповідно до функціонального призначення електромобілів LMD, експлуатаційного параметра – вантажопідйомності їх сучасних типових моделей підкатегорій L1e-A, L2e-U, L5e-B, L6e-BU та L7e-CU (табл. 2-6) побудована діаграма, наведена на рис. 4.

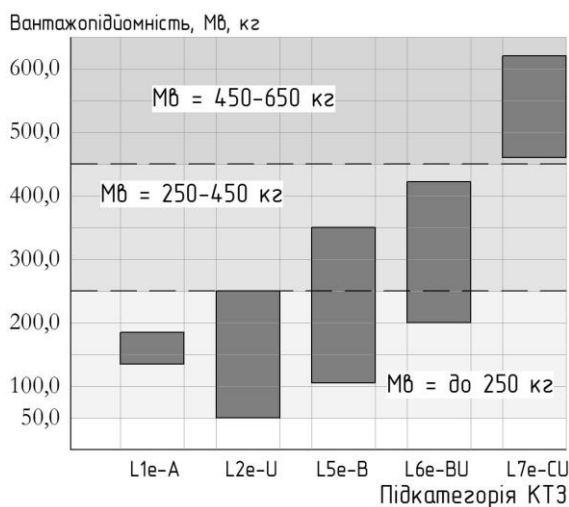


Рис. 4. Діапазони вантажопідйомності маловантажних електромобілів різних підкатегорій категорії L

На основі аналізу цієї діаграми можна виділити три групи електромобілів LMD за вантажопідйомністю:

- група LMD-S (S – англ. *smaller* – менший) – КТЗ вантажопідйомністю до 250 кг підкатегорій L1e-A, L2e-U, L5e-B та L6e-BU;

- група LMD-A (A – англ. *average* – середній) – КТЗ вантажопідйомністю понад 250 до 450 кг підкатегорій L5e-B та L6e-BU;

- група LMD-B (B – англ. *bigger* – більший) – КТЗ вантажопідйомністю понад 450 до 650 кг підкатегорії L7e-CU.

Оскільки електромобілі групи LMD-S підкатегорії L1e-A вирізняються педально-електричним тяговим приводом доречно виділити їх в окрему підгрупу LMD-Sв (в – англ. *bicycle* – велосипед).

Ще одна група маловантажних електромобілів LMD-N об'єднує КТЗ з електричним тяговим приводом підкатегорії N1 вантажопідйомністю до 800 кг.

Пропонована класифікація сприятиме проведенню доволі коректної оцінки технічного рівня проєктованих вантажних електромобілів LMD відповідної групи за вантажопідйомністю.

Визначальні параметри маловантажних електромобілів в аспекті ресурсозбереження

Ресурсозбереження – це організаційна, економічна, науково-технічна, практична та інформаційна діяльність, яка супроводжує усі стадії життєвого циклу об'єктів виробництва і спрямована на мінімізацію витрат сировини, матеріалів та енергій різних видів на одиницю кінцевого продукту з огляду на існуючий рівень розвитку техніки і технологічних процесів та на забезпечення найменшого впливу на людину і навколишнє середовище [18].

Ресурсозбереження у галузі міського електричного транспорту – надзвичайно актуальний напрямок з огляду на сучасний стан економічного розвитку України. Основними напрямками ресурсозбереження у сфері електричного маловантажного міського транспорту являються скорочення термінів, зменшення обсягів фінансування, матеріалів, електричної та інших видів енергії тощо на проєктування і освоєння виробництва нових, більш досконалих моделей та їх експлуатацію, зокрема, технічне обслуговування та ремонт.

До заходів, які можуть забезпечувати ресурсозбереження на етапі проєктування перспективних конструкцій електромобілів LMD відносяться:

- скорочення термінів та обсягів фінансування на створення перспективних моделей маловантажних електромобілів

- зменшення спорядженої маси при заданих параметрах вантажопідйомності та автономного пробігу;

– застосування принципів модульного проектування на основі максимальної уніфікації їх конструкцій;

– розширення модельного ряду таких КТЗ різного функціонального призначення на основі створення типорозмірних рядів базових шасі.

З огляду на наведені заходи до найбільш впливових параметрів на забезпечення ресурсозбереження відносяться:

– споряджена та повна конструктивна маса;

– номінальна потужність тягових ЕД;

– максимальна швидкість руху КТЗ.

– Для оцінки впливу зазначених технічних параметрів КТЗ на ресурсозбереження, зокрема, витрату конструкційних матеріалів та електроенергії на перевезення вантажів, застосовуються наступні показники:

– коефіцієнт матеріалоемності КТЗ;

– коефіцієнт вантажопідйомності КТЗ;

– коефіцієнт питомої номінальної потужності КТЗ.

Як відомо, коефіцієнт матеріалоемності конструкцій КТЗ характеризує відношення їх спорядженої маси до повної конструктивної маси:

$$k_{me} = \frac{M_{сп}}{M_{п}}, \quad (1)$$

де $M_{сп}$ та $M_{п}$ – відповідно, споряджена та повна конструктивна маса КТЗ, кг.

Проте, таке визначення коефіцієнту матеріалоемності стосовно КТЗ, обладнаних електричним тяговим приводом, видається не надто коректним. Адже, їх споряджена маса суттєво залежить від величини автономного пробігу, залежного від енергоемності тягових АКБ і, відповідно, їх

маси. Тому, доречніше, визначати коефіцієнт матеріалоемності за виразом:

$$k_{me}^0 = \frac{M_{сп}^0}{M_{п}} = \frac{M_{сп} - m_{акб}}{M_{п}}, \quad (2)$$

де $M_{сп}^0$ – споряджена маса електромобіля LMD без маси тягових АКБ, кг; $m_{акб}$ – маса тягових АКБ, кг.

Маса тягових АКБ за відсутності інформації від виробників, рівна:

$$m_{акб} = \frac{W_{акб}}{\rho_{акб}^w}, \quad (3)$$

де $W_{акб}$ – енергоемність тягових АКБ, кВт·год.; $\rho_{акб}^w$ – питома енергоемність тягових АКБ відповідного типу, кВт·год/кг.

Для найбільш застосовуваного типу тягових АКБ – LiFePO₄ – $\rho_{акб}^w = 0,09-0,10$ кВт·год/кг. Для літій-іонних АКБ типів Li-NCM та LTO $\rho_{акб}^w = 0,15-0,16$ кВт·год./кг та $\rho_{акб}^w = 0,07-0,08$ кВт·год/кг, відповідно, а типу AGM – $\rho_{акб}^w = 0,02-0,04$ кВт·год/кг.

Матеріалоемність конструкцій КТЗ характеризується також і коефіцієнтом вантажопідйомності:

$$k_g = \frac{M_{в}}{M_{п}} = \frac{M_{п} - M_{сп}}{M_{п}}, \quad (4)$$

де $M_{в}$ – корисна маса або вантажопідйомність КТЗ, кг.

Результати порівняльних розрахунків з визначення коефіцієнтів матеріалоемності електромобілів груп LMD-S, зокрема, LMD-Sb, LMD-A та LMD-B за виразами (1) та (2) наведені у табл. 7-10.

Таблиця 7 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-Sb

Модель електромобіля	Citkar	Mubea	EAV eCargo	CityQ
Повна/ споряджена маса, кг	415/ 200	500/ 300	420/ 170	350/ 100
Вантажопідйомність, кг	150	135	185	
Маса тягових АКБ, кг	16	23	-	
Споряджена маса без АКБ, кг	184	287	-	
Коефіцієнти матеріалоемності:				
- k_{me}	0,48	0,60	0,41	0,29
- k_{me}^0	0,44	0,57	-	
Коефіцієнт вантажопідйомності, k_g	0,36	0,27	0,44	0,53

Таблиця 8 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-S

Модель електромобіля	Carver R+	GECO Truck XC V9	OAK Series	CT-Kargo	CT-Kube	Carver S+
Повна/ споряджена маса, кг	500/ 395	676/ 426	380/ 330	685/ 441	380/ 330	500/ 395
Вантажопідйомність, кг	105	250	50	244	50	105
Маса тягових АКБ, кг	48	143	49	70	49	45
Споряджена маса без АКБ, кг	290	283	281	371	281	350
Коефіцієнти матеріалоемності:						
- $k_{м\epsilon}$	0,79	0,63	0,87	0,64	0,87	0,79
- $k_{м\epsilon}^0$	0,58	0,37	0,74	0,54	0,74	0,70
Коефіцієнт вантажопідйомності, k_g	0,21	0,37	0,13	0,36	0,13	0,21

Таблиця 9 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-A

Модель електромобіля	HeavyTruck XC	Antric One	EBU YY-E-Van	
Повна/ споряджена маса, кг	830/ 499	615/ 193	520/ 270	520/ 300
Вантажопідйомність, кг	331	422	250	220
Маса тягових АКБ, кг	100	28	72	102
Споряджена маса без АКБ, кг	399	165	198	
Коефіцієнти матеріалоемності:				
- $k_{м\epsilon}$	0,60	0,31	0,52	0,58
- $k_{м\epsilon}^0$	0,48	0,27	0,38	
Коефіцієнт вантажопідйомності, k_g	0,40	0,69	0,48	0,42

Таблиця 10 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-B

Модель електромобіля	Cargo XC V2	Pacta BOX	Wuling E10	LE17
Повна/ споряджена маса, кг	1064/ 604	1000/ 500	885/ 265	865/ 250
Вантажопідйомність, кг	460	500	620	615
Маса тягових АКБ, кг	75	50	-	75
Споряджена маса без АКБ, кг	529	450	-	175
Коефіцієнти матеріалоемності:				
- $k_{м\epsilon}$	0,57	0,50	0,30	0,29
- $k_{м\epsilon}^0$	0,50	0,45	-	0,20
Коефіцієнт вантажопідйомності, k_g	0,43	0,50	0,70	0,71

На основі аналізу діаграми коефіцієнтів матеріалоемності та вантажопідйомності маловантажних електромобілів категорії L, наведеної на рис. 5, для проектування нових перспективних і конкурентоспроможних моделей повинні прийматися наступні їх величини:

– при застосуванні сталевих профільних матеріалів (труб, швелерів, кутників) та листового прокату $k_{м\epsilon} = 0,4-0,5$; $k_{м\epsilon}^0 = 0,3-0,4$; $k_g = 0,35-0,45$;

– за умови застосування профільних матеріалів та листового прокату з алюмінієвих або інших сплавів $k_{м\epsilon} = 0,3-0,4$; $k_{м\epsilon}^0 = 0,2-0,3$; $k_g = 0,5-0,6$.

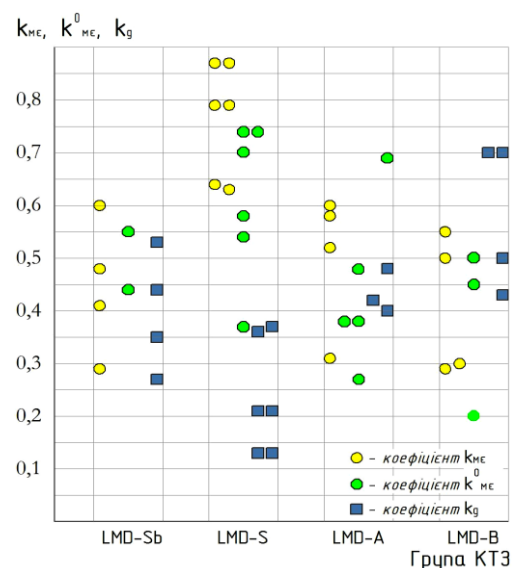


Рис. 5. Коефіцієнти матеріалоемності та вантажопідйомності маловантажних електромобілів різних підкатегорій категорії L

Вагомий вплив на енергозбереження, окрім матеріалоемності маловантажних електромобілів, мають такі параметри як номінальна потужність тягових ЕД та максимальна швидкість руху. Саме від них та від повної конструктивної маси залежить середня витрата електроенергії тягових АКБ при інших однакових умовах руху таких КТЗ.

Аналіз номінальної потужності тягових ЕД типових моделей електромобілів LMD показує, що навіть для моделей підкатегорій L2e-U та L5e-B, для яких цей параметр не регламентований, її величина становить всього 3,0-4,0 кВт у моделей підкатегорії L2e-U та 3,0-9,7 кВт у моделей підкатегорії L5e-B. Зрештою, і у моделей підкатегорії L7e-CU номінальна потужність тягових ЕД сягає лише 50 % максимально дозваної – 7,5 кВт.

Тому, при проектуванні перспективних і конкурентоспроможних електромобілів LMD необхідно орієнтуватися на питомі параметри типових моделей:

- питому потужність;
- коефіцієнт експлуатаційної потужності;
- коефіцієнт ефективної (економічної) потужності.

Як відомо, питома потужність КТЗ характеризує відношення сумарної номінальної потужності тягових ЕД до повної конструктивної маси:

$$\Delta N_e = \frac{\sum N_{ед}^H}{M_{п}}, \quad (5)$$

де $\sum N_{ед}^H$ – сумарна номінальна потужність тягових ЕД, кВт.

Пропонований коефіцієнт експлуатаційної потужності КТЗ характеризує і його питому потужність і максимальну швидкість руху:

$$k_{екN} = k_p \frac{10^4 \sum N_{ед}^H}{M_{п} \cdot V_{max}}, \quad (6)$$

де V_{max} – максимальна швидкість руху КТЗ, км/год.; k_p – розмірний коефіцієнт, кг·км/год/кВт.

Коефіцієнт ефективної (економічної) потужності характеризує відношення потужності ЕД, необхідної для руху із заданою максимальною швидкістю, до номінальної потужності встановлених ЕД:

$$k_{эфN} = \frac{N_{ед}^V}{\sum N_{ед}^H}, \quad (7)$$

де $N_{ед}^V$ – номінальна потужність тягових ЕД, необхідна для руху із заданою максимальною швидкістю, кВт:

$$N_{ед}^V = \frac{M_{п} (170 + 0,053 V_{max}^2) V_{max}}{3,6 \cdot 10^3 \eta_{пр}}, \quad (8)$$

де $\eta_{пр}$ – коефіцієнт корисної дії тягового приводу.

Для тягових приводів сучасних моделей маловантажних електромобілів на етапі проведення порівняльних розрахункових досліджень $\eta_{пр} = 0,9$.

Розрахункові величини питомої потужності та коефіцієнтів експлуатаційної і економічної потужностей типових моделей маловантажних електромобілів LMD категорії L наведені у табл. 11-14.

Таблиця 11 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-Sb

Модель електромобіля	Citkar	Mubea	EAV eCargo	CityQ
Повна маса, кг	415	500	420	350
Номінальна потужність тягових ЕД, кВт	0,25			
Максимальна швидкість руху, км/год.	25			
Питома потужність, кВт/кг	0,0006	0,0005	0,0006	0,0007
Коефіцієнт експлуатаційної потужності, $k_{екN}$	0,24	0,2	0,24	0,28
Коефіцієнт економічної потужності, $k_{эфN}$	2,58	3,11	2,61	2,17

Таблиця 12 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-S

Модель електромобіля	Carver R+	Geco Truck XC V9	OAK Series	CT-Kargo	CT-Kube	Carver S+
Повна, кг	500	676	380	685	380	500
Номінальна потужність тягових ЕД, кВт	2x2,0	3,0	2x2,0	3,7	4,0	2x3,5
Максимальна швидкість руху, км/год.	45			50		80
Питома потужність, кВт/кг	0,008	0,0044	0,0105	0,0054	0,0105	0,014
Коефіцієнт експлуатаційної потужності, $k_{екN}$	1,78	0,98	2,33	1,08	2,1	1,75
Коефіцієнт економічної потужності, $k_{ефN}$	0,31	0,35	0,15	0,86	0,44	0,90

Таблиця 13 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-A

Модель електромобіля	HeavyTruck XC	Antric One	EBU YY-E-Van
Повна маса, кг	830	615	520
Номінальна потужність тягових ЕД, кВт	3,0		
Максимальна швидкість руху, км/год.	45	25	45
Питома потужність, кВт/кг	0,00036	0,00488	0,00577
Коефіцієнт експлуатаційної потужності, $k_{екN}$	0,80	1,95	1,28
Коефіцієнт економічної потужності, $k_{ефN}$	0,69	0,32	0,44

Таблиця 14 – Оцінка матеріалоемності маловантажних електромобілів категорії L групи LMD-B

Модель електромобіля	Cargo XC V2	Pacta BOX	Wuling E10	LE17
Повна маса, кг	1064	1000	885	865
Номінальна потужність тягових ЕД, кВт	7,5	5,0	7,5	
Максимальна швидкість руху, км/год.	76	52	71	
Питома потужність, кВт/кг	0,007	0,005	0,0085	0,0087
Коефіцієнт експлуатаційної потужності, $k_{екN}$	0,093	0,096	0,119	0,122
Коефіцієнт економічної потужності, $k_{ефN}$	1,58	1,01	1,39	1,35

Аналіз отриманих результатів показує, що коефіцієнти експлуатаційної $k_{екN}$ та економічної потужностей $k_{ефN}$, фактично, обидва характеризують економічність тягового приводу за встановленою потужністю тягових ЕД.

Оптимальними величинами коефіцієнта економічної потужності являються $k_{ефN} = 0,9-1,0$. Величини цього коефіцієнта $k_{ефN} > 1,0$ характеризують не достатню потужність тягових ЕД для руху із заданою максимальною швидкістю на міських

вулицях з ухилами дорожнього покриття. Проте, з огляду на енергозбереження, такі моделі електромобілів LMD все ж найбільш економічно доцільні в експлуатації.

Питома потужність маловантажних електромобілів різної вантажопідйомності з огляду на регламентовані величини номінальної потужності тягових ЕД для відповідних їх підкатегорій (L1e-A, L6e-BU та L7e-CU) різняться, практично, щонайменше у десять разів (табл. 15)

Таблиця 15 – Питома потужність маловантажних електромобілів різних підкатегорій категорії L

Підкатегорія електромобілів LMD	L1e-A	L2e-U	L5e-B	L6e-BU	L7e-CU
Група за вантажопідйомністю	LMD-Sb	LMD-S	LMD-A		LMD-B
Вантажопідйомність, кг	до 250	>250 до 450	>450 до 650		
Питома потужність, кВт/кг	0,0005-0,0007	0,0044-0,0105	0,00036	0,00488-0,00577	0,005-0,0087

Для проектування перспективних моделей маловантажних електромобілів MLD з огляду на енергозбереження рекомендовані наступні величини питомої потужності:

– для електромобілів підкатегорії L1e-A – 0,00065-0,0007 кВт/кг;

– для електромобілів підкатегорії L5e-B – 0,00035-0,0004 кВт/кг;

– для електромобілів підкатегорії L2e-U L6e-BU та L7e-CU – 0,0055-0,008 кВт/кг.

Напрямки створення перспективних моделей маловантажних електромобілів

На нинішньому етапі розвитку конструкцій маловантажних електромобілів MLD їх проектування здійснюється за двома уже традиційними напрямками, які передбачають їх якомога більший рівень уніфікації. Обидва напрямки ґрунтуються на модульно-блочних системах модульного проектування, в основі яких модулі базових шасі та модулі кузовів різного функціонального призначення. Відмінність цих напрямків у сукупності основних модулів базових шасі. В деяких системах модульного проектування всього одне базове шасі, в інших – кілька, зазвичай, два-три модулі, які відрізняють величиною колісних баз, інколи – і довжиною задніх звисів.

Проте, обидва цих напрямки створення базових шасі не забезпечують, по-перше, досягнення максимально-можливого рівня уніфікації їх конструкцій при наявності кількох типорозмірів. По-друге, такі системи не здатні задовольнити потреби споживачів у різних моделях, наприклад, триколісних підкатегорій L1e-A, L2e-U або L5e-B та чотириколісних підкатегорій L6e-BU або L7e-CU. Потретье, розширення модельного ряду три- та чотириколісних моделей електромобілів LMD при застосуванні цих систем потребує більших обсягів фінансування, часу та відповідної підготовки виробництва.

Тому, для створення перспективних і конкурентоспроможних моделей маловантажних електромобілів категорій L та N1 з метою задоволення якомога ширшого кола споживачів, пропонуються системи їх модульного проектування на основі застосування більшої сукупності основних модулів.

Один з можливих варіантів систем модульного проектування таких КТЗ реалізований у конструкції вантажного електромобіля моделі EN31 "Карпати". Рами їх базових шасі з різними колісними базами складаються з двох основних модулів – модуля передньої частини з вузлами кріплення керованого моста та модуля задньої частини з кронштейнами кріплення тягового моста (рис. 6).

Модулі передньої та задньої частин рам базових шасі мають різні максимально-уніфіковані модифікації, які передбачають застосування керованих або керовано-тягових мостів різних типів за конструкцією та різної вантажопідйомності. Аналогічно і модулі задніх частин рам шасі можуть мати

виконання не тільки різної довжини, що забезпечує створення електромобілів з різною колісною базою, а й можуть обладнуватися тяговими мостами різних типів та тяговими ЕД різної потужності тощо.

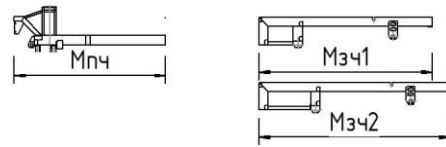


Рис. 6. Модулі базових шасі рам вантажного електромобіля EN31 "Карпати": Мпч – модуль передньої частини рами; Мзч1 і Мзч2 – модулі задньої частини рами

Інший перспективний варіант системи модульного проектування маловантажних міських електромобілів LMD передбачає застосування ще більшої сукупності основних модулів – модуля кабіни водія, модулів керованого моста, модулів тягового моста та допоміжних модулів – модулів кузовів-фургонів різного призначення необхідних типорозмірів (рис. 7).

Одноколісні Мкм1 та двоколісні Мкм2 модулі керованих мостів у сукупності з, відповідно, двоколісними Мтм2 та одноколісними Мтм1 модулями тягових мостів забезпечують створення базових шасі, щонайменше, у чотирьох варіантах:

- триколісні з колісною формулою 1+2.1;
- триколісні з колісною формулою 2+1.1;
- триколісні з колісною формулою 2+1.2;
- чотириколісні з колісною формулою 4x2.1.

Пропонована система забезпечує також створення максимально-уніфікованих тягових модулів, обладнаних ЕД різної потужності у відповідності до вимог [2]. Звісно, максимально-уніфіковані три- та чотириколісні моделі матимуть, відповідно, різну вантажопідйомність, а кузова-фургони – різний об'єм.

На основі базових модулів можуть бути створені і їх різні варіанти (модифікації), наприклад, модулі кабіни водія різної ширини, принаймні, однієї шириною 1,2 м та однієї і двомісної шириною 1,4...1,5 м, а при потребі, і більш ширші або вужчі.

Аналогічно, модулі тягового моста можуть бути виконані у варіантах з різною довжиною, що забезпечить створення базових шасі з кількома величинами колісної бази.

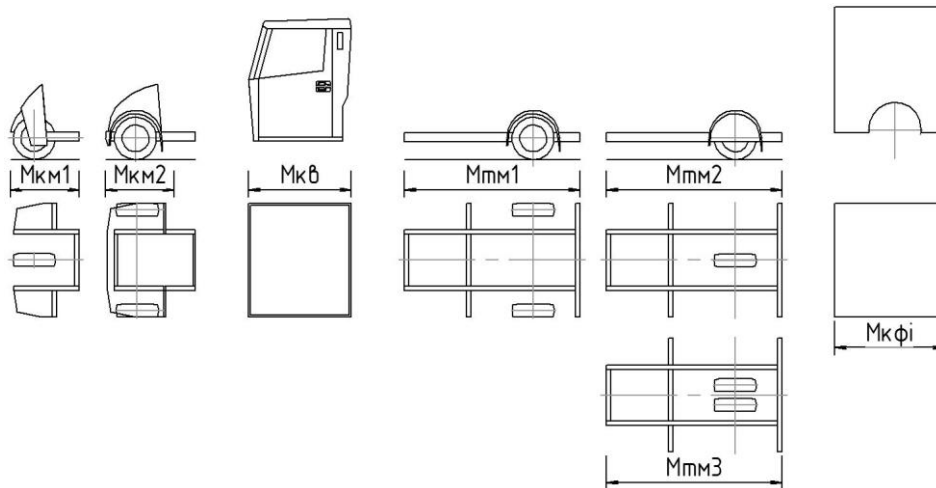


Рис. 7. Сукупність базових модулів системи модульного проектування маловантажних електромобілів: Мкм – модулі керованого моста; Мкв – модуль кабіни водія; Мтм – модулі тягового моста; Мкф_і – модулі кузовів-фургонів різних типів і розмірів

Ці ж модулі та модулі керованого моста повинні мати, принаймні, два варіанти за шириною для створення базових шасі електромобілів з шириною кабіни 1,2 м та 1,4...1,5 м.

Пропонована сукупність базових та допоміжних модулів забезпечує проектування та виробництво маловантажних електромобілів LMD, принаймні, підкатегорій L5e-B (триколісні) та L6e-BU і L7e-CU (чотириколісні) різної ширини та вантажопідйомності (рис. 8).

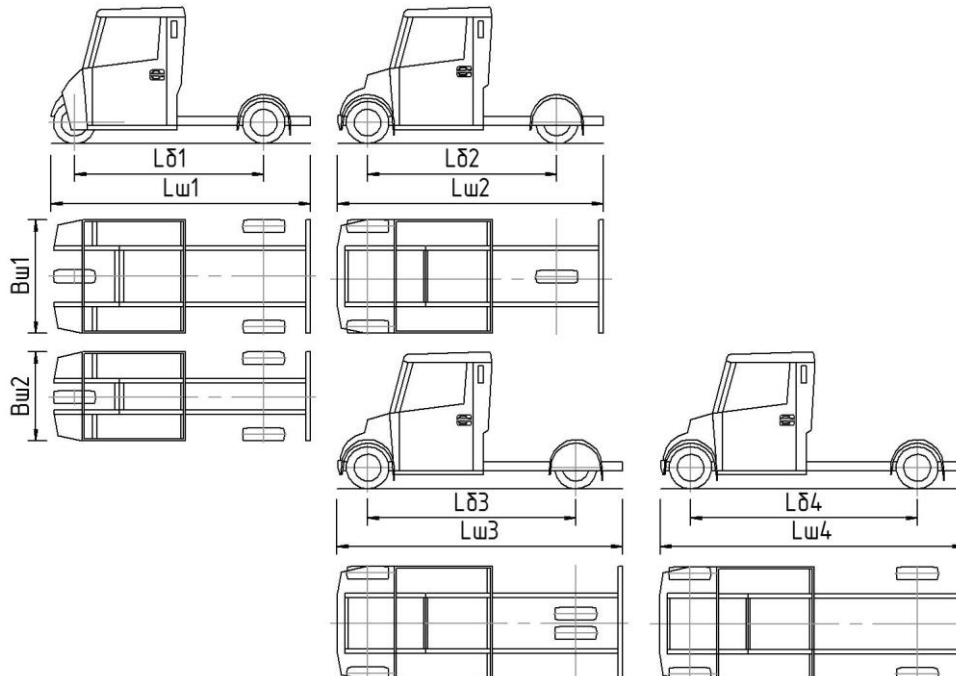


Рис. 8. Типорозмірний ряд базових шасі маловантажних електромобілів LMD

Результати досліджень

Проведений аналіз основних технічних параметрів маловантажних електромобілів LMD показав, що існуюча їх класифікація на

категорії L та N зовсім не враховує їх основних функціональних параметрів – вантажопідйомності та величини автономного пробігу. Більше того, вона базується на принципово різних класифікаційних ознаках (табл. 16),

причому, для категорії L прийнято п'ять ознак, а для категорії N – всього дві.

Як видно з табл. 16, лише допустимі габаритні розміри являються спільною ознакою вантажних електромобілів категорій L та N. Саме тому, для адекватного порівняння експлуатаційних параметрів маловантажних електромобілів різних підкатегорій категорії L та підкатегорії N1, вантажопідйомність яких може різнитися до 30 разів або на 3000 %, видається необхідною їх класифікація за вантажопідйомністю (табл. 17).

Таблиця 17 – Класифікація маловантажних електромобілів категорій L та N1 за вантажопідйомністю

Категорія електромобілів LMD	L				N1	
Група за вантажопідйомністю	LMD-Sb	LMD-S	LMD-A	LMD-B	LMD-N1	FMD-N1
Вантажопідйомність, кг	до 250	> 250 до 450	> 450 до 650		до 800	> 800 до 1500
Примітка: До групи LMD-S входять виключно велоелектромобілі з комбінованим педально-електричним тяговим приводом						

Ще одним дуже важливим експлуатаційним параметром маловантажних електромобілів LMD являється величина автономного пробігу. Для сучасних типових моделей електромобілів LMD величина автономного пробігу становить 50-150 км. Зазвичай, пробіг понад 100 км досягається у модифікаціях, обладнаних тяговими АКБ збільшеної енергоємності. Тому, для адекватного порівняння технічних параметрів проєктованих моделей електромобілів MLD з моделями-аналогами доцільним видається їх поділ на дві групи:

- група L100 – моделі з автономним пробігом 50-100 км;
- група L150 – моделі з автономним пробігом понад 100 км до 150 км.

Рекомендована величина автономного пробігу проєктованих перспективних моделей маловантажних електромобілів LMD 70-80 км. Проєктування таких КТЗ з величиною автономного пробігу понад 150 км являється недоцільним, тому що низький коефіцієнт вантажопідйомності сприятиме малій економічності їх експлуатації. У будь-якому разі, рекомендований коефіцієнт вантажопідйомності проєктованих перспективних маловантажних електромобілів MLD з огляду на забезпечення їх конкурентоспроможності не повинен бути меншим $k_g = 0,4$.

З огляду на потреби енергозбереження дуже важливе значення має вибір оптимізованих величин двох параметрів – питомої потужності та максимальної швидкості руху проєктованих перспективних моделей електромобілів LMD. Вибір величин цих параметрів обумовлений регламентованими допус-

Таблиця 16 – Класифікаційні ознаки маловантажних електромобілів категорій L та N

Категорія електромобілів LMD	L	N
Кількість коліс	+	-
Допустимі габаритні розміри	+	
Допустима повна маса	-	+
Допустима споряджена маса без маси тягових АКБ	+	-
Допустима номінальна потужність тягових ЕД	+	
Допустима максимальна швидкість руху	+	

тимою номінальною потужністю їх тягових ЕД та максимальною швидкістю руху для більшості підкатегорій електромобілів категорії L. Загалом, доцільним видається дотримання принципів застосування тягових ЕД для забезпечення коефіцієнта економічної потужності $k_{\text{ефN}} = 1,0$ та обмеження максимальної швидкості руху не більше 50 км/год. Тим паче, що ця швидкість являється максимально дозволеною у вітчизняних населених пунктах.

Оскільки маловантажні електромобілі LMD різних підкатегорій у великій мірі різняться, перш за все, вантажопідйомністю і, відповідно, повною конструктивною масою, найбільш оптимальними напрямками створення їх нових перспективних і конкурентоспроможних конструкцій являються:

- проєктування типорозмірних рядів базових шасі, які забезпечать виробництво та експлуатацію багатьох моделей і модифікацій електромобілів різного функціонального призначення у багатьох сферах суспільного життя;

- застосування систем модульного проєктування базових шасі електромобілів та кузовів для забезпечення максимальних рівнів уніфікації їх конструкцій, зменшення обсягів робіт з технологічної підготовки їх виробництва за рахунок скорочення номенклатури стапельного оснащення, кондукторів, інструментів тощо.

Наприклад, запропонована система модульного проєктування маловантажних електромобілів забезпечить створення типорозмір-

них рядів базових шасі категорій L та N1, зокрема:

- триколісних моделей з колісними формулами 3x1.1, 3x1.2 та 3x2.2 з різними колісними базами, розрахованих на різну вантажопідйомність;

- чотириколісних моделей з колісною формулою 4x2.1з або 4x2.1п, обладнаних, відповідно, заднім або переднім тяговим приводом, а за необхідності і 4x4.1, тобто, повнопривідних.

Лише велоелектромобілі підкатегорії L1-eA потребують індивідуального підходу до проектування, що пов'язало із застосування педально-електричного тягового приводу з дуже обмеженою номінальною потужністю тягового ЕД.

Висновки

Розглянуті напрямки створення перспективних моделей маловантажних електромобілів LMD, являються актуальними для сфери розвитку вітчизняного електромобілебудування.

На основі розробленої класифікації маловантажних електромобілів LMD за вантажопідйомністю та аналізу величин основних технічних та експлуатаційних параметрів їх сучасних типових моделей різних підкатегорій категорії L наведені рекомендації щодо вибору:

- коефіцієнтів вантажопідйомності k_g ;
- коефіцієнтів матеріалоемності k_{me} та k_{me}^0 (без урахування маси тягових АКБ);
- коефіцієнтів економічної k_{efN} та експлуатаційної k_{ekN} потужності;
- максимальної швидкості руху;
- величини автономного пробігу

Пропонована система модульного проектування маловантажних електромобілів категорій L2e-U, L5e-B, L6e-BU, L7e-CU та N1 забезпечує суттєве зменшення:

- трудових ресурсів на усіх стадіях – проектування, сертифікації, технологічної підготовки та дрібносерійного виробництва типорозмірних рядів модульно-уніфікованих базових шасі та не тільки електромобілів LMD, а й моделей іншого функціонального призначення;

- фінансових ресурсів, оскільки конструкції проєктованих транспортних засобів будуть максимально уніфіковані;

- матеріальних ресурсів завдяки виробництву та експлуатації електромобілів з оптимізованими параметрами для виконання заданих функцій;

- енергоресурсів завдяки мінімізації типажності та збільшенню тиражності складових деталей, необхідних для виробництва маловантажних електромобілів з оптимізованими параметрами їх габаритних розмірів (довжини і ширини) та вантажопідйомності;

- витрати електроенергії тягових АКБ за рахунок прийняття виважених і оптимізованих величин експлуатаційних параметрів проєктованих моделей КТЗ.

Розглянуті напрямки та наведені рекомендації сприятимуть створенню конкурентоспроможних вітчизняних моделей маловантажних електромобілів

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Войтків С. В. (2023). Аналіз процесу створення вітчизняного електромобіля малої вантажопідйомності за результатами виготовлення і випробувань дослідного зразка. Матер. XI Міжнар. наук.-техн. інтер.-конф. "Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту", 13-14 квітня 2023 року: зб. наук. пр. Вінниця: ВНТУ, 8-19. Voytkiv S. V. (2023). Analiz protsesu stvorennia vitchyznianoho elektromobilia maloi vantazhopididomnosti za rezultatamy vyhotovlennia i vyprobuvan doslidnoho zrazka. [Analysis of the process of creating a domestic electric vehicle with a small carrying capacity based on the results of the production and testing of the prototype]. Mater. XI Mizhnar. nauk.-tekhn. inter.-konf. "Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu", 13-14 kvitnia 2023 roku: zb. nauk. pr. Vinnytsia: VNTU, 8-19. [in Ukrainian].
2. Tanase, G. C. (2021). The Increasing Adoption of Electric Vehicles (EVs) in The Last-Mile Delivery Operations. Romanian Distribution Committee Magazine, Romanian Distribution Committee, 12(3), 33-37. Retrieved from: <http://crd-aida.ro/RePEc/rdc/v12i3/3.pdf>.
3. Starczewski, J. (2019). Analysis of Transport Process' Costs with Use Various Technologies in Terms of Last Mile Delivery Problem. Research Methods and Solutions to Current Transport Problems, 401-410. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27687-4_40
4. Kishore, S., Waghmare, R. & Johnvieira, A. (2022). Use Of Electric Vehicles In Last-Mile

- Delivery For B2c: A Step Towards Green Supply Chain. *Journal of Positive School Psychology*, 6 (6), 2439-2447. <https://doi.org/journalppw.com> 2022,
5. Galati, A., Adamashvili, N. & Crescimanno, M. (2023). A feasibility analysis on adopting electric vehicles in the short food supply chain based on GHG emissions and economic costs estimations. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.001>
 6. Siragusa, C., Tumino, A., Mangiaracina, R. & Perego, A. (2022). Electric vehicles performing last-mile delivery in B2C e-commerce: An economic and environmental assessment. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(1), 22-33. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1847367>
 7. Gee, I. M., Faust, K. M. & Webber, M. E. (2021). A framework for determining energy use in rural food delivery services: capturing system interdependencies through an agent-based discrete-event approach. *Environ. Res.: Infrastruct. Sustain*, 1, 14. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac2b10>
 8. Yardjouman, Y., Kumar, T. P., Kiran, S. S., Ajith, L. & Dharmaraju, T. V. (2021). Development of a Last Mile Delivery Electric Vehicle. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 16-27. <https://doi.org/10.46501/GIETAE04>
 9. Andaloro, L., Napoli, G., Micari, F., Agnello, S. S. & Antonucci, G. V. (2015). Development of a new concept electric vehicle for last mile transportation. *World Electric Vehicle Journal*, 7(3), 342-348. <https://doi.org/10.3390/wevj7030342>
 10. Höfer, A., Esl, E., Türk, D. & Hüttinger, V. (2021). Conception and Development of a Last Mile Vehicle for Urban Areas. *Small Electric Vehicles*, 167-177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65843-4_13
 11. Napoli, G., Polimeni, A., Micari, S., Dispenza, G., Antonucci, V. & Andaloro, L. (2021). Freight distribution with electric vehicles: A case study in Sicily. *Delivery van development. Transportation Engineering*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100048>
 12. Sorooshian, S., Sharifabad, S. K., Parsaee, M. & Afshari, A. R. (2022). Toward a Modern Last-Mile Delivery: Consequences and Obstacles of Intelligent Technology. *Applied System Innovation*, 4, 16. <https://doi.org/10.3390/asi5040082>
 13. Moradi, N., Sadati, İ. & Çatay, B. (). Last mile delivery routing problem using autonomous electric vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109552>
 14. Schomakers, E.-M., Klatte, M., Lotz, V., Biermann, H., Kober, F. & Ziefle, M. (2022). Analysis of the potential of a new concept for urban last-mile delivery: Ducktrain. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 14, 10. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100579>
 15. Харченко В. Ф., Козлова О. С. (2019). До питання реального потенціалу підвищення енергоефективності міського електротранспорту. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*, 30 (69), 184-190. Kharchenko V. F., Kozlova O. S. (2019). Do pytannia realnoho potentsialu pidvyshchennia enerhoefektyvnosti miskoho elektrotransportu. [To the question of the real potential of increasing the energy efficiency of city electric transport]. *Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky University, series Technical Sciences*, 30 (69), 184-190. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/32> [in Ukrainian].
 16. Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the council of 15 January 2013 on the approval and market surveillance of two- or three-wheel vehicles and quadricycles. *Official Journal of the European Union*, L60/52.
 17. Войтків С. В. (2023). Огляд і аналіз конструкцій вантажних велоелектромобілів категорії L1e-A. Зб. тез доповідей III-ї Між. наук.-техн. конф. "Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023". Вінниця: ВНТУ, 193-194. Voytkiv S. V. (2023). Ohliad i analiz konstruksii vantazhnykh veloelektromobiliv katehorii L1e-A. [Review and analysis of the constructions of cargo bicycle electric vehicles of category L1e-A.]. *Zb. tez dopovidei III-yi Mizh. nauk.-tekhn. konf. "Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannia ta transportu – 2023"*. Vinnytsia: VNTU, 2023, 193-194. [in Ukrainian].
 18. Біла, І. С., Красман, Н. В. (2018). Розвиток ресурсозбереження в Україні. *Економіка та управління національним господарством*, 21, 53-58. Bila, I. S., Krasman, N. V. (2018). Rozvytok resursozberzhennia v Ukraini. [The development of resource savings in Ukraine]. *Ekonomika ta upravlinnia natsionalnym hospodarstvom*, 21, 53-58. Retrieved from: http://www.market-infr.od.ua/journals/2018/21_2018_ukr/12.pdf [in Ukrainian].

Войтків Станіслав Володимирович¹, к.т.н., генеральний конструктор, voytkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081
¹Науково-технічний центр "Автополіпром", 79066, Україна, м. Львів, вул. Зубрівська, 32/24.

The development directions of light-duty electric vehicle designs in the aspect of resource saving.

Abstract. Problem. Every year, light-duty electric vehicles are used more and more for the delivery of various industrial goods, food products, and postal items to end consumers, in particular, on the orders of individuals. Such electric vehicles are called last-

mile delivery vehicles. According to the main design and operational parameters, they belong to two categories – to three- or four-wheeled motor vehicles of category L and four-wheeled category N1. Today, light-duty electric vehicles with very different load capacities (from 50 kg to 800 kg) and autonomous mileage (from 30 km to more than 150 km) are manufactured and operated. It is clear that their operational characteristics are so different that their adequate comparison of different models is very often practically meaningless. And the selection of the values of the main technical and operational parameters at the stage of developing sketch proposals according to different structural schemes and on the basis of different aggregate base causes significant problems. **Goal.** The determination of the directions of development of the domestic field of design and production of promising competitive models of light-duty electric vehicles, taking into account modern problems of resource conservation, and development of recommendations regarding the selection of the values of their main technical and operational parameters and characteristic relative indicators. **Methodology.** The methods of conducting analytical studies and expert evaluation of existing systems of modular unification of structures of light-duty electric vehicles are used to classify low-capacity electric vehicles by their carrying capacity and establish their defining technical and operational parameters. **Results.** On the basis of analytical studies, the classification of light-duty

electric vehicles by load capacity was developed and the determination, taking into account the developed classification, of the recommended values of their defining technical and operational parameters. On the basis of expert assessment of existing systems of modular unification of structures of light-duty electric vehicles, the concept of their modular design system was developed. **Originality.** The relative indicators of the technical excellence of light-duty electric vehicles are proposed, the concept of a modular design system of standard-sized series of maximum-unified basic chassis of such vehicles is developed. **Practical value.** The proposed classification of small-capacity electric vehicles by cargo capacity greatly facilitates the selection of their relative evaluation indicators and operational parameters at the stage of developing draft proposals for the creation of promising and competitive models for the organization.

Key words: light-duty electric vehicle; electric vehicles of category L and N1; specific power; modular design; classification of light-duty electric vehicles; optimized parameters of electric vehicles.

Voytkiv Stanislav¹, 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.

Application of logical methods in expert analysis of automotive engine failures in operation

Khrulev A. E.¹, Saraiev O. V.², Saraieva I. Y.²

¹International Motor Bureau

²Kharkov National Automobile and Highway University

Abstract: Problem. It is known that the causes of failures in automotive engines can be determined based on existing experience in studying various engine malfunctions. However, an analysis of known methods for determining the causes of car engine failures shows that their use in practice, including in diagnosing the technical condition of engines, requires a lot of work and highly qualified personnel that in many cases is practically ineffective. Logical-probabilistic methods are also known, including those based on fault tree analysis. However, it is not possible to use such models and methods in searching for the causes of engine failure. **Goal.** The purpose of the study is to create a methodology for determining the causes of faults and failures in engine operation, which can be applied with help of a logical way and applicable not only by the specialists with expert level, but also the wide qualification. **Methodology.** The solution to this problem was found in several stages. Initially, by structuring the symptoms, a fault tree was constructed that logically describes the cause-and-effect relationships between the failure event and the original damage that caused it. Data from expert studies of engine failures were used to construct the graph. This was done for each of the engine failure types selected for analysis. Next, a modified (inverted) fault tree was developed for a finite number of selected failure types. **Results.** Obtained logical graphs allow you to perform a simple logical analysis in the opposite direction from the generally accepted one, from the event of a system failure to the basic damage events that cause it. After obtaining logical graphs for each type of failure, a modified engine fault tree can be compiled, common to the considered types of failures. **Originality.** The proposed method was widely used previously in the study of reliability of various technical systems, however, this method for the first time has been proposed to determine the causes of engine failures. **Practical value.** As a result of using the proposed methodology in practice, it became possible to determine the causes of failure in the engine with enough reliability for practice and minimal time expenditure.

Keywords: internal combustion engine, fault, failure, logical method, fault tree analysis.

Introduction

A large amount of scientific research, design work and technological advances have significantly improved the reliability and durability of automobile engines [1]. Despite this, the high technical level of new engines does not guarantee the absence of further operational failures. [1]. At the same time, effective troubleshooting requires correct identification of the causes of such failures [2]. However, known diagnostic methods do not always fully meet the needs of practice.

It is the problem of correctly identifying the causes of failures that repair organizations and vehicle operators often face [3]. This problem is

due to the fact that in practice there are often no simple and reliable methods for determining the causes of failures that provide the accuracy and reliability necessary for practical problems [4].

Typically, difficulties in creating such techniques are caused by the difficulty or even impossibility, in contrast to process research and engine design, of formalizing damage processes. It is also difficult to identify patterns suitable for creating universal and simple algorithms in order to further describe them with simple formulas. In addition, differences in engine design require the collection and processing of large volumes of statistical data on the nature and characteristics of failures and destruction of specific engines.

As a result, the correct determination of the causes of engine faults in practice is most often only possible by a specialist with significant expert experience in investigating the failures [2, 4]. In other cases, the operator risks making a mistake, causing a second failure and doubling or sometimes tripling the costs for repairing the vehicle engine. Thus, there is every reason to assert that despite the serious efforts and successes achieved in engine research and design, to date, reliable methods for determining the causes of engine failures have not been created.

Analysis of the latest research and publications

In general, there are three main groups of methods and techniques that allow us to determine the causes of malfunctions and failures of automobile internal combustion engines in operation.

The first group consists of troubleshooting tables of various kinds and details, in which the main symptoms of faulty operation and their corresponding causes are stated [3, 5]. This is supposed to help the consumer with troubleshooting.

However, such a simple presentation, for all its accessibility and seems to be understandable even for untrained operators – vehicle owners, drivers and operators, has a rather low practical value. Moreover, in many real-life cases, the tables make it difficult to determine the real causes. This is due to the ambiguity of the indicated causes of failures, when tables usually give dozens of possible causes if the symptoms are similar. Moreover, the more detailed the table is, the more causes it gives [4]. As a result, using tables in practice is so labour-intensive that it is virtually ineffective. As a result, consumers in operation, as a rule, find it difficult to determine the cause of engine failures using this method.

The second group of techniques combines fault reference books [6, 7]. In general, these are the same tables, but illustrated with photographs of damaged parts and provided with a detailed description of the damage itself and its causes. Despite the more solid appearance, this method suffers from the same problems of ambiguity. For example, to find the real cause of failure, it is generally necessary to perform dozens of tests of different versions.

What both methods have in common is that, in fact, they require not just technical knowledge, but special training and expert experience, which prevents their use in practice. An untrained operator or service worker will most likely not be able

to find a failure cause by using reference books. A highly qualified specialist, in contrast, is quite capable of finding a fault without tables or reference books, relying just on his knowledge and experience. In addition, since tables and fault reference books are compiled primarily by component manufacturers, it is almost impossible to find descriptions of manufacturing defects in them. This is quite logical, since the indication of a defect in the manufacturer's technical literature is perceived by the average consumer as an admission by the manufacturer of its own fault. However, on the other hand, the absence in a reference book or table of any mention of production causes of failures immediately makes this information incomplete and not entirely reliable.

The third group combines methods for diagnosing the technical condition of internal combustion engines [8, 9]. In general, these are long-standing and well-developed scientific methods that make it possible to identify various faults by measuring certain parameters and their corresponding mathematical processing. Some diagnostic techniques are used as basic algorithms in a number of diagnostic devices (for example, in motor testers [10]). This really helps to detect various deviations in engine operation and even find the causes of individual malfunctions.

However, not all diagnostic techniques are in demand in practice, where their use is limited, on the one hand, by the need to have special knowledge and serious training. For example, one can hardly expect a service mechanic to have fundamental scientific knowledge and the ability to apply scientific methods when repairing an engine. On the other hand, diagnostic equipment usually has a high cost. Moreover, the diagnostic methods are often poorly applicable to many types of engine damage and failures, especially in mechanical parts of the engines that usually are not detected by diagnostics at all.

Purpose and statement of the study

The purpose of the study is to create a methodology for determining the causes of faults and failures in engine operation, which can be applied with help of a logical way and applicable not only by the specialists with expert level, but also the wide qualification. To achieve this goal, it is necessary to do the following tasks:

– based on the logical-probabilistic method of fault tree analysis, we develop a general principle and methodology for determining the causes of a unit failure as an integral part of the engine;

– using the data obtained, we develop a methodology for determining the causes of specific types of engine failures.

General principle and methodology for determining the causes of a unit failure as an integral part of the engine

A logical-probabilistic method of fault tree analysis (FTA) [11] was widely used previously in the study of reliability of various technical systems [12, 13]; however, this method for the first time has been proposed to determine the causes of engine failures.

At the preliminary stage of the study, the main provisions of the proposed methodology were formulated, a general approach was chosen, and a logical algorithm was drawn up. An internal combustion engine unit, a supercharging turbocharger, was chosen as an object for preliminary research, on which the proposed methodology was tested with the aim of further extending its application to the entire engine as a whole.

To solve the problem, the fault tree analysis method was used [14]. As is known, a fault tree (Fault Tree Analysis – FTA) is a multi-level graphological structure (graph) of causal relationships in the system (Fig. 1). Fault tree analysis is a common method for modeling the reliability of complex technical systems. It is usually done at the design stage [11].

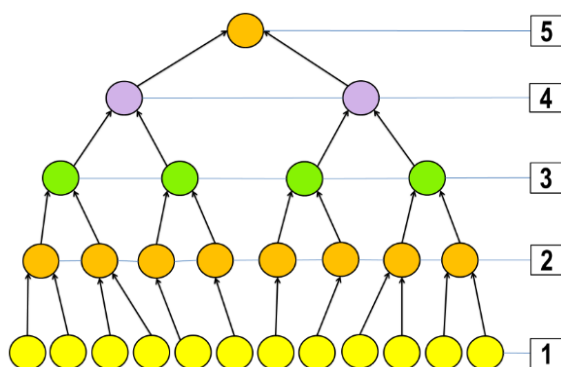


Fig. 1. Fault tree diagram: possible impacts (1) on the system cause damage (2), which leads to failure of elements (3), then components (4) and the entire system as a whole (5)

Fault tree analysis is a common method for modeling the reliability of complex technical systems. This is usually done at the design stage [11], when it is easy to calculate probabilistic reliability characteristics (for example, probability of failure, time between failures, etc.). In this

case, the analysis itself is done in the direction from cause to effect.

The fault tree of the unit in question was compiled using several successive approximations [14]:

- structuring the research object by dividing it into separate units and combining them into a block diagram (Fig. 2);

- identification of possible sources, causes and signs of faults in a given object;

- detailing and structuring of signs and causes of failures for selected blocks (units) of the object with their detailed description;

- drawing up a direct failure tree of an object for one selected cause of failure;

- expansion of the direct fault tree to other causes of object failures;

- modification of the direct fault tree in order to simplify the logical diagram and its analysis, including the assumption of a logical connection of the event in question with several previous events;

- reverse of the direct fault tree of the object in order to bring it to a form which makes it possible to use the logical way of searching for the cause of the failure.

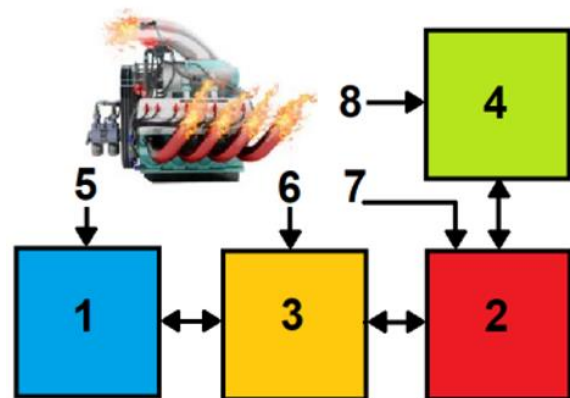


Fig. 2. Turbocharger block diagram: 1 – compressor, 2 – turbine, 3 – bearing assembly, 4 – control system; external influences on the turbocharger (from the internal combustion engine), including: 5 – engine intake system, 6 – oil system and engine crankcase, 7 – engine cylinders and exhaust manifold, 8 – engine control system

Then it is possible to make a logical diagram in the form of a modified inverse (inverted) fault tree. It clearly highlights not only the intermediate states of components and elements, but also describes in detail the signs by which the driver and/or service mechanic usually determine the failure (Fig. 3). Then the cause of the failure can

be easily determined simply by following the logical diagram.

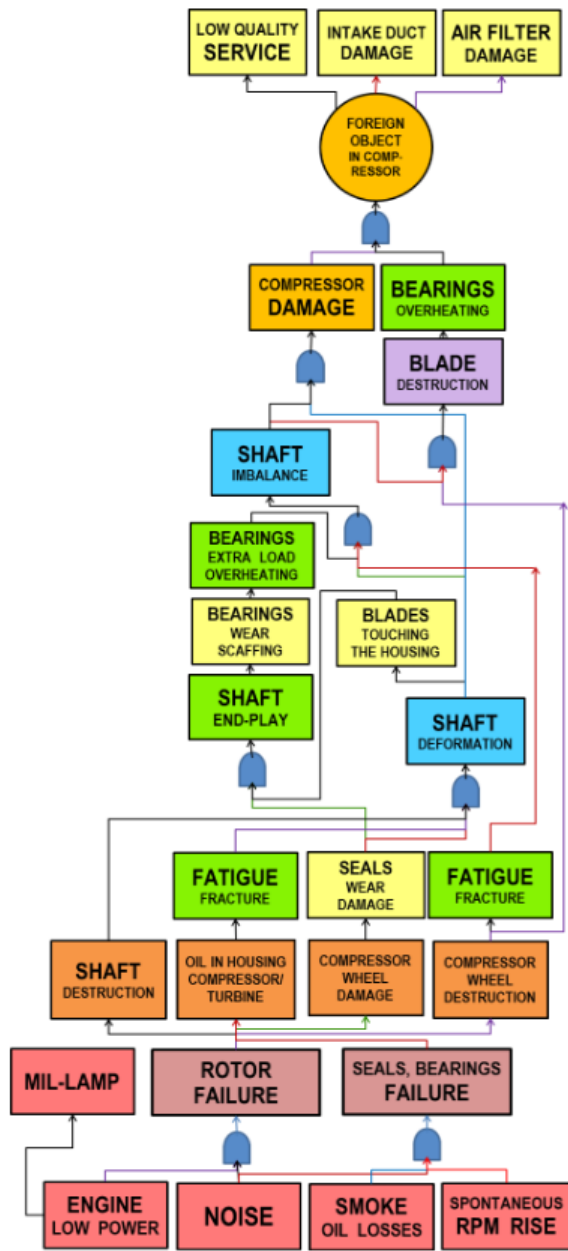


Fig. 3. General view of modified reversed fault tree of one failure (a foreign object entering a turbocharger [14])

However, it is not possible to directly transfer and extend the results obtained in [14] to the entire engine as a whole. The reason is that in a turbocharger the number of components and parts is small, and they are all closely interconnected. For example, the rotor rotates at very high speed, when even a slight breaking of the operating mode of one element not only develops quickly over time, but also causes a large scale of damage to many parts [14, 15].

As practice shows [2-4], in internal combustion engines there is no such global relationship between components and parts. On the contrary, in the operation of automotive engines, failures are more often caused by local damage to individual mating parts, which often occurs without the damage spreading to many other elements, components, cylinders, etc. In accordance with this, the structuring method, which used when studying one unit, may turn out to be ineffective for the entire engine as a whole.

Indeed, structuring and dividing the entire engine, including multi-cylinder ones, into separate units is not a new method. It is quite common in various studies using fault tree analysis to calculate reliability characteristics [12, 13]. However, if the problem of finding the cause of failure is solved, then it is formulated not as a search for a universal formula or calculation of the probability of failure, but as determining the cause of a failure that has already occurred. In this case, structuring the object does not give anything, and work should be begun by identifying possible sources, causes and signs of faults for the given object as a whole. It means it's about structuring the failure event, not the object.

In addition, when developing a logical graph of an engine fault tree, it is advisable to accept a limitation on the number of failure modes under consideration. Indeed, it seems unjustified to overextend the fault tree to cover many or all possible faults, since such work is extremely complex and hardly meaningful. In this study, the range of considered types of engine failures was limited, on the one hand, to the most serious ones, which cause so-called severe damage associated with breakage of the synchronization of the reciprocating and rotational motion of the parts. On the other hand, common failures that were caused by engine oil degradation were also considered.

The causes and symptoms of the failures in question include, but are not limited to:

- destruction of the connecting rod after a hydraulic lock due to various liquids entering the cylinder;
- valve destruction due to various manufacturing or repair defects;
- destruction of the crankshaft and connecting rod bearings due to lubrication failure;
- breakage of axial fixation and destruction of the piston pin due to manufacturing or repair defects;
- abrasive wear by abrasive particles supplied with air;
- temperature damage due to cooling failure.

From the data obtained at [14] it follows that to compile a fault tree of such a complex object as an internal combustion engine, the most important, is the division (structuring) of features into three groups. These are the main signs, confirming (main) signs and clarifying (type and location of the damaging effect) ones. In this case, it is possible to present a simple logical graph with the direction of analysis from the initial damage to the engine entire failure for each of the failures considered, Fig. 4.

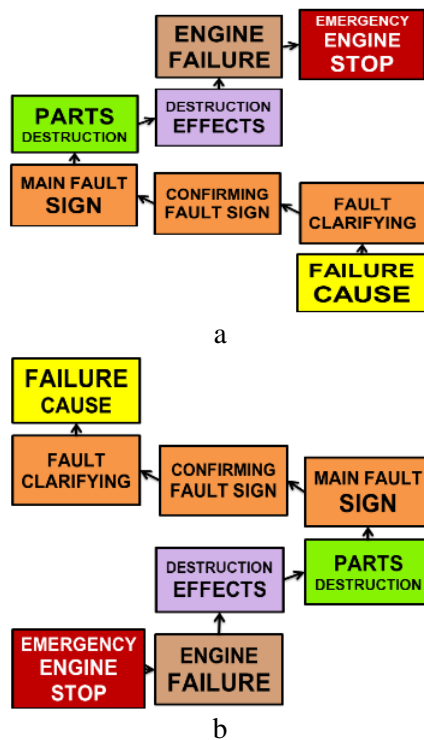


Fig. 4. Direct (a) and reverse (b) logical diagrams (direction of analysis – bottom-up), describing data on a separately identified failure from amongst those given in [16]

Based on such a logical scheme, it is not difficult to create a detailed graph for each failure considered.

Methodology for determining the causes of specific types of engine failures

In Fig. 5, it shows a modified and inverse graph for a failure caused by a hydraulic lock in one of engine cylinders from the ingress of water, oil, fuel or coolant [14].

In accordance with this, it is necessary to first construct a modified graph. Such a graph is direct and does not allow searching for the cause of the failure (Fig. 5). However, if the straight graph is inverted (reversed), the logic diagram allows to

do the analysis in the direction from the failure event to its cause (Fig. 6).

Similarly, logical fault tree diagrams can be developed for other reasons under consideration [4, 16, 17, 18], including destruction of the bearing and connecting rod due to lubrication failure (Fig. 7), valve destruction [14], abrasive wear and temperature damage. Using data from [4, 14], it is also possible to compile an engine fault tree for cases associated with the piston pin, including its destruction and axial fixation breaking.

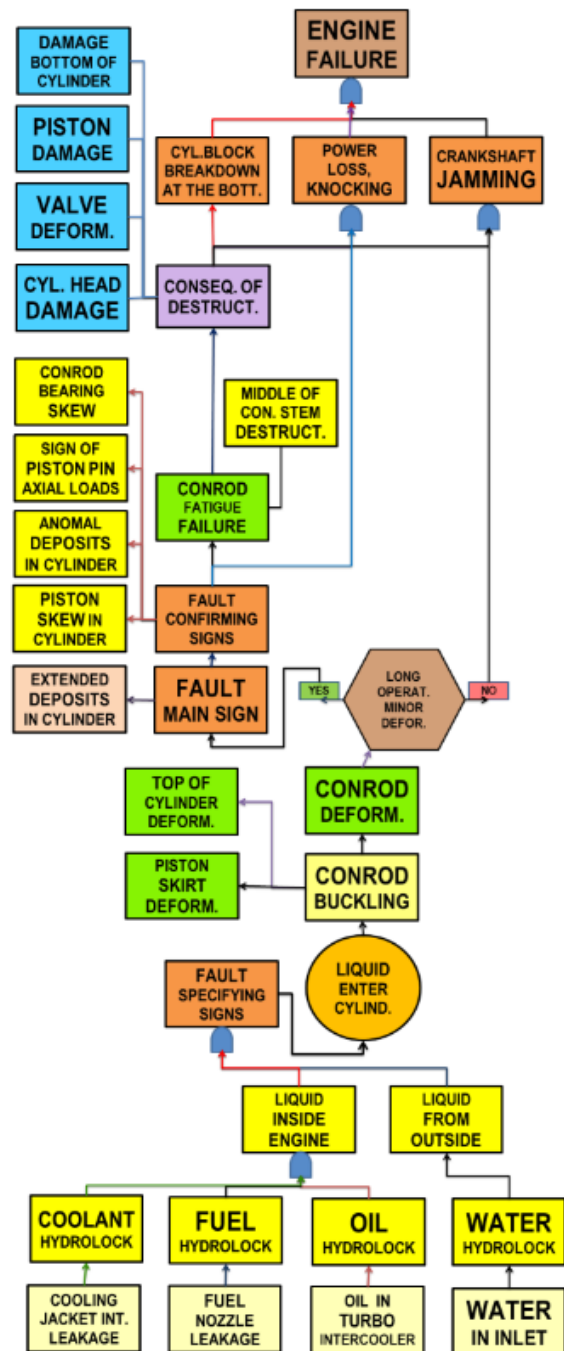


Fig. 5. General view of the direct modified engine failure tree during hydraulic lock

If we consider in detail all the signs of all the listed types of failures, then, on the one hand, we can find some similarities in the consequences of these failures (Fig. 8). However, a detailed analysis of both the symptoms and the logical structure of each type of failure (except for failures associated with the piston pin) does not allow us to identify common or similar branches of the failure tree.

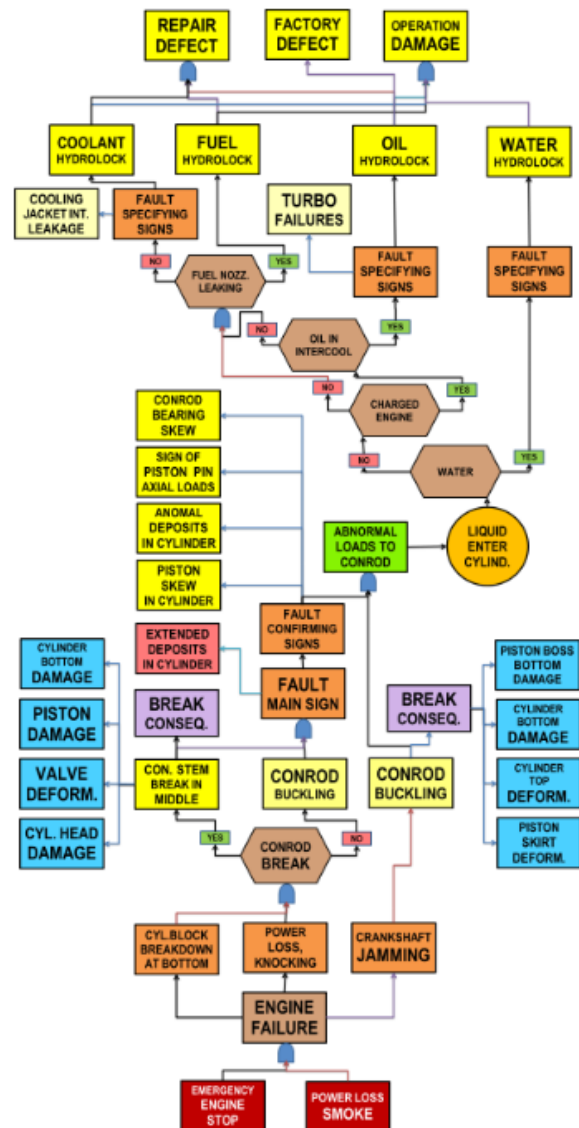


Fig. 6. General view of the reversed modified engine failure tree during hydraulic lock

Indeed, by compiling a fault tree separately for all considered types of failures, you can reduce them into one logical diagram. The results (Fig. 6 and 7) show that the resulting graphs are noticeably different in structure from the similar one built for a separate engine unit [11]. This is explained by the above-mentioned difference between an engine and a turbocharger, where, due to the high rotor speed, failures, as a rule, result

in more general damage. This feature is associated with the local nature of engine failures noted above, when the damage is localized, for example, in a damaged cylinder and does not extend to most engine parts.

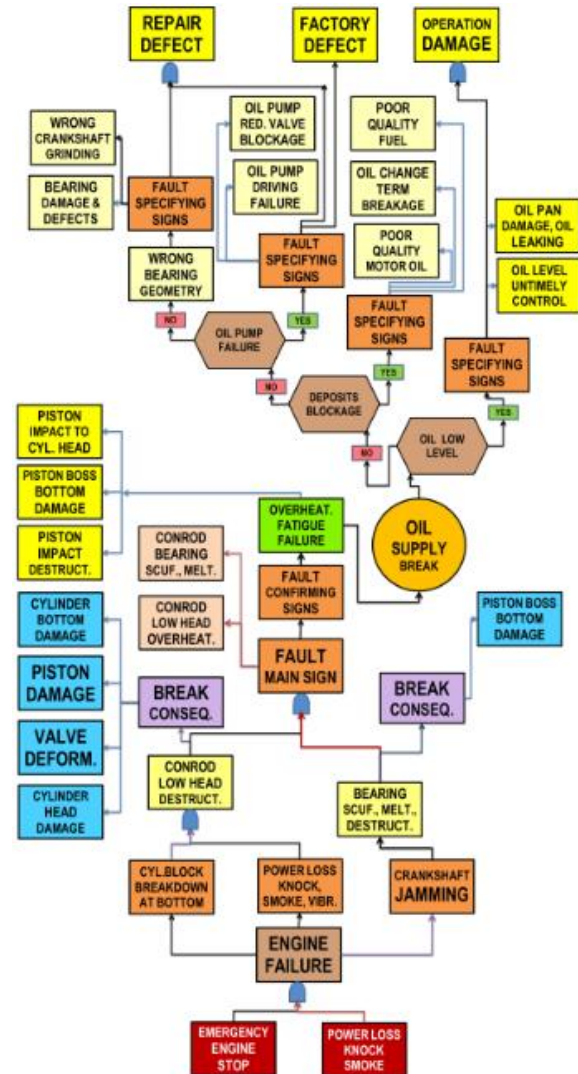


Fig. 7. General view of the modified reversed fault tree when the bearing fails

The result obtained in the form of a logical graph (Figs. 6 and 7) clarifies and details the data [16] on the causes, signs and consequences of severe damage, associated mainly with breaking of the synchronization of progressively moving and rotating parts. In addition, this method is applicable for other tasks related to engine failures, for example, due to oil degradation [16]. In this case, unlike the severe damage considered, there can be no significant damage to the engine, and external signs usually indicate changes in oil properties. However, determining the reasons for such changes is no less difficult than in the case of sig-

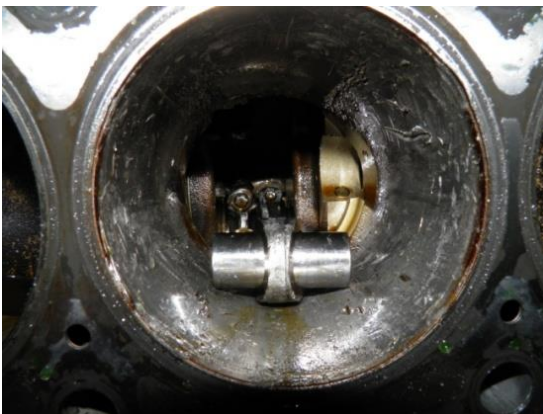
nificant damage to the engine due to other reasons [14].



a



b



c

Fig. 7. Similar consequences of severe engine damage caused by failures due to disruption of the synchronization of the reciprocating motion of the parts [4, 16]: a) piston and conrod destruction due to insufficient oil supply to the conrod bearing, b) destruction of the conrod and piston after hydrolock, c) destruction of the piston after valve destruction

Thus, to determine the cause of failure in the case of severe damage, instead of a troubleshooting table, you can use a logical search algorithm

by moving along the graph from the failure event upward towards the cause of failure.

Moreover, testing [11] showed that the apparent bulkiness of the graph is not a problem for its use in practice. Structuring the fault signs using logic easily leads to the desired group of causes. Next, all that remains is to identify clarifying signs in order to accurately determine the cause of failure.

Conclusions

Based on the results of the study, it was determined that despite the successes in the development of methods for diagnosing the technical condition of automotive internal combustion engines, using such methods to find the causes of failures is actually ineffective. To assess the reliability characteristics and risks of failure of technical systems, logical and probabilistic models are also used, including the method of fault tree analysis, but they do not correspond to the task of finding the causes of failures. The lack of necessary techniques leads to incorrect determination of the cause, repetition of failures and unreasonably high operating costs for repeated repairs.

Determining the causes of engine failures can be done by logical analysis in the opposite direction to that generally accepted when drawing up a fault tree. For this purpose, it is necessary to create a modified inverted fault tree. As a result, a logical method for determining the cause of a failure allows us not only to eliminate gross errors when investigating the causes, but also to do this with minimal time.

Further research in the development of methods for determining the causes of failures using logical methods can be aimed at developing the structure of logical graphs to cover a wider range of possible faults and failures.

Acknowledgments

We would like to express our gratitude to the Center for Machining «AB-Engineering», Odesa, and personal of the International Motor Bureau, Nemeshayevo, Kyiv region, Ukraine, for technical support, including for the provision of expert research materials, workplaces, samples of engines, units, as well as for assistance in their disassembly and examination.

Conflicts of interest

The author declares that he has no conflicts of interest in relation to the current study, including financial, personal, authorship, or any other, that

could affect the study and the results reported in this paper.

References

1. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (2004). Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives. Warrendale, SAE International. 812.
2. Greuter, E., Zima, S. (2012). Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. Warrendale, SAE International. 582.
3. A1 Automotive Engine Repair (2013). Motor Age Training Self-Study Guide for ASE Certification. Training Age Motor. Boston: Advanstar. 48.
4. Khrulev, A. (2023). Internal combustion engines: Fault expertise and analysis. Monograph in 2 vol. V.2. Practical determination of fault causes. Chisinau: LAP LAMBERT Academic Publishing. 562. ISBN: 978-620-6-15367-2.
5. Halderman, J. (2012). Automotive Technology. Principles, Diagnosis and Service. New Jersey: Pearson Education, Inc. 1664.
6. Engine components and filters (2015). Defects, their causes and prevention. Technical information. Mahle GmbH. 75. Available at: www.mahle-aftermarket.com (accessed 20.07.2023).
7. Piston damage (2014). Recognizing and rectifying. Neckarsulm, MSI Motor Service International GmbH, 103.
8. Varbanets, R.A., Fomin, A., Pišteck, V., Klymenko, V., Minchev, D., et al. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. Journal of Marine Science and Engineering, 9(3). 321. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>.
9. Maurya, R.K. (2019). Reciprocating Engine Combustion Diagnostics. In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis. Mechanical Engineering Series. Cham, Springer Nature Switzerland. 616.
10. Isermann, R. (2017). Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components. Berlin, Springer-Verlag GmbH. 303.
11. Khrulev, A., Dmitriev, S. (2019). ICE Turbochargers Failures and Some Features of the Study of Their Causes Using the Fault Tree Analysis. The 18th Israeli Symposium on jet engines and gas turbines. Technion, Haifa, November 28, 27-28.
12. Aircraft Reciprocating-Engine Failure (2007). An Analysis of Failure in a Complex Engineered System, ATSB Transport Safety Investigation Report, Aviation Safety Research and Analysis Report B2007/0191, Canberra City, Australian Transport Safety Bureau. 255.
13. Laskowski, R. (2015). Fault Tree Analysis as a tool for modeling the marine main engine reliability structure. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, No.41 (113), 71-77.
14. Khrulev, A. (2023). Principles of development and practical application of logical methods in tasks of searching for the failure causes in internal combustion engines. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference "Scientists and existing problems of human development" (November 14-17, 2023) Zagreb, Croatia, International Science Group, 359-363. Available at: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2023/11/SCIENTISTS-AND-EXISTING-PROBLEMS-OF-HUMAN-DEVELOPMENT.pdf> (accessed 20.07.2023).
15. Miller, J. (2015). Turbocharger Failure Analysis: What Went Wrong and How to Fix It. MUSCLE CAR DIY. Available at: <https://www.musclecardiy.com/performance/turbocharger-failure-analysis-went-wrong-fix/> (accessed 20.07.2023).
16. Saraev, O.V., Khrulev, A.E. (2021). Failure mechanisms caused by motor oil degradation and their study as part of expertise of technical condition of gasoline car engines. The National Transport University Bulletin: A Scientific and Technical Journal. Vol. 1 (48), 302-314. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-302-314>.
17. Dmitriev, S., Khrulev, A. (2019). Study of the conrod deformation during piston interaction with liquid in the internal combustion engine cylinder. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. Volume 14. Issue 2, 6557-6569. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.14.2.2020.03.0515>.
18. Khrulev, O., Saraiev, O., Saraieva, I. (2021). The influence of central forces on crankshaft bearing lubrication is in emergency modes of the engine of the car. Journal of Mechanical Engineering and Transport. Vol. 12. Iss. 2, 112-121. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-12-2-112-121>.

Khrulev Alexander¹, Ph.D., Senior Researcher, forensic expert on specialty 10.2 "Study of the vehicles technical condition", info@engine-expert.com, tel. +38 096 163 2183, ORCID: 0000-0002-6841-9225.

Saraiev Olexii², Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobile, sarayev9@gmail.com, tel. +38 050 275 5159 ORCID: 0000-0001-6582-560X

Saraieva Iryna², Ph. D. (Eng.), Associate Professor, e-mail: sarayeva9@gmail.com ORCID: 0000-0002-7720-471X.

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

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Застосування логічних методів під час експертного аналізу відмов автомобільних двигунів в експлуатації

Анотація. Постановка проблеми. Відомо, що причини відмов двигунів внутрішнього згоряння можна визначити на основі досвіду дослідження різних несправностей двигунів. Однак аналіз відомих методів визначення причин відмов двигунів автомобілів показує, що їх використання на практиці, у тому числі при діагностиці технічного стану двигунів, потребує великої праці та високої кваліфікації персоналу, що у багатьох випадках практично неефективне. Відомі також логіко-імовірнісні методи, у тому числі засновані на аналізі дерева відмов. Однак використовувати такі моделі та методи для пошуку причин відмови двигуна неможливо. **Мета дослідження** – розробити логічну методіку визначення причин несправностей та відмов двигунів в експлуатації, що застосовується не тільки для фахівців експертного рівня, а й для фахівців середньої кваліфікації. **Методика.** Розв'язання цієї проблеми було знайдено у кілька етапів. Спочатку шляхом структурування симптомів було побудовано дерево несправностей, що логічно описує причинно-наслідкові зв'язки між подією відмови та первісною шкодою, що її викликала. Для побудови графа використано дані експертних досліджень відмов двигунів. Це було зроблено для агрегата двигуна – турбокомпресора, а також для кожного з типів відмов двигуна, вибраних для аналізу. Далі було розроблено модифіковане (інвертоване) дерево відмов для кінцевого числа вибраних типів відмов. **Результати.** Отримані логічні графи дозволяють виконати простий логічний аналіз у напрямку, протилежному до загальноприйнятого – від події збою системи до

базових подій, що ініціює збій. Після отримання логічних графів для кожного виду відмов можна скласти модифіковане дерево несправностей двигуна, загальне для видів відмов, що розглядаються. **Наукова новизна.**

Запропонований метод широко використовувався раніше для дослідження надійності різних технічних систем, проте вперше цей метод запропоновано визначення причин відмов двигунів.

Практична значущість. В результаті застосування запропонованої методіки на практиці стало можливим визначати причини відмови двигуна з достатньою достовірністю та мінімальними часовими витратами.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, несправність, відмова, логічний метод, аналіз дерева відмов.

Хрулев Олександр Едуардович¹, к.т.н., с.н.с., судовий експерт за фахом 10.2 «Дослідження технічного стану транспортних засобів», info@engine-expert.com, тел. +380961632183, ORCID: 0000-0002-6841-9225.

Сараєв Олексій Вікторович², д.т.н., проф. каф. автомобілів, тел. +38 050 275 5159, e-mail: sarayev9@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6582-560X

Сараєва Ірина Юрїївна², к.т.н., доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів, тел. +38 050 6400787, e-mail: sarayeva9@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7720-471X.

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

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Аналіз та вплив принципів роботи систем активної безпеки автомобіля на безпеку руху

Товстокорий М. Ю.¹, Гнатов А. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Аналіз спрямований на вивчення та оцінку методів і технологій, які здатні підвищити рівень активної безпеки автомобіля. В роботі розглянуті сучасні системи та інновації, такі як антиблокувальна система гальм, система адаптивного круїз-контролю, система контролю тиску в шинах. Ціль дослідження полягає у визначенні ефективності цих систем для підвищення безпеки на дорогах та виявлення потенційних шляхів їх вдосконалення.

Ключові слова: активна безпека; системи активної безпеки; антиблокувальна система; система адаптивного круїз-контролю; система контролю тиску в шинах.

Вступ

В сучасному світі, коли на дорогах спостерігається зростаюче число дорожньо-транспортних пригод, питання активної безпеки стає дуже актуальним. Безпека на дорозі залишається одним з ключових викликів для суспільства, тому автовиробники зобов'язані працювати не лише над зовнішнім виглядом і продуктивністю автомобіля, а також пильно відстежувати питання безпеки на дорогах.

Перші системи активної безпеки походять ще з минулого століття з плином часу технології розвивались і на сьогодні майже всі авто оснащені такими системами. Але навіть найдосконаліші системи не завжди працюють ідеально. Існують випадки некоректної роботи, які ставлять під питання ефективність існуючих технологій. Це сприяє пошуку нових шляхів удосконалення систем активної безпеки та забезпеченню більш надійного захисту на дорогах.

Аналіз публікацій

Дослідження принципів роботи сучасних систем активної безпеки має велику кількість робіт, наприклад, у статті [2] проаналізовано основні системи допомоги водію, які існують у автомобілі, також були приведені основні можливості систем пасивної безпеки, які можуть поліпшити безпеку пасажирів та пішоходів. У статтях [8-15] приведено аналіз ро-

боти системи адаптивного круїз-контролю, систем активної безпеки та способи і методи діагностування сучасних автотранспортних засобів. Адаптивний круїз-контроль – це велика система, яка складається з багатьох підсистем та датчиків. З її допомогою автомобіль може підтримувати встановлену водієм швидкість та підлаштовувати її до інших транспортних засобів. Ця система важлива, тому що може забезпечити безпечну відстань між автомобілями, самостійно знизити та збільшити швидкість, чим забезпечує більш комфортне та безпечне пересування. Також було розглянуто питання інтелектуалізації системи адаптивного круїз-контролю на основі штучних нейронних мереж. Що показало, що за допомогою штучних нейронних мереж можливо навчитися прогнозувати поведінку інших транспортних засобів та приймати більш зважені та вірні рішення щодо обставин на дорозі.

В роботі [16] розглянуто принцип роботи системи курсової стійкості, система дозволяє утримувати автомобіль у межах заданої траєкторії при різноманітних режимах руху. Представлено системи управління тиском повітря в шинах транспортних засобів та їх конструктивні та функціональні особливості, що показало, що ці системи є ефективним засобом підвищення безпеки та ефективності транспортних засобів і повинні встановлюватися на всі сучасні автомобілі.

У статті [17] авторами було розглянуто

інноваційні технології забезпечення активної безпеки транспортних засобів. На основі цієї роботи можна зробити висновок, що інноваційні технології забезпечення активної безпеки транспортних засобів є ефективним засобом зниження дорожньо-транспортних пригод та тяжкості їх наслідків. Також впровадження таких технологій потребує розробки нових законодавчих норм які б зобов'язували виробників обладнувати свої автомобілі такими технологіями. Також у аналізі [18] авторами приведені сучасні засоби активної безпеки автомобіля, які дозволяють попередити водія про потенційну небезпеку, що може дозволити вчасно прийняти рішення про її уникнення, запобігти зіткненню, гарантувати безпеку пасажирів та пішоходів у разі зіткнення. В роботі [19] показано принцип роботи системи ABS, це система активної безпеки, що запобігає блокуванню коліс транспортного засобу при гальмуванні. Можна зробити висновок, що з використанням цієї системи гальмівний шлях автомобіля скорочується на 15-20% у порівнянні з автомобілем в якому не використовується ця система. Отже система ABS є одним із найефективніших засобів підвищення безпеки автомобіля при гальмуванні.

Автори роботи [21] представили систематичний огляд наукової літератури з активної безпеки для двоколісних транспортних засобів. В роботі перераховано всі системи активної безпеки що розробляються на цей час та виявлено прогалини в знаннях і визначені перспективні напрямки досліджень, які потребують подальшого розгляду та вдосконалення. Основним висновком дослідження є те, що доволі перспективним є комбінований вплив різних систем безпеки, який можна використати для підвищення ефективності та максимізації впливу нових технологій на безпеку автомобільного транспорту.

В роботі [22] дослідники ставлять за мету надати огляд поточного стану та майбутніх перспектив розумних автомобілів, беручи до уваги технологічні, транспортні та соціальні особливості. У статті проведено аналіз підходів до створення розумного універсального автомобіля, можливих змін, які можуть відбутися в найближчі десятиліття, характеристик 5G, ADAS (передові системи допомоги водієві) та джерел живлення. Автори цієї роботи бачать автомобіль, як складову IoT-технологій, який має всі наявні системи безпеки та які здатні автоматично налаштувати-

тися входячи до комплексу «розумного міста».

У статтях [1-7] приведено дослідження та зміст датчиків тиску в автомобілі. Це важлива складова системи активної безпеки, так як правильний тиск в шинах підвищує керованість автомобіля та знижує знос шин, а також допомагає запобігти аваріям через недостатній тиск в шинах.

В роботі [20] автори дослідили питання принципу роботи ПД регулятора, результати досліджень показали, що ПД регулятор може забезпечити високу точність керування об'єктом в широкому спектрі умов. Отже можна зробити висновок, що ПД регулятор є одним із найбільш ефективних типів регуляторів та може використовуватися для різних задач, а саме в системах активної безпеки автомобіля.

Отже, проведений аналіз показав, що тематика активної безпеки на автотранспорті є актуальною та потребує подальшого розгляду та вдосконалення.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є аналіз існуючих систем активної безпеки автомобіля, виявлення їх недоліків та дослідження можливості підвищення рівня активної безпеки транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити будову систем активної безпеки автомобіля;
- провести аналіз складових активної безпеки автомобіля;
- дослідити алгоритми роботи активної безпеки автомобіля;
- визначити основні переваги та недоліки систем активної безпеки автомобіля;
- визначити принцип роботи датчиків та систем активної безпеки автомобіля.

Антиблокувальна система (ABS)

Антиблокувальна система використовується при різкому гальмуванні для того щоб запобігти блокуванню колеса. Це досягається за рахунок контролю ковзання колеса, також необхідна підтримка коефіцієнта тертя до відповідного оптимального значення. Пробукування колеса визначається як відносний рух між колесом і дорожнім покриттям під час руху автомобіля. Ковзання виникає коли кут швидкості колеса вища або нижча

швидкості вільного руху колеса. Сили, які діють на автомобіль що рухається прямолінійно при гальмуванні зображено на рис. 1.

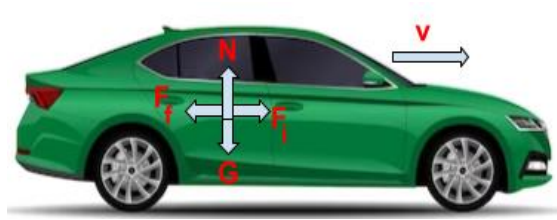


Рис. 1. Сили, що діють на транспортний засіб під час гальмування [13]

Можна записати рівняння рівноваги для горизонтального і вертикального напрямків:

$$\begin{cases} F_i = F_f = \mu \cdot N; \\ N = G = m_v \cdot g, \end{cases} \quad (1)$$

де F_f – сила тертя між колесом і поверхнею; F_i – інерційна сила транспортного засобу; G – сила тяжіння; μ – коефіцієнт тертя між колесом і поверхнею; m_v – вага транспортного засобу; g – прискорення.

Силу інерції можливо виразити за другим законом Ньютона:

$$F_i = m_v \cdot a_v = m_v \cdot \frac{dv_v}{dt}, \quad (2)$$

де a_v – прискорення транспортного засобу; v_v – лінійна швидкість транспортного засобу.

З наведених вище співвідношень виходить наступний вираз прискорення автомобіля. Лінійну швидкість транспортного засобу можна додатково отримати шляхом інтегрування:

$$\frac{dv_v}{dt} = \frac{1}{m_v} \cdot (\mu \cdot m_v \cdot g). \quad (3)$$

Водій за допомогою гальмівної системи прикладає гальмівний момент до коліс. Сила тертя між колесами та дорожнім покриттям, також враховуючи радіус колеса створює резистивний момент. Для спрощення вважається, що колесо не додає додаткового крутного моменту.

Рівняння рівноваги для колеса:

$$C_b - F_f \cdot r_r - J_r \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = 0, \quad (4)$$

де C_b – гальмівний момент, прикладений до колеса; F_f – сила тертя між колесом і поверхнею дороги; r_r – радіус колеса; J_r – момент інерції колеса; ω_r – кутова швидкість колеса.

Кутова швидкість колеса може бути додатково отримана шляхом інтегрування:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_r} \cdot (C_b - F_f \cdot r_r). \quad (5)$$

Ковзання колеса можна виразити як:

$$s = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_v}, \quad (6)$$

де ω_v – еквівалентна кутова швидкість автомобіля, $\omega_v = \frac{v_v}{r_r}$.

Сили, що діють на колесо автомобіля під час гальмування зображено на рис. 2.

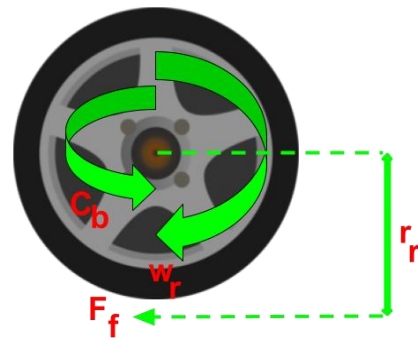


Рис. 2. Сили, що діють на колесо автомобіля під час гальмування

Коефіцієнт тертя μ між колесом і дорогою залежить від декількох факторів, таких як тип дороги, умов вологості та температури, пробуксовки коліс та швидкості автомобіля. Це можна виразити як емпіричну функцію, що залежить від ковзання колеса

$$\mu(s) = C_1 \cdot (1 - e^{-C_2 \cdot s}) - C_3 \cdot s, \quad (7)$$

де C_1, C_2, C_3 – коефіцієнти, визначені емпірично.

Значення коефіцієнтів для різних дорож-

ніх покриттів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів для різних дорожніх покриттів

Дорожнє покриття	C_1	C_2	C_3
Сухе	1.2801	23.99	0.52
Мокре	0.857	33.82	0.347
Сніг	0.1946	94.12	0.0646
Крига	0.05	306.3	0

Залежність коефіцієнта тертя від ковзання колеса зображено на рис. 3.

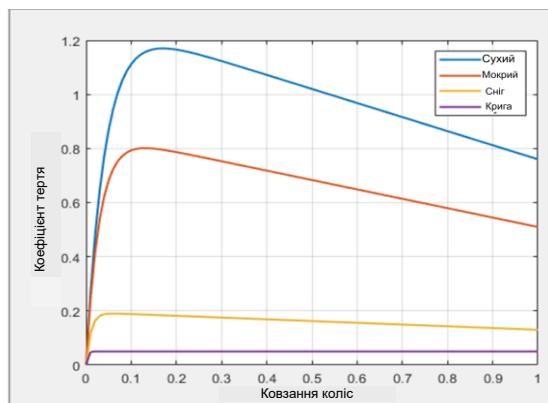


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тертя від ковзання

Існує дві області, які можливо спостерігати, стабільна область, в якій μ зростає зі збільшенням s і нестабільна область, в якій μ зменшується зі збільшенням s . ABS тримає ковзання колеса близьким до оптимального значення.

Система адаптивного круїз-контролю

Адаптивний круїз-контроль (АКК) це система автоматичного керування швидкістю автомобіля, яка дозволяє підтримувати задану швидкість та безпечну дистанцію до інших транспортних засобів на дорозі. Вона складається з багатьох підсистем [19]. Система АКК має багато переваг перед звичайним круїз-контролем та дозволяє реагувати на певні дорожні обставини [8].

Сьогодні, зі збільшенням попиту на транспорт, існує потреба в гнучкому способі контролю дороги. Адаптивні системи управління стали можливими завдяки появі нових технологій. Зі збільшенням кількості автомобілів на дорогах і ускладненням транспортної інфраструктури, потреба в модернізації транспортної системи також зростає. Відповідно,

нові рішення в галузі інтелектуальних транспортних систем (ІТС) привели до нових способів гнучкого управління. У порівнянні з класичним круїз-контролем, АКК сприяє підвищенню комфорту і зменшенню стресу для водіїв, виконуючи завдання на відстані від головного автомобіля. АКК автоматично регулює швидкість руху, щоб утримувати провідний автомобіль відповідно до встановленої відстані. Система автоматично гальмує автомобіль при наближенні до головного автомобіля, якщо необхідно, з невеликою активацією гальма, що сприяє та економить споживання палива та підвищує економічну ефективність [19]. Якщо провідний автомобіль збільшує швидкість, система адаптивного круїз-контролю також збільшує швидкість автомобіля до встановленої максимальної швидкості. Якщо попереду немає транспортних засобів, АКК поводить як класичний круїз-контроль. Також під час водіння на схилі, гальма АКК підтримують задану швидкість, а водієві залишається лише тримати кермо під контролем. Адаптивний круїз-контроль також надзвичайно корисний в умовах поганої видимості, наприклад у тумані. У цьому випадку система легко розпізнає транспортні засоби, що рухаються попереду та автоматично уповільнює автомобіль [13].

Застосування блоку адаптивної системи керування можливе наступним чином. вхідний сигнал регулятора є похибкою, яка представляє різницю між бажаною та фактичною швидкістю або відстанню між автомобілями. Відповідно до цієї помилки контролер подає сигнал керування, який регулює кут нахилу заслінки. Положення педалі акселератора, виміряне контролером, змінить швидкість обертання двигуна. Круїз-контроль регулює швидкість автомобіля на основі бажаної швидкості та відстані, а фактичні швидкість та відстань надходять від датчика з гілки зворотного зв'язку. Короткий часовий проміжок дає водієві або системі менше часу для реакції, якщо попередній автомобіль змушений дуже швидко сповільнитись, що збільшує ймовірність випадкової аварії.

Система адаптивного круїз-контролю працює у двох режимах:

- контроль швидкості. Автомобіль рухається зі швидкістю, встановленою водієм;
- контроль дистанції. Автомобіль підтримує безпечну дистанцію до автомобіля попереду.

Система АКК вирішує який режим використовувати на основі радарних вимірювань у реальному часі.

Якщо автомобіль попереду знаходиться занадто близько, система АКК перемикається з контролю швидкості на контроль дистанції. Так само, якщо автомобіль попереду знаходиться далі, система перемикається з контролю дистанції на контроль швидкості.

Метою контролера АКК є реалізація круїз-контролю і адаптивного керування (підтримка бажаної відстані до транспортного засобу що рухається попереду). Виходячи із різноманітних ситуацій на дорозі, можливо класифікувати режим руху наступним чином:

- стійке слідування за попереднім транспортним засобом;
- екстрене гальмування автомобіля, який рухається попереду;
- екстрене прискорення автомобіля що рухається попереду;
- екстрене гальмування транспортного засобу з АКК.

Очевидно, що транспортний засіб, оснащений системою АКК повинен вміти справлятися з цими сценаріями [13]. Система АКК проектується в структурі, яка містить багатшарові контролери, верхній та нижній. Верхній контролер вираховує бажане прискорення на основі поточної дорожньої ситуації, а нижній контролер перетворює дані в бажаний результат, щоб виконуючий механізм міг його реалізувати.

Багато методів оптимізації були застосовані до різноманітних контролерів для підвищення ефективності руху, покращення комфортності водіння та забезпечення безпеки транспортних засобів. Один із популярних контролерів пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) контролер, який зображено на рис. 4.

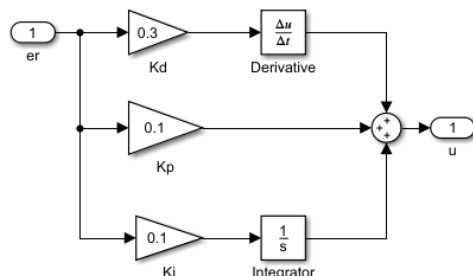


Рис. 4. Модель PID – регулятора

Регулятор використовує відносну відстань, відносну швидкість та відносне прискорення в якості вхідних даних і бажане прискорення в якості вихідних даних. ПІД-контролер це перший метод, використаний в проектуванні системи круїз-контролю, за допомогою якого можна корегувати похибку відстані та відносну швидкість.

Керуючий сигнал ПІД-регулятора виходить в результаті додавання трьох складових [20]:

- перша пропорційна величині сигналу неузгодженості;
- друга інтегралу сигналу неузгодженості;
- третя його похідної.

У випадку коли один із цих компонентів не доданий в момент складання, то регулятор стає не ПІД, а просто пропорційним, пропорційно-диференціюючим чи пропорційно-інтегруючим.

Однак недоліком використання ПІД-регулятора є велика кількість часу, необхідного для налаштування параметрів, а також те, що ПІД не може передбачити траєкторію майбутнього руху транспортного засобу. Тому через інерційність транспортного засобу керування завжди має фазову затримку керування рухом автомобіля, також ПІД-регулятор не стійкий до зовнішніх збурень.

Система АКК має багато переваг, основні з котрих є [13]:

- покращення безпеки. АКК дозволяє водію автоматично підтримувати безпечну відстань від інших транспортних засобів, що знижує ризик зіткнень та аварій на дорогах;
- зменшення втоми водія. Завдяки тому що АКК автоматично регулює швидкість автомобіля, водій може зосередитись на керуванні автомобілем і менше втомлюватись;
- підвищення комфорту водіння. АКК може регулювати швидкість і дистанцію до автомобіля що рухається попереду, знизити стрес водія та підвищити комфорт поїздки;
- економія палива. Система АКК може знизити витрату палива, так як автомобіль буде пересуватись більш ефективно, використовує менше палива в процесі гальмування та прискорення;
- покращення трафіку. Завдяки тому, що система АКК регулює швидкість автомобіля, вона може допомогти знизити завантаженість доріг та покращити потік транспорту;
- розширення можливостей автомобіля. АКК може використовуватись в поєднанні з іншими технологіями автоматичного керування. Такими як система автоматичного па-

ркування, для того щоб покращити функціональність автомобіля;

- зменшення шкідливих викидів. АКК допомагає знизити шкідливі викиди в атмосферу, так як вона може автоматично регулювати швидкість руху і тим самим знижувати витрату палива та викиди вихлопних газів;

- автоматичне утримання полоси. Деякі системи АКК також можуть мати функцію утримання полоси, котра дозволяє автомобілю залишатися в своїй смузі руху без участі водія. Це може бути корисно при довготривалих поїздках по магістралі.

Не зважаючи на численні переваги, система адаптивного круїз-контролю має деякі недоліки:

- не підходить для всіх ситуацій. АКК не рекомендується використовувати в умовах щільного трафіку на дорогах з обмеженою видимістю або на ділянках доріг з крутими поворотами так як система може не впоратись з такими ситуаціями;

- вартість. Автомобілі, оснащені системою АКК можуть коштувати дорожче, ніж ті, в котрих її немає. Крім того, ремонт та заміна деталей системи можуть бути багатовартісними;

- залежність від датчиків. Система АКК залежить від працездатності та точності датчиків, що може знизити її ефективність в поганих погодних умовах або при наявності інших перешкод (напр. забруднення датчиків);

- несумісність з деякими марками та моделями автомобілів. Деякі марки та моделі автомобілів можуть не підтримувати систему АКК або підтримують її в більш дорогих комплектаціях.

Датчики тиску в шинах

Правильний тиск у шинах може мати значний вплив на безпеку і ефективність автомобіля [15]. Він допомагає зменшити споживання палива, покращує тримання дороги, скорочує гальмівний шлях і навіть збільшує термін служби шин. Недостатній тиск, натомість, може викликати перегрів шин, що загрожує безпеці та може призвести до аварій. Насправді, близько 70% автомобілів на дорогах їздять хоча б з однією недокачаною шиною. Причини такої ситуації природні витоки та зміни температури. Більшість водіїв не перевіряють тиск у шинах, поки не помітять дивну поведінку автомобіля. Але важливо

вказати, що візуальна перевірка зазвичай недостатня для точного визначення низького тиску у шинах.

Недостатній тиск в шинах визначається за допомогою датчиків тиску. Недорога і проста система складається з датчику, який встановлюється на вентиль шини, який змінює свій колір при пониженні тиску. Цей датчик має низьку точність і не може передавати дані водію. В більш складних версіях такого датчика використовується передатчик радіочастотного сигналу, приймач і система попередження, зображено на рисунку 5 [4].

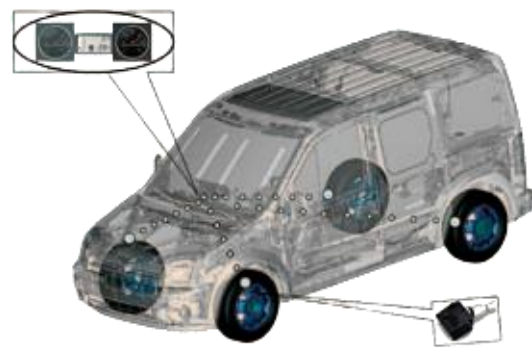


Рис. 5. Система контролю тиску в шинах [4]

Тиск в кожній шині вимірюється і передається через відповідний датчик і передатчик. Дані сигнали приймаються, декодуються і обробляються приймачем для запуску системи попередження через сигнальну лампу, звуковий сигнал, голосове повідомлення або відображення тиску.

Модуль датчика повинен бути маленьким за розміром і вагою, для того щоб мінімізувати вплив центробіжних сил. Модуль може працювати в діапазоні температур від -40°C до 120°C . Наприклад, датчик тиску в шинах, вироблений компанією *Hell* складається з датчику, передатчику, антени, блоку керування, а також батареї для подачі енергії. Він має вентильний стрижень, котрий вмонтовується всередині шини через отвір на ободі колеса, зображено на рис. 6.



Рис. 6. Модуль датчика тиску [4]

Маса датчика зведена до мінімуму, щоб

зменшити ефект відцентрової сили внаслідок обертання шини. Більшість таких датчиків виготовлені з використанням технології CMOS, що забезпечує низьке споживання енергії. Датчик розроблено разом з аналогово-цифровим перетворювачем та пам'яттю для зберігання даних про тиск в шинах. В більш розвинених моделях також влаштовано датчик температури. Для керування функціями датчика на модулі вбудовано мікроконтролер у флеш-пам'ять якого завантажена програмна прошивка.

У певних моделях, коли автомобіль припаркований, датчик передає сигнали кожну годину, а інші моделі використовують датчики швидкості для активації передачі даних. У вищорівневих моделях модулів датчиків використовується вбудована низькочастотна приймальна схема, що перебуває в режимі очікування й активує датчик при сприйнятті сигналу від основного процесора транспортного засобу. Кожен датчик кодується унікальним чином для того, щоб можна було розрізнити шини. При заміні або переміщенні датчика шини, його необхідно скинути до початкових налаштувань [2].

Модуль приймача складається з антени і блоку керування, за допомогою яких активується система попередження. В більшості сучасних моделей модуль приймача є портативним зі влаштованим процесором, дисплеєм та системою попередження. Цей блок живиться або власною батареєю або батареєю автомобіля. Приймач запрограмований виробником для зв'язку кожного датчику з відповідним колесом і потребує повторного налаштування при заміні колеса або датчика. Базовий портативний дисплейний блок приймача має кольорові символи зі світлодіодами кожен з яких відповідає певному кольору для ідентифікації недокачаного колеса. Однією із можливих проблем приймача є уникнення перешкод даних від сусідніх автомобілей.

Висновки

В роботі проведено роботи аналіз існуючих систем активної безпеки автомобіля, виявлення їх недоліків та дослідження можливості підвищення рівня активної безпеки транспортних засобів.

Разом ці системи являють собою основу та невід'ємну частину сучасних систем активної безпеки автомобіля. Система ABS зробила вагомий внесок в систему гальмівних

механізмів, покращила контроль та стійкість при екстремому гальмуванні за рахунок запобігання блокування коліс. Адаптивний круїз-контроль змінив відчуття від водіння та допомагає запобігати аваріям, підтримуючи безпечну дистанцію до інших учасників дорожнього руху і відповідно до них регулює швидкість. Також однією із важливих систем є система контролю тиску в шинах. За її допомоги можливо постійно стежити за тиском шин, що також може значно знизити ризик виникнення аварій.

Аналіз цих технологій показав що вони здійснюють комплексний вплив на поліпшення системи безпеки автомобіля. Але не дивлячись на те, що ці системи демонструють великий потенціал запобігання аварій та забезпеченню більш безпечних умов водіння, необхідні подальші вдосконалення та інтеграція в конструкцію автомобіля. Дослідження та розробки, що продовжуються, необхідні для використання всього потенціалу систем активної безпеки та створення майбутнього автономного керування автомобілем. У підсумку, дослідження цих механізмів безпеки підкреслює їх важливу роль у автомобільному будівництві та вказує на те, що постійні інновації та впровадження необхідні для створення більш безпечної моделі водіння та будуть корисними для всіх.

На цей час, системи активної безпеки набувають першочергового значення з впровадженням систем автономного водіння на автомобільному транспорті. Для каретної і стабільної роботи такої системи потрібна надійна і безвідмовна робота систем активної безпеки. Тобто, само собою випливає завдання у вдосконаленні існуючих та розробці новітніх систем активної безпеки автомобільного транспорту, базою для яких, на нашу думку, може послугуватися проведений в цій роботі аналіз.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Singh, K.B., Arat, M.A., Taheri, S. (2012) Development of a smart tire system and its use in improving the performance of a collision mitigation braking system. 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston, TX, USA, 9–15 November. 77–87.

2. Коростельов М., Гнатов А. (2020). Дослідження активних систем безпеки для автотранспортних засобів. *Автомобільний транспорт*, (46), 40-40. Korostel'ov M., Hnatov A. (2020). Doslidzhennya aktyvnykh system bezpeky dlya avtotransportnykh zasobiv. *Avtomobil'nyy transport*. [Study of active safety systems for motor vehicles.] *Automobile transport*, (46), 40-40. [in Ukrainian].
3. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., & 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.
4. Xin, J. (2014). Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology. 473–477. <https://doi.org/10.1061/9780784413821.051>
5. Chekalin, V. G. (2011). Diagnosis and adjustment of automated electric drives (Uchebnoe posobie dlya VTUZov). TTU im. M. Osimi.
6. Borodenko, Y., Ribickis, L., Zabasta, A., Arhun, S., Kunicina, N., Zhiravetska, A., Kunicins, K. (2020). Using the method of the spectral analysis in diagnostics of electrical process of propulsion systems power supply in electric car. *Przeglad Elektrotechniczny*. R96. 47-50.
7. Tire Pressure Monitoring [Applications of Control] (2008). Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/A-direct-tire-pressure-monitoring-system-Sensors-in-each-tire-measure-pressure-The-data_fig1_3207920
8. Longitudinal forces acting on the vehicle during braking on a downhill (2023). Retrieved from https://researchgate.net/figure/Longitudinal-forces-acting-on-the-vehicle-during-braking-on-a-downhill_fig1_359521165
9. Dziubenko, O., Arhun, S., Hnatov, A., Ponikarovska, S. (2021). Choosing the method for determining angular motions of motor vehicle electromechanical subassemblies. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 8(32), 1-8. <https://doi.org/10.4108/eai.1-7-2020.165999>
10. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), 248-253.
11. Bloecher H. L., Dickmann J., Andres M. (2009) Automotive active safety & comfort functions using radar. 2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. IEEE, 490-494.
12. Hnatov, A., Arhun, S., Tarasov, K., Hnatova, H., Mygal, V., Patlins, A. (2019, October). Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. In 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (pp. 1-6). IEEE.
13. Vazhynova T., Kravchenko, O., Barta D., Haievvi, O., Pavelcik V. (2020) Neural Network Model of Assessing the Technical Condition of the Power Unit of a Hybrid Vehicle. 2020 XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY. (21-23 October 2020, Kielce, Poland) IEEE. 1-7.
14. Ніконов, О.Я., Щебенюк В.С., Улько В. Ю. (2015) Інтелектуалізація системи круїз-контролю автомобіля на основі штучних нейронних мереж. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 7. 81-84. Nikonov, O.Ya., Shchebenyuk V. S., Ul'ko V. YU. (2015) Intelktualizatsiya systemy kruiyz-kontrolyu avtomobilya na osnovi shtuchnykh neyronnykh merezh. ["Intellectualization of the car cruise control system based on artificial neural networks."] *Car and electronics. Modern Technologies*, (7). 81-84.[in Ukrainian].
15. Мигаль, В., Аргун, Ш., Гнатов, А., Гнатова, Г., Сохін, П. (2022) Інтелектуальне діагностування транспортних засобів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (22),72–80. Migal V., Argun Sh., Gnatov A., Gnatova G., Sokhin P. (2022) Intelktual'naya diagnostika transportnykh zasobiv. Intelligent vehicle diagnostics. [Intelligent diagnosis of vehicles]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*. 22, 72–80. [in Ukrainian].
16. Козачук, В.В., Онищук, В.П., Козачук І.С. (2022) Системи управління тиском повітря в шинах транспортних засобів. *Центральний науковий вісник. Технічні науки*. 5(36), 289-298. Kozachuk V. V., Onyshchuk V. P., Kozachuk I. S. (2022) Systemy kontrolyu tysku povitrya v shynakh transportnykh zasobiv [Air pressure control systems in vehicle tires.]. *Tsentrалnyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 5(36), 289-298. [in Ukrainian].
17. Regenerative Braking Logic (2023). Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/5846>
18. Driver support (2023). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/265111347>
19. ABS (2023). Retrieved from https://mdpires.com/d_attachment/applsci/applsci-10-05271/article_deploy/applsci-10-05271v2.pdf?version=1596205639.
20. ПІД-закони регулювання (2023). Retrieved from http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7310/1/MR_Nepomnyashchiiy.pdf PID-zakony rehulyvannya (2023) [SUB-laws of regulation] Retrieved from http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7310/1/MR_Nepomnyashchiiy.pdf. [in Ukrainian].
21. Savino, G., Lot, R., Massaro, M., Rizzi, M., Symeonidis, I., Will, S., & Brown, J. (2020). Active safety systems for powered two-wheelers:

A systematic review. Traffic injury prevention, 21(1), 78-86.

22. Arena, F., Pau, G., & Severino, A. (2020). An overview on the current status and future perspectives of smart cars. *Infrastructures*, 5(7), 53.

Товстокорий Максим Юрійович¹, студент
автомобільного факультету, кафедра
Автомобільної електроніки,
mtovstokoryj@gmail.com, тел. +38 098-790-23-17

Гнатів Андрій Вікторович², проф., док. наук,
зав. кафедри Автомобільної електроніки, тел.
+38 066-743-08-87, kalifus76@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-0932-8849

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

Analysis of opportunities to increase the level of active car safety

Abstract. Problem. Increasing the active safety of automobiles remains an important issue in modern automotive engineering. This study will investigate opportunities to increase the effectiveness and scope of automotive active safety measures. Current active safety measures, while effective, are limited in their ability to address the dynamic and multifaceted nature of hazards on the road. Factors such as human error, changing road conditions, and the emergence of new traffic patterns still pose significant risks. These challenges require a comprehensive analysis of opportunities to increase the effectiveness of active car safety. To address these challenges, novel technologies must be explored, industry collaboration must be encouraged, and adaptable standards must be established to integrate and enhance active safety features in vehicles. Thus, it is essential to identify and capitalize on opportunities for progress in active vehicle safety to reduce traffic crashes and promote safer transportation systems **Goal.** The overarching goal is to significantly improve the effectiveness and breadth of active safety measures for vehicles. This includes:

enhanced protection, proactive risk reduction, technology integration, behavioral adaptation, and regulatory strengthening. Achieving these goals will require a multidisciplinary approach that combines technological innovation, behavioral science, regulatory adaptation, and industry collaboration to create a comprehensive and effective active vehicle safety ecosystem. **Methodology.** Analytical research methods are used, Researching and developing cutting-edge technologies. **Originality.** A detailed analysis was carried out and the principles of operation of systems and mechanisms included in active safety systems were presented. This analysis will allow to determine the advantages and disadvantages that should be paid attention to when studying these systems. **Practical value.** Enhanced active car safety offers a variety of benefits and has substantial value. Reduced accidents and fatalities: Reduced accidents and fatalities, advanced safety measures can significantly reduce the frequency and severity of accidents, leading to fewer injuries and fatalities on the road. Improved traffic flow, proactive safety systems reduce potential hazards and contribute to smoother traffic flow and less congestion caused by accidents. Technological innovation, advances in active safety can contribute to broader technological innovation and influence advances in areas other than automotive safety.

Key words: anti-lock braking system; active safety; adaptive cruise control system; tire pressure control system; active safety systems.

Tovstokoryi Maksym¹ student of the Automotive faculty, Vehicle Electronics Department
mtovstokoryj@gmail.com, tel. +38 098-790-23-17

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 066-7438-0887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-0932-8849

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

Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Смирнов О.П.¹, Борисенко А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена проблемі підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів за рахунок проведення порівняльного аналізу електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. У дослідженні проведений аналіз відомих електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей: модель Rint, модель RC, модель Thevenin, моделі PNGV. Досліджені моделі деградації акумуляторних батарей за зменшенням ємності та зростанням активного опору. Обґрунтовані напрями удосконалення електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів шляхом врахування зміни величин ємності, внутрішнього опору та опору поляризації, календарної та циклічної деградації.

Ключові слова: електромобіль; літій-іонна акумуляторна батарея; електрична модель; ефективність; стан заряду; система накопичення енергії; деградація акумулятора

Вступ

Протягом останніх десятиліть для вирішення екологічних, соціальних та економічних проблем, пов'язаних з високими індексами викидів газів і неефективним використанням енергетичних ресурсів прогресивні країни інвестують в екологічно чисті та енергозберігаючі технології, що застосовуються в секторі автомобільного транспорту [1-3]. Прогнозується, що до 2050 р. міжнародні продажі автомобілів подвоїться [4], що підкреслює необхідність розгортання транспортних засобів з альтернативними джерелами енергії для вирішення проблеми зміни клімату.

Серед потенційних силових систем для заміни транспортних засобів, що працюють на викопному паливі, електричні транспортні засоби (Electric Vehicles (EV)) є перспективним альтернативним рішенням завдяки використанню літій-іонних акумуляторних батарей, які в порівнянні з іншими батареями відрізняються високою щільністю енергії, високою щільністю потужності, тривалим терміном служби та екологічністю [5]. Джерела живлення або системи накопичення енергії

(Energy Storage Systems (ESS)) є вирішальним компонентом при моделюванні та проектуванні електричної трансмісії, оскільки розробка електромобілів із збільшеним запасом ходу остається складним завданням. У той же час розвиток літій-іонних акумуляторних батарей протягом останнього десятиліття підвищив надійність електричних транспортних засобів з точки зору вищої енергоефективності та терміну служби [6]. Тому актуальним є проведення порівняльного аналізу електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначення шляхів їх удосконалення.

Аналіз публікацій

Останнім часом електричні транспортні засоби EV стали перспективним напрямом в автомобільному секторі через їх екологічність. Застосування літій-іонних акумуляторних батарей в системах накопичення енергії ESS електромобілів вважається оптимальним рішенням через їх високу питому щільність енергії та потужність, меншу вагу [7-10].

Моделювання ефективності та деградації літій-іонних акумуляторних батарей в системах накопичення енергії ESS електромобілів привернуло велику увагу в останні роки. Останні дослідження [11, 12] демонструють, що стан заряду (State of Charge (SoC)) акумуляторної батареї електромобілів діє як індикатор ефективності батареї. Неправильна оцінка SoC призводить до надмірної зарядки або надмірної розрядки. Оцінка SoC стала складним завданням через значні зміни, що відбуваються в характеристиках батареї через ефект деградації, вплив температури та наявність нелінійних характеристик батареї.

Дослідження [13] аналізує взаємозв'язок між втратою ємності та вхідними функціями за допомогою циклічного та календарного прогнозування деградації і представляє метод вибору інтелектуальних функцій, який розширив здатність узагальнення та покращив прогнозні характеристики алгоритмів моделі для точного прогнозування загальної втрати ємності.

У статті [14] розроблена модель стратегії швидкої зарядки з урахуванням стану акумуляторної батареї електромобіля, щоб зменшити ризик нелінійної деградації під час процесу заряд/розряд літій-іонних елементів. У дослідженнях [15, 16] розроблені моделі для кількісної оцінки коефіцієнтів деградації різних типів літій-іонних акумуляторних батарей, що дозволяє точніше передбачити ефективність, термін служби та час коли досягається такий рівень деградації, коли необхідно її замінити.

У статті [17] для покращення оцінки стану працездатності та прогнозування залишкового терміну служби пропонується варіант нейронної мережі довгострокової пам'яті, який призначений для забезпечення ефективності запропонованої структури. У дослідженні [18] проведено моделювання основних параметрів літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів другого терміну служби. У дослідженні [19] проведена оцінка електричних моделей еквівалентної схеми літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля для оцінки стану заряду за допомогою експериментального підходу.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів за

рахунок проведення порівняльного аналізу різних електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей, які використовуються в електромобілях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести порівняльний аналіз відомих електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, таких як, модель Rint, модель RC, модель Thevenin, моделі PNGV, тощо;

- визначити основні характеристики літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, такі як стан заряду, маса, фактична напруга, енергія необхідна для підзарядки, тощо;

- дослідити електричні моделі деградації акумуляторних батарей за зменшенням ємності та зростанням активного опору;

- визначити можливі напрями удосконалення електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів;

- сформулювати висновки щодо доцільності врахування в електричних моделях зміну основних характеристик літій-іонних акумуляторних батарей, які відбуваються під час експлуатації електромобіля.

Аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Основним способом моделювання літій-іонного акумулятора є створення електричної еквівалентної схеми з параметрами, які представляють напругу, ємність елемента та внутрішній опір. Керуючі рівняння моделі акумулятора повинні відображати її зв'язок із температурою, станом працездатності (State of Health (SoH)), станом заряду (State of Charge (SoC)) і струмом, відтворюючи при цьому нелінійну залежність. Зв'язок літій-іонного акумулятора з цими факторами залежить від хімічного складу акумулятора та рівнем його деградації. Акумулятор, що був деякий час в експлуатації, має ознаки деградації через поступову втрату ємності та збільшення внутрішнього опору, що знижує напругу на клеммах. Таким чином, моделювання літій-іонного акумулятора другого терміну служби вимагає визначення того, як змінюються значення параметрів батареї та які фактори впливають на ці зміни.

Найпростішою електричною моделлю еквівалентної схеми акумулятора є модель Рінта (Rint) [18], що наведена на рис. 1.

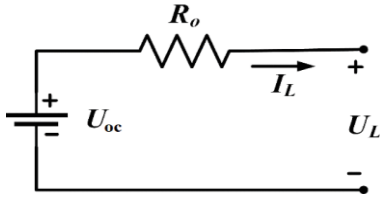


Рис. 1. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі Rint [18]

Напряга на клемі такого акумулятора, В:

$$U_L = U_{CO} - I_L \cdot R_0, \quad (1)$$

де U_L – напруга на клемі акумулятора, В; U_{CO} – напруга холостого ходу, В; I_L – струм навантаження, А; R_0 – внутрішній опір акумулятора, Ом.

Більш просунута версія електричної моделі акумулятора RC була розроблена відомою компанією SAFT Battery Company та досягла широкого використання за допомогою програмного забезпечення Advisor [19]. На рис. 2 наведена еквівалентна електрична схема акумулятора моделі RC. Активний опір додається послідовно та паралельно з двома конденсаторами для більш детального представлення акумулятора.

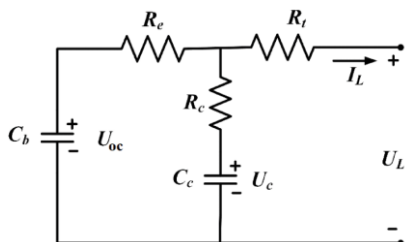


Рис. 2. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі RC [19]

Модель RC, як випливає з назви, повністю складається з резисторів і конденсаторів. Конденсатор C_b характеризує загальну ємність акумулятора для зберігання електричної енергії, а конденсатор C_c характеризує ємність поверхневого ефекту акумулятора. Резистор R_e характеризує внутрішній опір акумулятора, R_t представляє опір клемі, а R_c представляє опір конденсатора C_c . Напруга U_L характеризує напругу на клемі акумулятора, напруга U_b визначає стан заряду (SoC) акумулятора, напруга U_c – напругу на конденсаторі C_c . Рівняння моделі акумулятора RC:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c \cdot (R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot [I_L] \\ [U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_t - \frac{R_e \cdot R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot [I_L] \quad (3)$$

Популярної електричної моделлю літій-іонного акумулятора є модель Тевеніна (Thevenin). Еквівалентна модель акумулятора Тевеніна вводить поляризаційний опір R_{Th} паралельно з еквівалентною ємністю C_{Th} , як це показано на рис. 3.

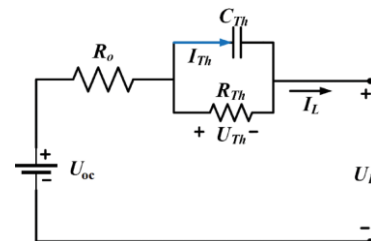


Рис. 3. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі Thevenin [18]

Конденсатор Тевеніна C_{Th} враховує перехідні характеристики, що спостерігаються під час процесу заряд/розряд акумулятора. Напруга Тевеніна U_{Th} на паралельному з'єднанні R_{Th} та C_{Th} та напруга на клемі акумулятора визначаються за формулою:

$$\begin{cases} \dot{U}_{Th} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th} \cdot C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \\ U_L = U_{OC} - U_{Th} - I_L \cdot R_0 \end{cases} \quad (4)$$

У дослідженні [20] розроблена модель літій-іонної акумуляторної батареї PNGV для нового покоління електромобілів (Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV)). Розрахункова електрична схема акумулятора PNGV відрізняється від моделі акумулятора

Thevenin тим, що вводить послідовно з R_0 додатковий конденсатор, як це показано на рис. 4.

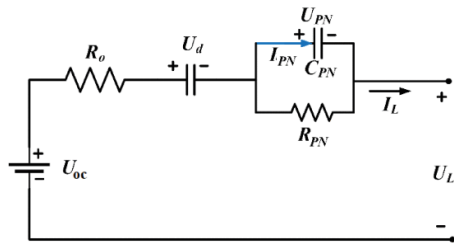


Рис. 4. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі PNGV [20]

Цей доданий конденсатор з напругою U_d (дивись рис. 4) допомагає пояснити зміни напруги холостого ходу акумуляторної батареї електромобіля, коли протікає струм навантаження. Рівняння електричної моделі акумуляторної батареї PNGV:

$$\begin{cases} \dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} \cdot C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \\ U_L = U_{OC} - U_d - I_L \cdot R_0 - U_{PN} \end{cases} \quad (5)$$

Поляризаційні ефекти літій-іонної акумуляторної батареї такі як поляризація концентрації та електрохімічна поляризація можуть бути змодельовані лише в обмеженій мірі за допомогою моделі Thevenin або моделі PNGV, що може привести до неточних симуляцій наприкінці циклів заряду та розряду. Для подолання цієї проблеми у дослідженні [19] створено електричну модель акумулятора DP подвійної поляризації (Dual Polarization (DP)), яка може імітувати обидві поляризації окремо (рис. 5).

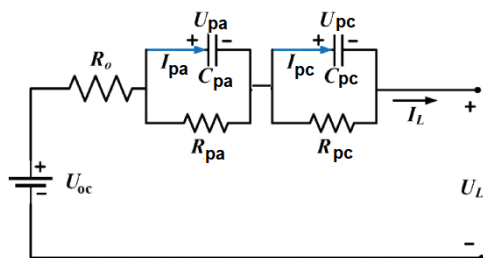


Рис. 5. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі DP [19]

Як показано на рис. 5 активний опір R_0 , опір електрохімічної поляризації R_{pa} та опір концентраційної поляризації R_{pc} імітують

внутрішній опір акумуляторної батареї електромобіля. Поляризаційні ємності C_{pa} (для електрохімічної поляризації) та C_{pc} (для концентраційної поляризації) можна використовувати для моделювання перехідних процесів під час процесу розряд/заряд літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля. Напруги U_{pa} та U_{pc} , що наведені на рис. 5, є напругами на паралельно з'єднаних елементах електричного кола R_{pa} , C_{pa} та R_{pc} , C_{pc} відповідно.

Враховуючи все вищесказане, можна записати рівняння моделі акумулятора подвійної поляризації DP:

$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa} \cdot C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc} \cdot C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{OC} - U_{pa} - U_{pc} - I_L \cdot R_0 \end{cases} \quad (6)$$

Стан заряду акумуляторної батареї SoC електромобіля вважається ключовим параметром, оскільки він вказує на доступну ємність акумулятора, яка визначає дальність пробігу. При моделюванні стану заряду акумуляторної батареї $SoC(t)$ можна застосовувати модель літій-іонної акумуляторної батареї, яка базується на базі даних батарейних блоків Simulink™, %:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \left(\frac{1}{Q \cdot 3600} \int_0^t i_{ch}(t) dt \right) \cdot 100, \quad (7)$$

де $SoC(t_0)$ – початковий стан заряду, %; Q – номінальна ємність літій-іонної акумуляторної батареї, А·год; $i_{ch}(t)$ – зарядний струм батареї, А.

Поточний стан акумуляторної батареї електромобіля відображає її поточну ємність в порівнянні з ємністю батареї на початку терміну служби. У цьому сенсі зниження значення SoC пов'язане з проблемами довговічності акумуляторної батареї, яку можна оцінити за рівнянням:

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{BDL}}, \quad (8)$$

де Q_{BDL} – ємність акумуляторної батареї електромобіля, що відповідає 80 % ємності від ємності на початку експлуатації, згідно стандарту ISO 12405-4:2018 [21], А·год; $Q(t)$ – поточна ємність батареї, А·год.

Стан заряду вводиться як один із вхідних параметрів керування енергоспоживанням. Фактичний стан заряду акумуляторної батареї визначається також глибиною розряду $DoD(t)$, %:

$$DoD(t) = 100 - SoC(t). \quad (9)$$

При постійному струмі розряду глибина розряду акумуляторної батареї DoD визначається за формулою, %:

$$DoD = \frac{I_{disch} \cdot t_{disch}}{Q} 100\%, \quad (10)$$

де I_{disch} – розрядний струм, А; t_{disch} – час розряду, год; Q – загальна ємність акумулятора, А·год.

Маса акумуляторної батареї електромобіля M задається рівнянням, як функція питомої енергоємності літій-іонної акумуляторної батареї, кг:

$$M = \frac{U \cdot Q}{S_E}, \quad (11)$$

де U – номінальна напруга, В; S_E – питома енергоємність, Вт·год/кг.

Приймемо, що типова питома енергоємність літій-іонного акумулятора $S_E = 150$ Вт·год/кг.

У дослідженні [22] рекомендують фактичну напругу акумуляторної батареї електромобіля визначати рівняннями (12), (13) для режимів заряду та розряду відповідно, В:

$$U_{batt}^{I^* \leq 0} = E_0 - I_{batt} R_0 - K \left(\frac{Q}{I_{batt} t - 0.1Q} \right) \cdot I^* - K \left(\frac{Q}{Q - I_{batt} \cdot t} \right) \cdot I_{batt} \cdot t + A \cdot e^{-B \cdot I_{batt} \cdot t} \quad ; (12)$$

$$U_{batt}^{I^* \geq 0} = E_0 - I_{batt} R_0 - K \left(\frac{Q}{Q - I_{batt} \cdot t} \right) \cdot I^* - K \left(\frac{Q}{Q - I_{batt} \cdot t} \right) \cdot I_{batt} \cdot t + A \cdot e^{-B \cdot I_{batt} \cdot t} \quad , (13)$$

де I^* – вимірювальний струм, який може приймати негативні значення (при заряді) або позитивні значення (при розряді), А; E_0 – постійна напруга еквівалентної схеми акумулятора, В; I_{batt} – струм батареї, А; K – постійна поляризації, (В/(А·год))⁻¹; A – постійна інтегрування, В; B – показник затухання перехідного процесу, (А·год)⁻¹.

Після того, як електромобіль виконує проїзд по відповідному комбінованому циклу водіння, моделюється процес заряду батареї з урахуванням остаточного заряду (наприкінці подорожі) як початкові умови заряду. Енергія $W_{batt}(t)$, що потрібна для підзарядки акумуляторної батареї електромобіля розраховується за рівнянням:

$$W_{batt}(t) = \int_0^t \eta_{ch} \cdot i_{ch}(t) \cdot U_{ch}(t) dt, \quad (14)$$

де t – час заряду, с; η_{ch} – ККД заряду, пов'язаний з тепловими втратами потужності та втратами потужності перетворення змінного та постійного струму; U_{ch} – напруга заряду, В.

Таким чином, у проаналізованих вище електричних моделях акумуляторних батарей електромобілів активні опори використовуються в різних кількостях для імітації процесу заряд/розряду акумуляторної батареї електромобіля. На додаток до наведених вище електричних моделей, опори еквівалентної схеми акумуляторної батареї можна використовувати для врахування ємності, опору передачі заряду та опору електроліту [23].

Для будь-якої моделі акумулятора комбінація всіх цих опорів представляє внутрішній опір відповідного акумулятора. Якщо сформулювати в термінах напруги холостого ходу, напруги на клеммах акумуляторної батареї та струму розряду, еквівалентний внутрішній опір можна виразити як, Ом:

$$R_0 = \frac{U_{CO} - U_L}{I_L}. \quad (15)$$

Недоліками моделей, що були досліджені, полягають у тому, що в них не враховується зміна величини внутрішнього опору та ємності акумулятора під час експлуатації електромобіля. Зміна цих параметрів відбувається як в залежності від деградації акумуляторної батареї та від стану її заряду *SoC*.

На рис. 6 [24] наведені залежності величини внутрішнього опору акумуляторної батареї, що складається з 16 послідовно з'єднаних літій-марганцева-оксидних акумуляторів номінальною ємністю 100 А·год, від стану заряду *SoC*.

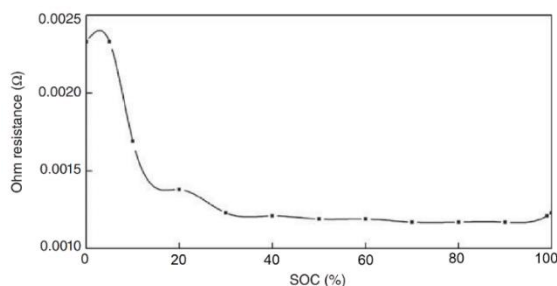


Рис. 6. Залежність величини внутрішнього опору акумулятора від стану заряду *SoC* [24]

На рис. 7 [24] наведені залежності величини опору поляризації акумуляторної батареї, що складається з 16 послідовно з'єднаних літій-марганцева-оксидних акумуляторів номінальною ємністю 100 А·год, від стану заряду *SoC*.

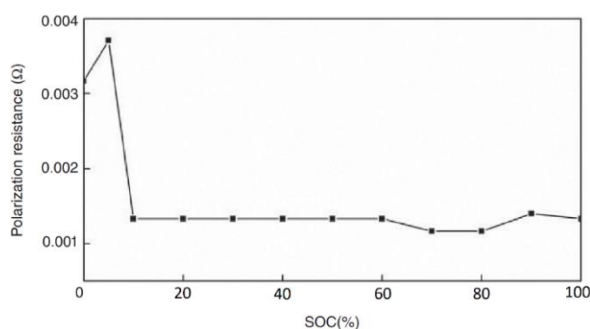


Рис. 7. Залежність величини опору поляризації акумулятора від стану заряду *SoC* [24]

Рис. 6 та рис. 7 демонструють, що під час глибокого розряду акумуляторної батареї внутрішній опір і опір поляризації збільшуються до 3 разів, тому напруга на клеммах акумуляторної батареї значно знижується.

На рис. 8 показана залежність напруги від розрядженої ємності при різних розрядних струмах під час глибокого розряду акумуля-

торної батареї, яка складається з 16 послідовно з'єднаних літій-марганцева-оксидних акумуляторів номінальною ємністю 100 А·год [24].

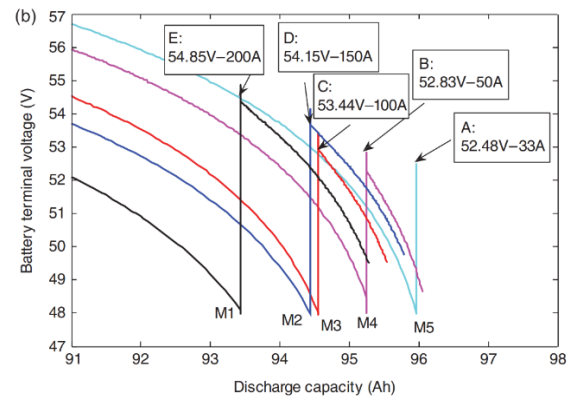


Рис. 8. Залежність напруги від розрядженої ємності при різних розрядних струмах під час глибокого розряду акумуляторної батареї [24]

Проведемо дослідження процесу розряду акумуляторної батареї у відповідних точках (дивись рис. 8) M1 (при постійному режимі розрядного струму 200 А (2 С)), M2 (при постійному режимі розрядного струму 150 А (1,5 С)), M3 (при постійному режимі розрядного струму 100 А (1,0 С)), M4 (при постійному режимі розрядного струму 50 А (0,5 С)), M5 (при постійному режимі розрядного струму 33 А (1/3 С)).

Як видно з рис. 8, в точках M1, M2, M3, M4 і M5 розрядні ємності дорівнюють 93,43 А·год, 94,43 А·год, 94,55 А·год, 95,24 А·год та 95,96 А·год відповідно, а напруга холостого ходу після витримування в розімкненому стані протягом 1 год становлять 54,85 В, 54,15 В, 53,44 В, 52,83 В і 52,48 В відповідно. Очевидно, що напруги холостого ходу зростають зі збільшенням розрядного струму. Зменшення ємності не помітно, оскільки розрядний струм збільшується. Розрядна ємність при струмі 200 А зменшується лише на 2,6 % порівняно з розрядною ємністю при струмі 33 А.

Глибокий розряд акумулятора зменшує його термін служби, тому слід уникати повного 100 % розряду. Але в електромобілях рівень заряду акумуляторної батареї, представлений у вигляді відсоткового значення на приладовій панелі, не відображає реальний рівень заряду *SoC*, тому що система керування батареєю не дозволяє її розряджати до критичного значення та резервує декілька процентів *SoC*

для збільшення терміну служби системи накопичення енергії.

Удосконалення електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів полягає в підвищенні їх точності за рахунок надання змінного характеру його внутрішнього опору та опору поляризації. Збільшення еквівалентного внутрішнього опору акумуляторної батареї призводить до зниження напруги живлення та відповідно потужності.

Також для удосконалення розглянутих моделей літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля необхідно враховувати такий факт, як зниження її ємності, яка природно знижується під час експлуатації електромобіля як при збільшенні циклічного заряду, так і в режимі простою. Зниження ємності акумуляторної батареї електромобіля призводить до зниження дальності пробігу на одному заряді.

Крім того, в моделях, що проаналізовані, не враховується ступень деградації акумуляторної батареї, яку необхідно враховувати при моделюванні літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля, що перебуває в експлуатації, або при моделюванні акумуляторних батарей, які повторно використовуються у системах зберігання енергії, наприклад, при використанні акумуляторних батарей електромобілів у житловому секторі для підтримки сонячної електростанції [25].

У подальшому дослідженні при складанні моделі деградації акумуляторних батарей електромобілів будемо враховувати збільшення еквівалентного активного опору та зниження ємності акумуляторної батареї. Ще проаналізуємо вплив використання технології електромобіль до електромережі (Vehicle to Grid (V2G)) на довговічність акумуляторних батарей електромобілів [26, 27].

Модель деградації акумуляторних батарей електромобілів

Деградація акумуляторних батарей електромобілів відбувається через хімічні побічні реакції під час зберігання та електрохімічні побічні реакції під час роботи. Електричні та термічні навантаження викликають електрохіміко-механічну деградацію через об'ємні зміни активного матеріалу.

Деградація акумуляторних батарей електромобілів залежить головним чином від тем-

ператури, глибини розряду DoD , системи охолодження та швидкості заряду [28]. Використання швидких зарядних пристроїв, які використовують постійний струм, збільшує швидкість деградації, яка становить 10 % за шість років, у порівнянні з повільним зарядом змінним струмом з номінальною напругою 120 В або 220 В [29].

У причинно-наслідковому контексті стресові фактори акумуляторних батарей електромобілів прискорюють різні механізми фізичної деградації, які проявляються у втраті запасів літію, втраті активного матеріалу та обмеженнях напруги та струмів.

Початкова ємність акумуляторної батареї Q_{batt} є функцією ємності елемента Q_{cell} і кількості елементів N , з'єднаних паралельно, А·год:

$$Q_{batt} = Q_{cell} \cdot N. \quad (16)$$

Для акумуляторної батареї електромобіля можна визначити дві ємності: номінальну (або загальну) і корисну [30]. Номінальна ємність – це кількість енергії, яку теоретично може вмістити акумуляторна батарея (формула (16)). Корисна ємність менша за номінальну і описує кількість енергії, яку можна безпосередньо використовувати для руху електромобіля. Виробники електромобілів можуть обмежити доступну ємність акумулятора, включивши буфер, який недоступний на початку терміну служби автомобіля. Потім цей буфер звільняється з часом, змінюючи на корисну ємність протягом терміну служби автомобіля [31].

Зменшення ємності акумуляторної батареї електромобіля може бути розділене на календарну та циклічну деградацію. Календарна деградація є функцією часу, температури та SoC і виникає навіть тоді, коли акумуляторна батарея електромобіля не використовується. Циклічна деградація пов'язана з кількістю циклів заряд-розряд та є функцією температури, пропускну здатності енергії та величини струму [32-34].

Незважаючи на те, що в електромобілі може бути використана лише корисна ємність, деградація впливає на всю ємність. Поточна ємність акумулятора виражається як [31]:

$$Q(t) = Q_{batt} \left[1 - (q_{cal}(t) + q_{cycle}(t)) \right], \quad (17)$$

де $q_{cal}(t)$ – накопичена календарна деградація, %; $q_{cycle}(t)$ – накопичена циклічна деградація, %.

Швидкість календарної деградації акумуляторної батареї електромобіля оцінюється за допомогою рівняння Арреніуса [31]:

$$\frac{dq_{cal}}{dt} = A_1 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT_k}} \sqrt{\frac{t}{86400}}, \quad (18)$$

де A_1 – постійна інтегрування; E_a – енергія активації, що дорівнює 24,5 кДж; T_k – абсолютна температура акумуляторної батареї, К; t – час, с; R – універсальна газова стала дорівнює $R = 8,31446261815$ Дж/(моль·К). Її значення пов'язане зі сталою Больцмана співвідношенням:

$$R = E_a \cdot k_B \quad (19)$$

де E_a – число Авогадро; k_B – стала Больцмана.

Прискорюють електрохімічну деградацію акумуляторних батарей електромобілів термічні фактори, що відбуваються через електричне навантаження. У дослідженнях [29, 35] об'ємна температура акумуляторів $T(t)$ визначається за допомогою об'ємної теплової моделі, К:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} + h \cdot S \cdot (T(t) - T_{amb}) = I \cdot (U_L - U_{OC}) \quad (20)$$

де m – маса акумуляторної батареї, г; c_p – теплоємність акумуляторної батареї, Дж/(кг·К); h – коефіцієнт теплопередачі акумулятора, Вт/(м²·К); S – площа поверхні акумуляторної батареї, м²; T_{amb} – температура навколишнього середовища, К.

Інженери систем накопичення енергії електромобілів кількісно визначають результуючу фізичну деградацію акумуляторних батарей двома способами:

- за зменшенням ємності, що обмежує дальність пробігу;
- за зменшенням потужності, що відбувається за рахунок збільшення внутрішнього

опору та опору поляризації та обмежує загальну потужність електропривода та знижує ефективність електромобіля [36].

Ефекти деградації акумуляторних батарей визначаються як зменшення ємності та зростання активного опору. У дослідженні [29] модель зменшення ємності CF (Capacity Fade) побудована за еквівалентною моделлю акумулятора Thevenin (див. рис. 3) та визначаються як:

$$CF = 1 - \frac{C - \mu_{CF} \cdot C_{rater}}{C_{rater} - \mu_{CF} \cdot C_{rater}}, \quad (21)$$

де C – поточна ємність акумуляторної батареї, А·год; C_{rater} – максимальна розрядна ємність, визначена виробником, А·год; μ_{CF} – коефіцієнт номінальної ємності, за якого акумулятор вважається непридатним для використання (для акумуляторної батареї електромобіля вказується як 0,8, що відповідає втраті 20 % від початкової ємності) [21].

Модель зменшення потужності PF (Power Fade) побудована за еквівалентною електричною моделлю акумулятора Thevenin (див. рис. 3) та визначаються як:

$$PF = \frac{1}{\mu_{FF} - 1} \cdot \left(\frac{R_0 + R_{Th}}{R_0(0) + R_{Th}(0)} - 1 \right), \quad (22)$$

де μ_{FF} – коефіцієнт загального опору елементів, за якого акумуляторна батарея вважається непридатною для використання (для акумуляторної батареї електромобіля вказується як 2, що відповідає збільшенню загального опору на 100 %); R_0 – поточна величина внутрішнього опору акумуляторної батареї електромобіля, Ом; R_{Th} – поточна величина поляризаційного опору Тевеніна, Ом; $R_0(0)$ – внутрішній опір, який був під час виробництва акумуляторної батареї, Ом; $R_{Th}(0)$ – поляризаційний опір Тевеніна, який був під час виробництва акумуляторної батареї, Ом.

При збільшенні внутрішнього опору більш ніж у 2 рази акумуляторна батарея електромобіля вважається непридатною для потреб живлення електропривода.

Вартість деградації акумуляторної батареї електромобіля \mathcal{E}_{deg} рекомендують розраховувати за формулою [29]:

$$\xi_{deg} = \max[CF \cdot \xi_{batt}, PF \cdot \xi_{batt}], \quad (23)$$

де ξ_{batt} – вартість заміни акумуляторної батареї електромобіля.

У дослідженні [28] запропонований розрахунок вартості деградації акумуляторної батареї електромобіля D , €/кВт·год:

$$D = \frac{C_{batt}}{DoD \cdot L}, \quad (24)$$

де C_{batt} – вартість акумуляторної батареї електромобіля, €/кВт·год; L – життєві цикли батареї до деградації для фіксованого DoD .

Ефективний термін служби кожної акумуляторної батареї електромобіля залежить від DoD , і, отже, можна визначити максимальну кількість циклів до деградації. Для кожної поїздки розраховується потреба в електричній енергії для подорожі, а вартість зарядки електромобіля може бути розрахована, як показано в рівнянні, кВт·год:

$$\xi_{ch} = \xi_e \frac{C \cdot (1 - DoD)}{\eta_{ch}}, \quad (25)$$

де ξ_e – вартість енергії, €/кВт·год; C – ємність акумулятора, кВт·год; η_{ch} – ККД зарядного пристрою, %.

Останні дослідження, що проведене доктором Котубом Уддіном (Kotub Uddin) разом із його командою з групи енергетичних і електричних систем WMG і Jaguar Land Rover, показали, що можна використовувати живлення від акумуляторних батарей електромобілів до електромережі V2G без додаткової деградації акумуляторів. Вони навіть заявили, що це може знизити на 10 % процес деградації акумуляторної батареї електромобіля [36].

Компанія Geotab провела дослідження акумуляторних батарей 6300 електромобілів з 21 різних моделей [37], та сформулювала два основні висновки:

- можна стверджувати, що якщо поточні темпи деградації збережуться, більшість акумуляторних батарей сучасних електромобілів матиме довший термін служби, ніж сам автомобіль;

- середня річна швидкість деградації становить близько 2,3%, що означає, наприклад, що для акумулятора, який на початку експлу-

атації пропонує 250 км автономності, протягом перших п'яти років використання він втратить близько 28 км, що в середньому складає приблизно 5 км на рік [28].

Висновки

За результатами дослідження можна дійти до висновку, що з метою підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів проведений порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначено, що у електричних моделях доцільно враховувати зміну характеристик літій-іонних акумуляторних батарей, які відбуваються в процесі експлуатації електромобіля, а саме:

- зміну величини внутрішнього опору та опору поляризації;
- зміну величини ємності;
- деградацію акумуляторних батарей.

Зміну величини внутрішнього опору та опору поляризації слід враховувати в залежності від двох факторів: від стану заряду акумуляторної батареї та від ступеня її деградації. При чому якщо перший фактор можна враховувати лише при глибокому розряді акумуляторної батареї, коли $SoC < 30\%$, то другий фактор треба враховувати при будь-якої SoC . Збільшення внутрішнього опору акумуляторної батареї обмежує потужність електропривода, знижує динамічні властивості та ефективність транспортного засобу. Якщо величина внутрішнього опору зростає більш ніж на 100 % від початкового опору, то така акумуляторна батарея вважається непрацездатною для електромобілів. Але такі акумуляторні батареї можна повторно використовувати, наприклад, як накопичувачі електричної енергії від сонячних панелей в житловому секторі.

Зміну величини ємності слід враховувати в залежності від двох факторів: календарної та циклічної деградації. Календарна деградація є функцією часу, температури та SoC і виникає навіть тоді, коли акумуляторна батарея електромобіля не використовується. Циклічна деградація пов'язана з швидкістю заряду (зарядним струмом), кількістю циклів заряд-розряд та є функцією температури, пропускну здатності енергії та величини струму. Зменшенням ємності акумуляторної батареї електромобіля відповідно знижує дальність проїзду. Якщо величина ємності акумуляторної батареї електромобіля знижується більш ніж

на 20 % від початкової ємності, то така акумуляторна батарея вважається непрацездатною для електромобілів.

Деградацію акумуляторних батарей електромобілів визначають двома способами: за зменшенням ємності та зменшенням потужності. Побудовані моделі зменшення ємності *CF* (Capacity Fade) і зменшення потужності *PF* (Power Fade) на основі еквівалентної електричної схеми акумулятора Thevenin, які демонструють рівень погіршення технічних характеристик електромобіля. Вважається, що середня річна швидкість деградації акумуляторних батарей електромобілів становить близько 2,3% [28].

Визначено, що основними причинами погіршення характеристик акумуляторних батарей електромобілів є календарна деградація (термін служби) та деградація від кількості циклів заряд/розряд. При чому на термін служби найбільш впливає температура, *SoC*, час експлуатації, тоді як швидкість заряду, кількість циклів та *DoD* визначають циклічну деградацію. Але існує протилежне ствердження, що використання технології від акумуляторних батарей електромобілів до електромережі V2G знижує на 10 % процес деградації акумуляторних батарей [36].

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, а також у рамках науково-технічної роботи «Розроблення дослідного зразка енергоефективного колісного малогабаритного транспортного засобу подвійного використання», державний реєстраційний номер: 0122U200935, що фінансуються Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Hill, G., Heidrich, O., Creutzig, F., & Blythe, P. (2019). The role of electric vehicles in near-term mitigation pathways and achieving the UK's carbon budget. *Applied Energy*, 251, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.107>

2. Linn, J., & McConnell, V. (2019). Interactions between federal and state policies for reducing vehicle emissions. *Energy Policy*, 126, 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.052>
3. Dhar, S., Pathak, M., & Shukla, P. R. (2017). Electric vehicles and India's low carbon passenger transport: a long-term co-benefits assessment. *Journal of Cleaner Production*, 146, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.111>
4. Hao, H., Geng, Y., & Sarkis, J. (2016). Carbon footprint of global passenger cars: Scenarios through 2050. *Energy*, 101, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.089>
5. Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>
6. Eldeeb, H. H., Elsayed, A. T., Lashway, C. R., & Mohammed, O. (2019). Hybrid Energy Storage Sizing and Power Splitting Optimization for Plug-In Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2252–2262. <https://doi.org/10.1109/tia.2019.2898839>
7. Farhadi, M., & Mohammed, O. (2016). Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 1953–1961. <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2511096>
8. Bongartz, L., Shammugam, S., Gervais, E., & Schlegl, T. (2021). Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126056>
9. Urquizo, 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>
10. 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>
11. Hytowitz, A. N. (2023). Review of using the Dyop optotype for acuity and refractions per the article: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1888429622000656>. *Journal of Optometry*. <https://doi.org/10.1016/j.optom.2022.12.002>
12. Selvaraj, V., & Vairavasundaram, I. (2023). A comprehensive review of state of charge estimation in lithium-ion batteries used in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 72, 108777. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108777>
13. Rauf, H., Khalid, M., & Arshad, N. (2023). A novel smart feature selection strategy of lithium-

- ion battery degradation modelling for electric vehicles based on modern machine learning algorithms. *Journal of Energy Storage*, 68, 107577. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107577>
14. Wassiliadis, N., Kriegler, J., Gamra, K. A., & Lienkamp, M. (2023). Model-based health-aware fast charging to mitigate the risk of lithium plating and prolong the cycle life of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 561, 232586. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232586>
 15. Ando, K., Matsuda, T., & Imamura, D. (2018). Degradation diagnosis of lithium-ion batteries with a $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ and LiMn_2O_4 blended cathode using dV/dQ curve analysis. *Journal of Power Sources*, 390, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.043>
 16. Lewerenz, M., Münnix, J., Schmalstieg, J., Käbitz, S., Knips, M., & Sauer, D. U. (2017). Systematic aging of commercial LiFePO_4 |Graphite cylindrical cells including a theory explaining rise of capacity during aging. *Journal of Power Sources*, 345, 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.133>
 17. Li, P., Zhang, Z., Xiong, Q., Ding, B., Hou, J., Luo, D., Rong, Y., & Li, S. (2020b). State-of-health estimation and remaining useful life prediction for the lithium-ion battery based on a variant long short term memory neural network. *Journal of Power Sources*, 459, 228069. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228069>
 18. Hossain, E., Murtaugh, D., Mody, J., Faruque, H. M. R., Haque Sunny, M. S., & Mohammad, N. (2019). A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. *IEEE Access*, 7, 73215–73252. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2917859>
 19. He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*, 4(4), 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>
 20. Avadikyan, A., & Larrue, P. (2003). The Partnership for a New Generation of Vehicles and the US DoE Transportation Fuel Cells Programme. *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies* (c. 133–158). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24822-4_6
 21. 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>
 22. da Silva, S. F., Eckert, J. J., Corrêa, F. C., Silva, F. L., Silva, L. C. A., & Dedini, F. G. (2022b). Dual HESS electric vehicle powertrain design and fuzzy control based on multi-objective optimization to increase driving range and battery life cycle. *Applied Energy*, 324, 119723. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119723>
 23. On the Ageing of High Energy Lithium-Ion Batteries—Comprehensive Electrochemical Diffusivity Studies of Harvested Nickel Manganese Cobalt Electrodes. (2018). *Materials*, 11(2), 176. <https://doi.org/10.3390/ma11020176>
 24. Jiang, J., & Zhang, C. (2015). *Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. Wiley & Sons, Limited, John.
 25. Assunção, A., Moura, P. S., & de Almeida, A. T. (2016). Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy. *Applied Energy*, 181, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.056>
 26. Adnan Khan, M. S., Kadir, K. M., Mahmood, K. S., Ibne Alam, M. I., Kamal, A., & Al Bashir, M. M. (2019). Technical investigation on V2G, S2V, and V2I for next generation smart city planning. *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(4), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100010>
 27. İnci, M., Savrun, M. M., & Çelik, Ö. (2022). Integrating electric vehicles as virtual power plants: A comprehensive review on vehicle-to-grid (V2G) concepts, interface topologies, marketing and future prospects. *Journal of Energy Storage*, 55, 105579. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105579>
 28. Borge-Diez, D., Icaza, D., Açıklalp, E., & Amaris, H. (2021b). Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share. *Energy*, 237, 121608. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121608>
 29. Uddin, K., Jackson, T., Widanage, W. D., Chouchelamane, G., Jennings, P. A., & Marco, J. (2017). On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system. *Energy*, 133, 710–722. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.116>
 30. Timilsina, L., Badr, P. R., Hoang, P. H., Ozkan, G., Papari, B., & Edrington, C. S. (2023). Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3271287>
 31. Meng, J., Cai, L., Stroe, D.-I., Luo, G., Sui, X., & Teodorescu, R. (2019). Lithium-ion battery state-of-health estimation in electric vehicle using optimized partial charging voltage profiles. *Energy*, 185, 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.127>
 32. Jin, X. (2022). Aging-Aware optimal charging strategy for lithium-ion batteries: Considering aging status and electro-thermal-aging dynamics. *Electrochimica Acta*, 407, 139651. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139651>
 33. 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>
34. Wang, D., Coignard, J., Zeng, T., Zhang, C., & Saxena, S. (2016). Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services. *Journal of Power Sources*, 332, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.116>
35. Ng, K. S., Moo, C.-S., Chen, Y.-P., & Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506–1511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021>
36. Uddin, K., Dubarry, M., & Glick, M. B. (2018). The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy*, 113, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015>
37. EV Battery Health: What 6,000 EV Batteries Tell Us | Geotab. (2020). Geotab. <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>

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>

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

Comparative analysis of electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles

Abstract. Problem. This article addresses the challenge of enhancing the environmental friendliness and energy efficiency of vehicles. It does so by conducting a comparative analysis and identifying ways to improve the electrical models of lithium-ion batteries used in electric vehicles. The study includes an examination of well-known electrical models of lithium-ion rechargeable batteries, such as the Rint model, the RC model, the Thevenin model, and the PNGV model. It identifies key characteristics of lithium-ion batteries in electric vehicles, including state of charge, mass, actual voltage, energy required for recharging, among others. The study also explores models of battery degradation, focusing on capacity reduction and the increase in active resistance. It substantiates directions for improving electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles by considering changes in capacity, internal resistance, polarization resistance, and both calendar and cyclic degradation. **Goal.** The aim of this work is to enhance the environmental friendliness and

energy efficiency of vehicles through a comparative analysis and by determining ways to improve the electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles. **Methodology.** Our approach to achieving this goal involves using electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles, which describe various parameters such as state of charge, actual voltage during charge/discharge processes, and energy required for recharging. The study encompasses an investigation into the degradation of electric vehicle batteries, including their use in Vehicle to Grid (V2G) technology. **Results.** The analysis of electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles, aiming to increase their accuracy, considers the following aspects: changes in internal resistance and polarization resistance; capacity variation; and battery degradation. The change in internal resistance and polarization resistance should be considered based on two factors: the state of charge of the battery and the degree of its degradation. While the first factor is relevant primarily when the battery is deeply discharged (SoC<30%), the second factor must be considered at any state of charge. Capacity changes should be accounted for based on calendar and cyclic degradation. It has been determined that the primary causes of degradation in electric vehicle batteries are calendar aging (service life) and aging due to charge/discharge cycles. Contrarily, it is argued that using Vehicle to Grid (V2G) technology can reduce battery degradation by 10%. **Originality.** The results of this study provide a comprehensive understanding of the electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles and contribute to the improvement of existing models. **Practical value.** This research enhances the accuracy of current electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles by considering the variable nature of internal resistance and capacity during vehicle operation. It may be valuable in assessing the residual parameters of electric vehicle batteries during their secondary use, such as in the residential sector for solar energy support. The findings can be recommended to scientific and technical professionals involved in developing energy storage systems for electric vehicles.

Key words: electric vehicle; lithium-ion battery; electric model; efficiency; state of charge; energy storage system, battery degradation

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, smirnov1oleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

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

Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму

Багач Р. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті розглядаються дослідження тягових акумуляторів і систем зарядки електромобілів. Наведено порівняльний аналіз характеристик Li-Ion, Li-Fe-PO₄ і Li-Ti акумуляторів. Як перетворювачі для зарядних станцій електромобілів у статті пропонується використовувати активні випрямлячі для джерел напруги та активні випрямлячі для джерел струму. З використанням Matlab/Simulink розроблено модель зарядної станції, що містить активний випрямляч для джерела струму з номінальною потужністю 240 кВт. Ця станція заряджає батарею ємністю 60 кВт/год, що містить накопичену енергію. У статті також окреслено перехідні процеси перетворювача та спектр вищих гармонік вхідного струму.

Ключові слова: зарядні станції для електромобілів, випрямляч джерела напруги, випрямлячі джерела струму, літій-іонні акумулятори, літій-залізо-фосфатні акумулятори, літій-титанові акумулятори.

Вступ

На тлі стрімкого зростання вартості бензину, а також зниження вартості літєвих тягових акумуляторних батарей, спостерігається подальша тенденція переходу автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на електромобілі. В даний час кількість електромобілів становлять приблизно 12% від загальної кількості в Європі та 20% у Китаї, і їх кількість продовжує зростати, що підтверджує актуальність представленого дослідження [1, 2]. Для подальшого розвитку електромобілів актуальними є розробка та вдосконалення енергетичних показників акумуляторів електромобілів, а також перетворювачів зарядних станцій електромобілів, які забезпечують можливість забезпечення режиму швидкої зарядки. У кожному з цих напрямків спостерігається активний розвиток [3-6].

Аналіз публікацій

З ростом кількості електромобілів важливим питанням є створення енергоефективних зарядних станцій. До зарядних станцій електромобілів висуваються вимоги за наступни-

ми показниками: можливість режиму швидкої зарядки, ККД, коефіцієнт потужності, можливість двонаправленої передачі електроенергії, рівень емісії вищих гармонік та інші показники електромагнітної сумісності [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.

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

В роботі [10] запропоновано схему зарядної станції електромобілів, що працює від

трифазної електричної мережі змінного струму на базі трифазного трирівневого активного випрямляча напруги в режимі корекції коефіцієнту потужності. Варто зазначити, що перевагою запропонованого технічного рішення є можливість забезпечення режиму формування синусоїдальної форми вхідного струму з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці. Проте суттєвим недоліком запропонованого рішення є необхідність використання схеми трирівневого активного випрямляча, яка вимагає збільшеної кількості силових транзисторів та діодів, що відповідно зумовлює більш високу вартість перетворювача зарядної станції та більші сумарні втрати потужності в перетворювачі.

В роботах [11, 12] представлено схожі дослідження бортових зарядних перетворювачів літій-іонних акумуляторів електромобілів, що живляться від трифазної електричної мережі на базі трифазного випрямляча з послідовним з'єднанням LLC резонансного перетворювача [11], або повномостового LLC резонансного перетворювача [12]. Представлені технічні рішення дозволяють забезпечити вимоги електромагнітної сумісності перетворювачів зарядних станцій та живлячих трифазних мереж, проте мають спільний суттєвий недолік, а саме необхідність багатоступінчатого перетворення електроенергії за принциповою схемою «активний випрямляч-високо частотний інвертор-високо частотний трансформатор-випрямляч». Недоліком такого технічного рішення є досить високі втрати потужності і досить низький ККД перетворювальної системи.

Перетворювач зарядної станції електромобілів також може бути реалізовано на базі трифазних діодних, або тиристорних випрямлячів. У такому випадку для поліпшення електромагнітної сумісності системи зарядної станції для електромобілів з суміжними електроустановками та підвищення якості енергії живлення зарядної станції для електромобілів можливе використання систем, як пасивної, так і активної фільтрації [13, 14]. Недоліком такого технічного рішення, є також необхідність застосування додаткового перетворювача, а саме паралельного тріфазного силового активного фільтра в складі зарядної станції, що підвищить якість електричної енергії, але збільшить втрати потужності та знизить ККД системи заряду.

В роботах [15-17] представлено дослі-

дження параметрів акумуляторних блоків електромобілів, виконаних на базі суперконденсаторів, літій-іонних батарей, свинцево-кислотний акумуляторів та паливних елементів. Недоліком даних досліджень є відсутність дослідження більш перспективних типів літійєвих акумуляторів, а саме літій-залізо-полімерних та літій-титанових акумуляторів, які мають значно більшу кількість циклів заряду-розряду, що суттєво збільшує їх довговічність та значно більші величини робочих струмів, ніж літій-іонні акумулятори, внаслідок чого на їх базі можна реалізувати режими надшвидкої зарядки.

Таким чином в дослідженнях було обрано напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом використання активних випрямлячів з режимами активної корекції коефіцієнта потужності та оптимального налаштування.

Данні дослідження проведені на кафедрі «Автомобільної електроніки» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету відповідно до держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження прогресивних технологій для автомобільного транспорту», виконаної у 2022-2023 рр. та науково-дослідної роботи «Розробка комбінованої енергетичної установки на базі пневмодвигуна з використанням поновлювальних джерел енергії для міського автотранспорту» (№ ДРН 0121U109611), 2022 р.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є провести порівняльний аналіз різних типів тягових акумуляторних батарей для електромобілів на прикладі автомобілів TESLA: приводиться порівняльна характеристика літій-іонних, літій-залізо-фосфатних та літій-титанових акумуляторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- теоретичне обґрунтування перспективності застосування літій-залізо-фосфатних та літій-титанових акумуляторів;
- перетворювачів зарядних станцій електромобілів, а саме трифазних активного випрямляча джерела напруги та активного випрямляча джерела струму;
- дослідження схеми чотириквadrантних випрямлячів зарядних станцій;
- моделювання зарядних станцій елект-

ромобілів на базі випрямляча джерела напруги та випрямляча джерела струму.

Літєві акумулятори електромобілів

Режими роботи перетворювачів зарядних станцій визначаються необхідними режимами зарядки тягових акумуляторів електромобілів. Більшість електромобілів використовують літій-іонні, літій-залізо-фосфатні та літій-титанатні акумулятори. Ці типи тягових

акумуляторів істотно відрізняються за кількістю циклів заряд-розряд, максимальним зарядним струмом і різним рівнем деградації ємності при мінусовій температурі. Порівняння характеристик тягових акумуляторів проводилось за такими типами акумуляторів: літій-іонний акумулятор NCR18650 [18], Li-Fe-PO₄ [19], Li-Ti [20]. Порівняльні характеристики цих літєвих акумуляторів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1–Характеристики літєвих акумуляторів

Параметр	Li-Ion	Li-Fe-PO ₄	Li-Ti
Ємність одного акумулятора	3,35 А·год	1,6 А·год	40 А·год
Потужність одного акумулятора	12 Вт	5,12 Вт	112 Вт
Вага одного акумулятора	41 г	49 г	1кг
Кількість робочих циклів при деградації ємності до 80% від початкової	300	3900	30 000
Питома щільність енергії батареї до об'єму	676 Wh/L	220 Wh/L	176 Wh/L
Питома щільність енергії батареї до її маси	248 Wh/kg	124 Wh/kg	89 Wh/kg
Рекомендований струм заряду розряду	0,5C	1C	5C
Максимальний тривалий струм заряду	2C	1C	10C
Максимальний тривалий струм розряду	2C	3C	10C
Внутрішній опір однієї батареї	≤37 мОм	≤40 мОм	≤1 мОм
Деградація ємності батареї при температурі -20С	55% rated capacity	50% rated capacity	80% rated capacity

Крім того, різні типи літєвих акумуляторів мають різну інтенсивність падіння напруги при розряді. Зарядна характеристика Li-Ion, Li-Fe-PO₄ і Li-Ti акумуляторів представлена на рис. 1.

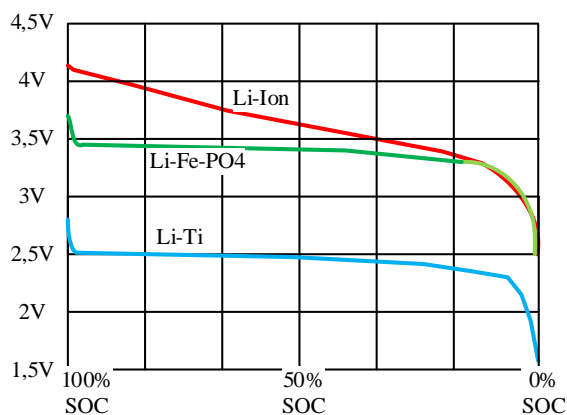


Рис. 1. Залежність напруги батареї від стану заряду (SOC)

Як видно з рис. 1, найбільш плоскі характеристики можна знайти у літій-залізо-

фосфатних і літій-титанатних акумуляторів, так що протягом години після розряду напруга на них буде знижуватися на нижчому рівні.

З порівняльного аналізу можна зробити наступні висновки:

- літій-іонні акумулятори мають найкращі показники питомої потужності, проте вони не мають можливості працювати з великими струмами більше 3C, мають досить погані показники деградації ємності при мінусових температурах та мають досить невелику кількість робочих циклів. Крім того під час їх розряду спостерігається стрімке зниження напруги. Крім того літій-іонні акумулятори мають дуже низькі показники внутрішнього опору, внаслідок чого внутрішні втрати потужності в них є найменшими;

- літій-титанатні акумулятори мають найкращі показники за величинами струмів заряду/розряду, які мають значення більше 10C та мають найкращі показники кількості робочих циклів які складають більше 30000;

– літій-залізо-фосфатні акумулятори мають проміжні показники, проте мають досить високу кількість циклів заряду-розряду, напруга на батареї під час розряду знижується не так стрімко, як у літій-іонних акумуляторів. При цьому вони є суттєво дешевшими за літій-титаннатні акумулятори і з урахування техніко-економічних показників є досить цікавими рішенням.

З огляду розглянутих характеристик, для застосування в блоках електромобілів літій-іонні акумулятори мають занадто малу кількість циклів заряду-розряду, яка не дає змоги реалізації бажаного терміну експлуатації електромобіля 10-12 років. Таким чином батарейний відсік літій-іонного акумулятора за цей термін треба буде міняти 3-4 рази. Цей тип акумуляторів застосовується в Tesla Model S.

Літій-залізо-фосфатні акумулятори мають більше 3900 циклів заряду-розряду, що дасть змогу працювати електромобілю з цим типом акумуляторів близько 10 років (при умові розряду батареї за одну добу). У той же час вони дають можливість досить швидкого режиму заряду батареї (повний заряд до 20 хв).

Найкращим типом тягових акумуляторів з погляду мінімізації часу заряду електромобіля (до 10 хв) та найбільшої кількості циклів заряду батареї є літій-титаннатні акумулятори. Також вони підходять для застосування, що зумовлено десятиліттям роботи батарей.

Зазначені характеристики літєвих акумуляторів є досить різними, проте у той же час принципово для цих типів тягових акумуляторних батарей використовуються однотипний тип заряду «постійний струм – постійна напруга».

Режим заряду постійний «постійний струм – постійна напруга» зумовлює алгоритм, при якому батарея спочатку заряджається постійним струмом. В ході заряду напруга на батарейному блоці зростає. Після досягнення напруги батареї її зарядженого значення, перетворювач переходить в режим джерела постійної напруги, під час якого струм заряду прямує до нуля, що зображено на рис. 2.

Таким чином зарядний перетворювач повинен мати можливість регулювання вихідного струму та можливість підтримання постійної напруги.

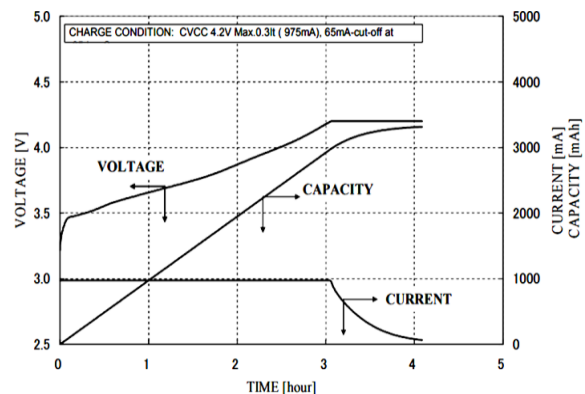


Рис. 2. Режим заряду «постійний струм – постійна напруга»

Активний опір блоку акумуляторних батарей

Розглянемо опір навантаження блоку літій-іонних акумуляторів на прикладі блоку акумуляторних батарей Tesla Model S та літій-залізо-фосфатних батарей Tesla Model S

Батарейний відсік в автомобілі Tesla Model S має ємність 85 кВт·год та складається з 7104 елементів літій-іонних батарей виробництва компанії Panasonic типу NCR18650b. Схему заміщення блоку акумуляторних батарей електромобіля Tesla Model S зображено на рис. 3.

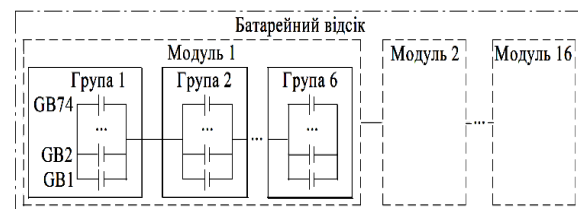


Рис. 3. Схема заміщення блоку акумуляторних батарей електромобіля Tesla Model S

У батарейному відсіку 74 окремі батареї типу NCR-18650b з'єднуються паралельно у групи, 6 послідовних груп з'єднані в модулі, а 16 послідовних модулів і складають повний батарейний відсік електромобіля. Виходячи з того, що внутрішній середній опір одного акумулятора $R_{NCR} = 37 \text{ мОм}$ еквівалентний опору батарейного відсіку $R_{bat} = 48 \text{ мОм}$.

Відповідно при застосування літій-залізо-фосфатних чи літій-титаннатних батарей, активний опір батарейного відсіку буде ще меншим.

Таким чином блок літій-іонних акумуляторів може бути змодельованим, як протипові ЕРС напруги батареї, яка залежить від величини заряду, та активного опору навантаження. При чому напруга блоку акумулятор-

них батарей в зарядженому режимі складає 400 В, а в повністю розрядженому 240 В.

Варто зазначити, що навіть в одній партії тягові акумуляторні батареї можуть мати досить суттєвий розкид параметрів. Таким чином за умови наявності в батарейному відсіку великої кількості окремих акумуляторів необхідно застосування системи балансування напруг в окремих батареї та їх групах [21, 22].

Схеми чотириквadrантних випрямлячів зарядних станцій

Запропоновано реалізацію режиму заряду акумуляторного блоку «постійний струм-постійна напруга» за схемами трифазного дворівневого активного випрямляча джерела напруги та трифазного дворівневого активного випрямляча джерела струму, схеми яких представлені на рис. 4.

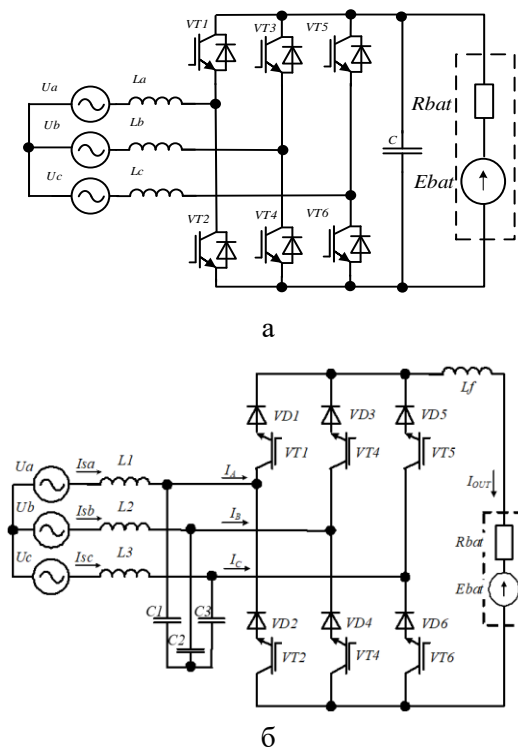


Рис. 4. Схеми перетворювачів зарядних станцій електромобілів: а – активний випрямляч джерела напруги; б – активний випрямляч джерела струму

В активному випрямлячі джерела струму при умові невеликого рівня напруги в ланці постійного струму, яка для деяких моделей зарядних станцій електромобілів складає 400 В (Tesla supercharger V3), діоди в схемі

можуть не застосовуватись.

Перевагою цих перетворювачів у порівнянні з класичними тиристорними випрямлячами є можливість роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці, формування синусоїдального вхідного струму, що відповідає вимогам електромагнітної сумісності, а саме рівня емісії вищих гармонік вхідного струму, а також можливість реалізації двосторонньої передачі електроенергії [23-24]. Завдяки даному функціоналу перетворювачі зарядних станцій можуть передавати енергію від акумуляторних батарей до трифазної електричної мережі, що відповідає тенденції створення інтелектуальних систем електропостачання [23].

Активний випрямляч – джерело напруги

Активний випрямляч джерела напруги є підвищуючим випрямлячем. Тобто для реалізації режиму корекції потужності та формування синусоїдального вхідного струму амплітуда вхідної лінійної напруги перетворювача має бути нижчою за вихідну напругу перетворювача [24]. Таким чином, при умові, що напруга розрядженого блоку акумуляторних батарей складає 240 В і під час заряду зростає до величини 400 В, величина середньоквадратичного значення вхідної фазної напруги активного випрямляча напруги має складати 100 В. Таким чином для випрямляча джерела напруги в застосуванні зарядного перетворювача обов'язковим є застосування вхідного понижуючого трансформатора.

Таким чином, вимогою для активного випрямляча джерела напруги є необхідність живлення досить низьким рівнем вхідної напруги і відповідно досить високої величини вхідного струму, що зумовлює велике навантаження на мережу та великі втрати потужності в силових транзисторах.

Активний випрямляч - джерело струму

Активний випрямляч джерела струму є понижуючим перетворювачем, що зумовлює можливість живлення перетворювача більш високою напругою і відповідно меншими споживаними з мережі струмами [25]. Крім цього випрямлячі струму та випрямлячі напруги мають суттєві різниці при побудові систем керування та алгоритмів просторово-векторної модуляції.

Алгоритми розрахунку просторових век-

торів в просторово-векторній модуляції є дія та можливі комутаційні стани є різними. Вектори напруги та просторові значення векторів активного випрямляча напруги та активного випрямляча струму представлені на рис. 5.

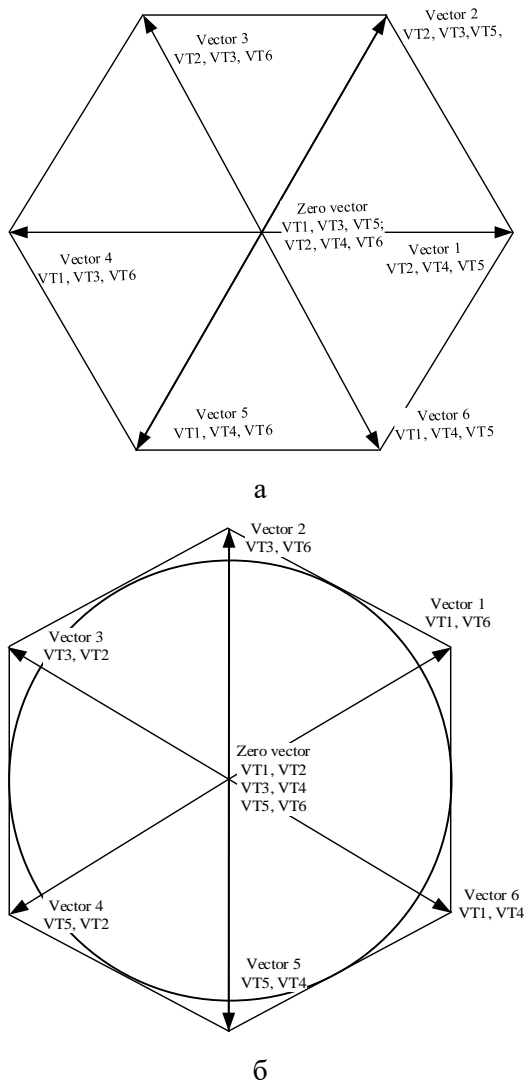


Рис. 5. Базові просторові вектори в системі керування перетворювачів: а – активний трифазний випрямляч джерело напруги; б – активний трифазний випрямляч джерело струму

Як видно з рис. 5, вектори просторово-векторної модуляції зумовлюють різні комутаційні стани силових транзисторів активних випрямлячів. Це пов'язано з тим, що, на відміну від випрямляча джерела активної напруги, випрямляч джерела активного струму дозволяє включати тільки два силових транзистора на кожен вектор, що може призвести до менших втрат потужності.

Моделювання зарядних станцій електромобілів на базі випрямляча джерела напруги та випрямляча джерела струму

Для визначення характеристик перетворювачів зарядних станцій електромобілів на основі активного випрямляча струму та активного випрямляча напруги було розроблено моделі відповідних перетворювачів в Matlab / Simulink.

Розроблені моделі відповідають потужності зарядних станцій електромобілів Tesla Supercharger V3 з потужністю 240 кВт та вихідною напругою в режимі постійна напруга 400 В. Параметри моделі наведено у таблиці 2, а сама модель представлена на рис. 6.

Matlab модель зарядної станції електромобілів складається з наступних елементів:

- субмодель трифазної мережі електропостачання 380В;
- блоку вимірювачів миттєвих значень вхідних струмів та напруг перетворювача зарядної станції;
- вхідного LC-фільтра перетворювача зарядної станції;
- трифазного мостового активного випрямляча струму;
- вихідного індуктивного фільтра;
- еквівалентного навантаження зарядної станції;
- активного опору блоку акумуляторних батарей та напруги заряду батарей, яка залежить від поточного значення заряду;
- системи керування перетворювача зарядної станції;
- субблоку розрахунку коефіцієнта потужності зарядної станції та коефіцієнта гармонійних спотворень вхідного струму.

Таблиця 2 – Параметри моделі Matlab зарядної станції електромобіля

Параметр	Значення
Вхідна напруга (змінна)	3x380 В
Індуктивність вхідного фільтра	1 мГн
Ємність вхідного фільтра	500 мкФ
Частота ШІМ	1000 Гц
Індуктивність вихідного фільтра	2 мГн
Опір навантажень	20 мОм
Ємність акумулятора	60 кВт·год
Потужність швидкої зарядки	240 кВт
Номінальна напруга акумулятора	340 В
Максимальна напруга акумулятора	400 В

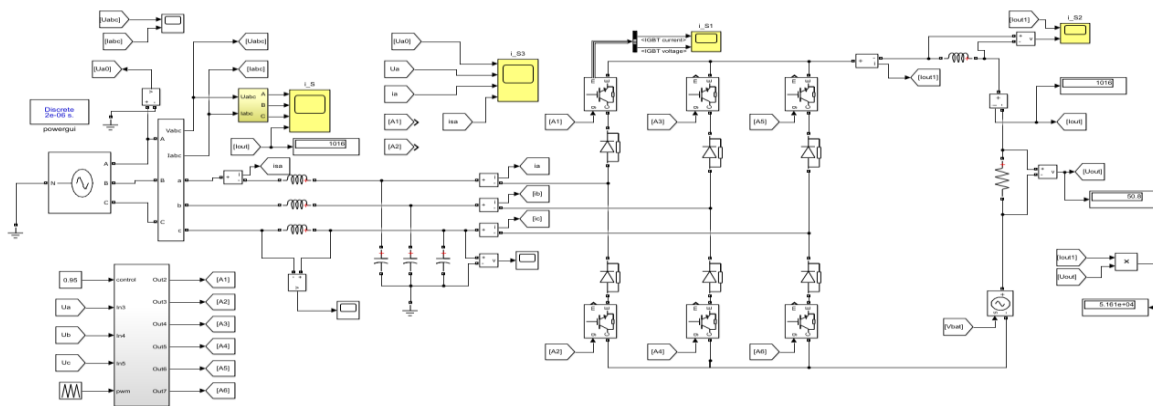


Рис. 6. Matlab модель зарядної станції електромобілів на базі трифазного активного випрямляча джерела струму

Субмодель тягової акумуляторної батареї «активний опір та напруга батареї, що залежить від заряду»

Подальшим напрямом досліджень є порівняльний аналіз втрат потужності випрямляча джерела струму та випрямляча і джерела напруги. Крім цього, цікавими є дослідження, що спрямовані на створення силового активного фільтра на базі активного випрямляча джерела струму. Форма вхідного струму та вхідної напруги зарядної станції в трьох фазах та форма вихідного струму під час заряду представлена на рис. 7.

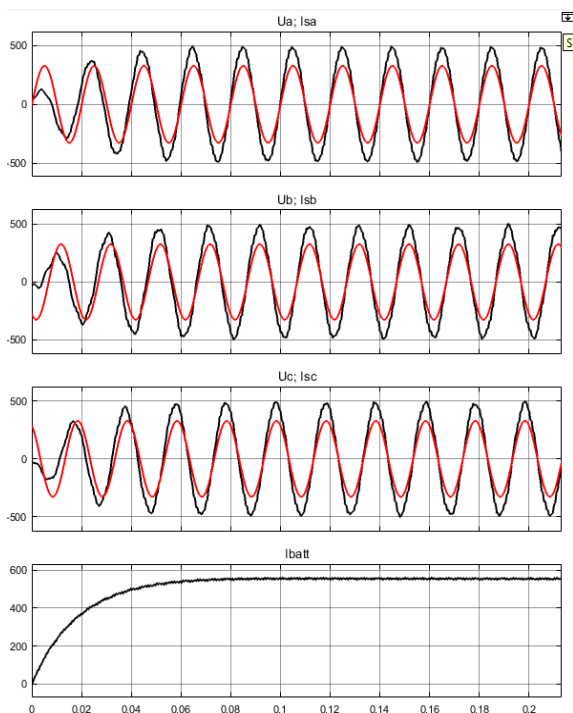


Рис. 7. Форма вхідного струму та вхідної напруги зарядної станції в трьох фазах та форма вихідного струму під час заряду

Повний процес заряду тягової акумуляторної батареї складає 15 хв. Перехідний процес повного заряду представлено на рис. 8.

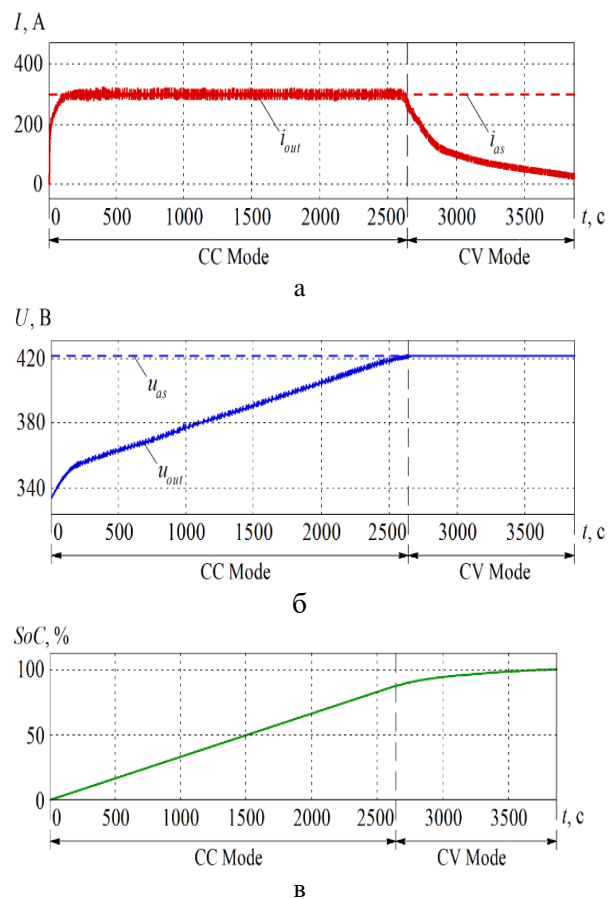


Рис. 8. Перехідні процеси заряду тягової акумуляторної батареї: а – струм заряду батареї; б – напруга на батареї; в – ємність батареї

На рис. 9 представлена форма та гармонічний склад вхідного струму активного випрямляча.

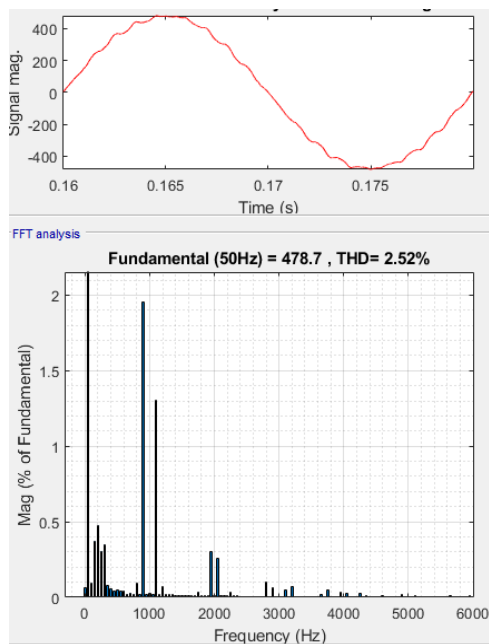


Рис. 9. Форма та гармонійний склад вхідного струму активного випрямляча

Частота найбільшої гармоніки вхідного струму активного випрямляча відповідає частоті широтно-імпульсної модуляції (1кГц) а її відносно амплітуда складає менше ніж 2 відсотки від амплітуди основної (першої гармоніки).

Як видно з рис. 9, коефіцієнт гармонійних спотворень форми вхідного струму зарядної станції та електромобіля становить 2,52%, що відповідає вимогам стандартів електромагнітної сумісності щодо випромінювання вищих гармонік в мережу електропостачання від потужних перетворювачів.

Висновки

У статті досліджено характеристики тягових акумуляторних батарей електромобілів та проведено порівняльний аналіз літій-іонних, літій-залізо-фосфатних і літій-титанатних акумуляторів. У висновку підкреслюється потенціал для використання літій-залізо-фосфатних і літій-титанатних батарей. Пропоновані схеми перетворювачів для зарядних станцій електромобілів включають трифазні випрямлячі джерел активної напруги та випрямлячі активних джерел струму. Деталізовано силові схеми цих перетворювачів і просторово-векторні комутаційні стани силових транзисторів. У статті робиться висновок, що випрямляч активного струму може запропонувати більш перспективну топологію.

Модель зарядної станції, розроблена за допомогою програми Matlab/Simulink і заснована на випрямлячі активного струму, поєднує характеристики, зарядною станцією Tesla Superchargers. Прототип зарядного блоку моделі розроблений на базі зарядного пристрою Tesla Model S ємністю 60 кВт/год.

У рамках моделі визначено перехідні процеси роботи перетворювача та порядок зарядки акумуляторного блоку ємністю 60 кВт/год. Примітно, що випрямляч активного струму визначено як такий, що сприяє регулюванню зарядного струму акумулятора, досягає коефіцієнта потужності, що наближається до одиниці, і підтримує мінімальний рівень випромінювання вищих гармонік, про що свідчить коефіцієнт гармонійних спотворень 2,52%.

Література

1. Грома, Я. В., & Глущенко, Я. І. (2019). Порівняльний аналіз ринку електромобілів в Україні та світі. Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», (16). Hroma, Ya. V., & Hlushchenko, Ya. I. (2019). Porivnialnyi analiz rynku elektromobiliv v Ukraini ta sviti. [Comparative analysis of the electric car market in Ukraine and the world.] Ekonomichnyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», (16). [in Ukrainian].
2. Олішевська, В. Є., & Олішевський, Г. С. (2023). Потенціал і конкурентоспроможність електромобілів. Olishevska, V. Ye., & Olishevskiy, H. S. (2023). Potentsial i konkurentospromozhnist elektromobiliv. [Potential and competitiveness of electric vehicles] [in Ukrainian].
3. Гончар, І. А., & Пальян, З. О. (2018). Статистичний аналіз розвитку ринку електроавтомобілів в Україні: проблеми, шляхи вирішення. Статистика України, (2), 13-21. Honchar, I. A., & Palian, Z. O. (2018). Statystychnyi analiz rozvytku rynku elektroavtomobiliv v Ukraini: problemy, shliakhy vyrishennia. [Statistical analysis of the development of the electric car market in Ukraine: problems, solutions] Statystyka Ukrainy, (2), 13-21. [in Ukrainian].
4. Borodenko, Y., Arhun, S., Hnatov, A., Kunicina, N., Bisenieks, M., Migal, V., & Hnatova, H. (2023). Diagnostics of electric drive Electric vehicle with Valve Motor. Przegląd Elektrotechniczny, 99(6).
5. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Saraiev, O. (2022, May). Features of converting a car with an internal combustion engine into an electric car. In 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON) (pp. 1-6). IEEE.

6. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon) (pp. 248-253). IEEE.
7. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Машура, А. В., & Гордієнко, Д. А. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання 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 akumuliatornykh 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].
8. Будько, В. І. (2016). Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні. Відновлювана енергетика, (4), 32-41. Budko, V. I. (2016). Analiz dotsilnosti vprovadzhennia zariadnykh stantsii elektromobiliv na osnovi vidnovliuvanykh dzherel enerhii v Ukraini. [Analysis of the feasibility of introducing charging stations for electric vehicles based on renewable energy sources in Ukraine] Vidnovliuvana enerhetyka, (4), 32-41. [in Ukrainian].
9. Будько, В. І. (2017). Аналіз особливостей роботи та специфіки зарядних режимів нікель-металогідридних та літійєвих акумуляторних батарей. Budko, V. I. (2017). Analiz osoblyvostei roboty ta spetsyfyky zariadnykh rezhymiv nikel-metalohidrydnykh ta litiievnykh akumuliatornykh batarei. [Analysis of features of operation and specifics of charging modes of nickel-metal hydride and lithium storage batteries] [in Ukrainian]
10. 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.
11. RB, A. S., & Sindhu, M. R. (2022, November). On-Board EV Charging with VIENNA Rectifier and LLC Resonant Converter. In 2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON) (pp. 1-6). IEEE.
12. Chaurasiya, S., & Singh, B. (2021, November). A 7.2 kW Off-Board EV Charger Based on Vienna Rectifier and FB-LLC Resonating Converter. In 2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON) (pp. 1-6). IEEE.
13. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Scherbak, Y., Mashura, A., & Khomenko, I. (2020, October). Energy efficiency criterion of power active filter in a three-phase network. In 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (pp. 165-170). IEEE.
14. Bayhan, S., & Komurcugil, H. (2022, October). A T-Type converter-based Electric Vehicle Charger with Active Power Filter Functionality. In IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-6). IEEE.
15. Hnatov, A., & Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. International journal of automotive and mechanical engineering, 14(4), 4649-4664.
16. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., & Hordiienko, D. (2020, April). The analysis of mathematical models of charge-discharge characteristics in lithium-ion batteries. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 635-640). IEEE.
17. Smagin, D. I., Trofimov, A. A., Napreenko, K. S., & Neveshkina, A. R. (2020). Mathematical model of lithium-ion battery cell and battery (Lib) on its basis. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 714, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
18. Корнющенко, Г. С., Наталіч, В. В., Нагорний, В. В., Парфененко, Ю. В., Мокренко, О. А., & Шевченко, С. Т. (2021). Закономірності формування нанопористих ZnO, C, C/ZnO і ZnO/NiO для потенційного застосування у якості електродів літій-іонних акумуляторів. Сумський державний університет. Korniyushchenko, H. S., Natalich, V. V., Nahornyi, V. V., Parfenenko, Yu. V., Mokrenko, O. A., & Shevchenko, S. T. (2021). Zakonomirnosti formuvannia nanoporystykh ZnO, C, S/ZnO i ZnO/NiO dlia potentsiinoho zastosuvannia u yakosti elektrodov litiu-ionnykh akumuliatoriv. [Patterns of formation of nanoporous ZnO, C, C/ZnO and ZnO/NiO for potential use as electrodes of lithium-ion batteries]. Sumskiy derzhavnyi universytet. [in Ukrainian]
19. Copy rights belongs to Antbatt Co. Ltd. 2019. [www.antbatt.com.https://www.antbatt.com/wp-content/uploads/2019/09/18650-3.2V-1600mAh-datasheet.pdf](https://www.antbatt.com/wp-content/uploads/2019/09/18650-3.2V-1600mAh-datasheet.pdf)
20. GWL a.s. Průmyslová 11, 102 00 Prague 10 Czech Republic, European Union. [www.gwl.eu.https://files.gwl.eu/inc/doc/attach/StoItem/6991/LTO-40AH-CY_datasheet.pdf](https://files.gwl.eu/inc/doc/attach/StoItem/6991/LTO-40AH-CY_datasheet.pdf)
21. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Ananieva, O., Khoruzhevskiy, H., & Kavun, V. (2019). In the cells of a modular six-level inverter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(8), 102.

19. Xu, D., Wang, L., & Yang, J. (2010, June). Research on li-ion battery management system. In 2010 International conference on electrical and control engineering (pp. 4106-4109). IEEE.
20. Rodríguez, J. R., Dixon, J. W., Espinoza, J. R., Pontt, J., & Lezana, P. (2005). PWM regenerative rectifiers: State of the art. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52(1), 5-22.
21. Lu, D., Wang, X., & Blaabjerg, F. (2018, June). Investigation on the AC/DC interactions in voltage-source rectifiers and current-source rectifiers. In 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (pp. 1-6). IEEE.
22. Li, Y. W., Pande, M., Zargari, N., & Wu, B. (2009). Power-factor compensation for PWM CSR–CSI-fed high-power drive system using flux adjustment. IEEE Transactions on Power Electronics, 24(12), 3014-3019.
23. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Ananieva, O., & Zinchenko, O. (2019). Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. Industry 4.0, 4(4), 179-193.
24. Zhemerov, G., Plakhtii, O., & Mashura, A. (2020, September). 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) (pp. 37-42). IEEE.
25. Rodríguez, J. R., Pontt, J., Silva, C., Wiechmann, E. P., Hammond, P. W., Santucci, F. W., & Lezana, P. (2005). Large current rectifiers: State of the art and future trends. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52(3), 738-746.
26. Zhang, Y., & Li, Y. W. (2015). Grid harmonics compensation using high-power PWM converters based on combination approach. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 4(1), 186-197.

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.

Research of battery units of electric vehicles and charging stations based on current.

Abstract. Problem. The proliferation of electric vehicles has underscored the need for the development of energy-efficient charging stations and systems. These systems must deliver high efficiency, maintain a power factor close to unity, adhere to electromagnetic compatibility standards, emit low levels of higher harmonics, and enable fast charging capabilities. Current electric vehicle

charging devices encounter issues such as significant power losses, high harmonic emissions to the power grid, and challenges in implementing fast charging modes. Consequently, enhancing the energy efficiency of charging stations – by reducing power losses, minimizing harmonic emissions, ensuring a high power factor, and supporting modes for regulated current and voltage sources for fast charging – is a pressing concern. **Goal.** The aim of this work is to perform a comparative analysis of different types of batteries for electric vehicles, exemplified by TESLA cars, presenting comparative characteristics of lithium-ion, lithium-iron-phosphate, and lithium-titanate batteries. **Methodology.** The study showcases an evaluation of battery units for electric vehicles and outlines a comparative assessment of lithium-ion, lithium-iron-phosphate, and lithium-titanate batteries. The research focuses on enhancing the energy efficiency of electric vehicle charging station systems through the use of active rectifiers, with modes for active power factor correction and optimal configuration. **Results.** An examination of the quality of converters for electric vehicle charging stations was conducted, proposing schemes for a three-phase active voltage source rectifier and an active current source rectifier. Power circuitry and space-vector switching states for power transistors are introduced. Analysis concludes that an active current rectifier may be a more promising topology. **Originality.** A model of a charging station based on an active current source rectifier was developed using Matlab/Simulink. Transient processes of the converter's operation and the charging of a 60 kWh battery pack were examined. It was found that the active rectifier facilitates regulation of the battery charging current, achieves a power factor close to unity, and maintains a low level of higher harmonic emissions with a harmonic distortion factor of 2.52%. **Practical value.** The advancement of electric vehicles necessitates the ongoing development and enhancement of the energy indicators for electric vehicle batteries and the converters of charging stations, especially those that enable fast charging. Active progress is being made in each of these areas.

Key words: charging stations for electric vehicles, voltage source rectifier, current source rectifiers, lithium-ion batteries, lithium-iron-phosphate batteries, lithium-titanium batteries.

Bahach Ruslan¹, 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.

Аналітичний огляд технологій бездротової зарядки для електромобілів

Буряківський В. А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена технологіям бездротової зарядки для електромобілів. Досліджуються сучасні методи, принципи роботи та переваги бездротової зарядки, спрямовані на підзарядку акумуляторів електромобілів. Огляд включає у себе аналіз основних технологій, таких як індуктивна зарядка, магнітно-резонансна зарядка та інші методи, що використовуються в цій галузі. Також розглядаються тенденції розвитку технологій бездротової зарядки, їх недоліки та можливості в майбутньому. Цей аналітичний огляд допоможе розуміти стан та перспективи бездротової зарядки для електромобілів та визначити напрямки подальших досліджень у цій сфері.

Ключові слова: електроенергія, електромобіль, бездротова зарядка, індуктивна зарядка, магнітно-резонансна зарядка, передача енергії, індукція.

Вступ

За останні десятиліття спостерігається стрімкий розвиток технологій у сфері електромобілів, що відіграє ключову роль у поступовому переході від традиційних заправних станцій до електричних зарядних пунктів.

Однак, при всіх досягненнях, проблема заряджання залишається однією з найважливіших при поширенні електромобілів [1]. У зв'язку з цим бездротова технологія зарядки електромобілів набуває особливого значення, спонукаючи до активного дослідження та розробок у цьому напрямку [2]. Переходячи до безпроводних систем зарядки, можна розширити зручність та ефективність використання електромобілів, зменшуючи зусилля водіїв при пошуку та підключенням до зарядних станцій. Ця робота присвячена вивченню актуальних проблем та перспектив розвитку бездротової зарядки електромобілів. Дослідження цього напрямку має вирішальне значення у зміцненні та подальшому розвитку інфраструктури для електромобілів. Результати цього дослідження стимулюватимуть розробку нових технологій та систем бездротової зарядки, спрямованих на підвищення їх ефективності, зручності в експлуатації та доступності для користувачів.

Ці дослідження дозволять зосередитися на

конкретних технічних аспектах, таких як оптимізація передачі енергії, розширення діапазону заряджання та розвиток інтелектуальних систем керування заряджанням. Їхні результати відіграють важливу роль у сприянні переходу на більш сталий та ефективний транспорт, сприяючи розвитку та поширенню електромобілів як ключового компонента майбутнього автомобільного ринку.

Аналіз публікацій

Популярність електромобілів (EV) стрімко зросла в останні роки, оскільки все більше людей усвідомлюють вплив традиційних двигунів внутрішнього згоряння на навколишнє середовище [3]. Однак однією з проблем, яка все ще перешкоджає масовому впровадженню електромобілів, є доступність та зручність зарядної інфраструктури.

У роботі [4] автори статті розглянули розвиток методів бездротової передачі електроенергії для електромобілів. Автори визначили досягнення, виклики і перспективи цієї технології, оцінили різні системи бездротової зарядки.

Автори статті [5] дослідили останні тенденції у бездротовій передачі енергії для електромобілів. Вони оглядають нові технології та методи, які застосовуються для підвищення ефективності та зручності заряджання елект-

ромобілів. Окрім цього, в цій публікації представлено інформацію про різні системи бездротового заряджання та їхні переваги, що підтверджує сучасних підходів до бездротового заряджання.

В статті [6] розглядаються останні тенденції в галузі бездротової зарядки електромобілів (EV), зокрема, технології рухомого заряджання. Автори статті виділяють два типи бездротової зарядки EV: статичну і динамічну.

Автори роботи [7] аналізують стаціонарну бездротову зарядку та її різноманітні модифікації. Вони розглядають основні характеристики та ключові аспекти цієї технології. Аналіз спрямований на вивчення основних принципів та можливостей бездротової стаціонарної зарядки.

У статті [8] представлено огляд результатів опитування, проведеного серед користувачів електромобілів (EV) для оцінки їхнього ставлення до бездротової зарядки EV. Опитування було проведено в Китаї у 2018 році, і в ньому взяли участь 500 користувачів EV. Узагальнено, користувачі EV висловлюють позитивне ставлення до бездротової зарядки. Автори вважають, що бездротова зарядка є більш зручною, безпечною та ефективною, ніж традиційна контактна зарядка.

Автори статті [9] провели огляд технологій динамічної бездротової зарядки електромобілів. Робота включає в себе інформацію про різні методи передачі енергії, типи зарядних пристроїв і системи, а також потенційні переваги та недоліки динамічної бездротової зарядки.

В публікації [10] автори провели огляд стану галузі бездротової зарядки електромобілів, станом на 2023 рік. Робота включає в себе інформацію про різні технології бездротової зарядки EV, а також потенційні переваги та виклики цієї технології.

Проведений аналіз публікацій показав, що на сьогоднішній час технології бездротової зарядки для електромобілів включають індуктивну зарядку, магнітну резонансну зарядку та радіочастотну зарядку. Ці методи використовують магнітне поле або радіочастотні хвилі для передачі електроенергії між зарядною станцією та автомобілем, забезпечуючи зручність та можливість заряджання без підключення проводів. Чітко простежується, що технології продовжують розвиватися для покращення ефективності та збільшення відстані заряджання.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є аналіз та обґрунтування сучасних технологій бездротової зарядки для електромобілів, шляхом висвітлення різних методів бездротового заряджання, їхніх переваг та недоліків, а також оцінюванням потенційного впливу на розвиток електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз індуктивної, магнітно-резонансної та радіочастотної технологій бездротової зарядки для електромобілів;
- визначити переваги та недоліки кожного методу бездротового заряджання, враховуючи ефективність, швидкість зарядки, вартість, та інші ключові аспекти;
- зробити висновки щодо практичного застосування та майбутні перспективи бездротової зарядки для електромобілів.

Технології зарядки

Сьогодні світ рухається до електрифікованої мобільності, щоб запропонувати альтернативу дорогому паливу для транспорту та мінімізувати викиди забруднюючих речовин, що створюються автомобілями на невідновлюваному викопному паливі [11]. Однак для електромобілів двома основними проблемами, які перешкоджають їхньому впровадженню у порівнянні зі звичайними транспортними засобами, є дальність пробігу та процедури заряджання [12].

Принцип роботи трансформатора та бездротової зарядки ідентичний. Бездротова зарядка використовує передавач і приймач. Котушка передавача отримує високочастотний змінний струм від джерела змінного струму 220 В 50 Гц. Високочастотний змінний струм створює змінне магнітне поле, яке перериває котушку приймача і дозволяє котушці приймача генерувати змінний струм. Однак для функціонування бездротової зарядки резонансна частота передавача і приймача повинна залишатися постійною. Для збереження цієї резонансної частоти в обох аспектах реалізовані компенсаційні мережі [13]. Крім того, система керування акумулятором подає випрямлений постійний струм, що генерується з боку приймача, який підключений до акумулятора. На рис. 1 показаний метод бездротової зарядки.

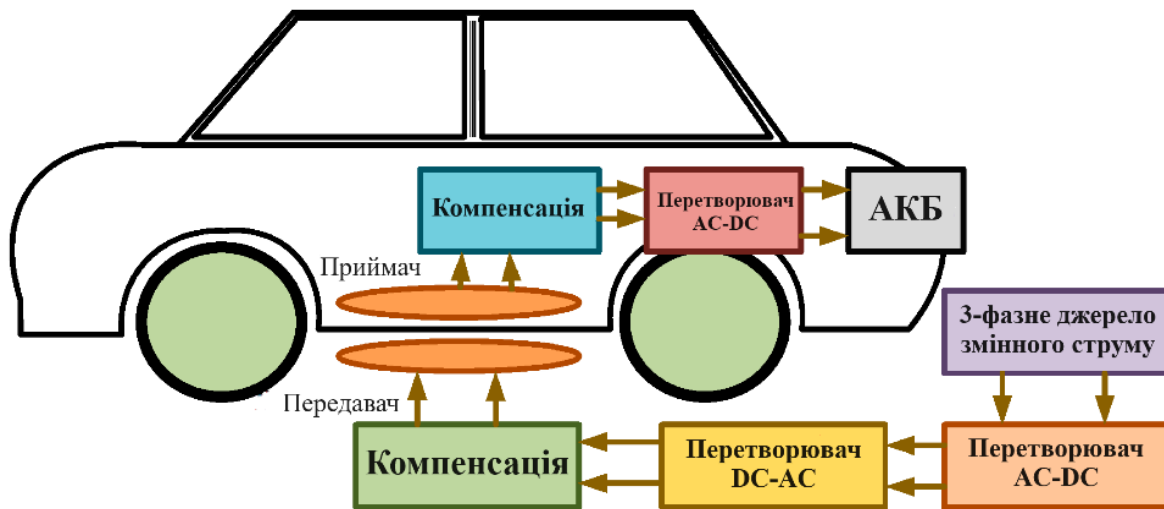


Рис. 1. Система бездротової зарядки [6]

Основний принцип дії бездротової системи зарядки для електромобілів

Електрична енергія передається від передавальної котушки до приймальної котушки. Цей процес включає конвертацію змінного струму з мережі в високочастотний змінний струм. Це досягається за допомогою пристроїв, які спершу перетворюють змінний струм на постійний за допомогою перетворювача змінного струму на постійний (AC/DC), а потім знову на змінний струм за допомогою перетворювача постійного струму на змінний (DC/AC). Для покращення загальної ефективності системи включено топологію компенсації на передавальній і приймальній сторонах, засновану на комбінаціях послідовного і паралельного з'єднань. Приймальна котушка, зазвичай встановлена під автомобілем, перетворює коливальні магнітні потоки високочастотного змінного струму. Потім високочастотний змінний струм перетворюється у постійний струм відповідно до необхідних параметрів, які використовуються для зарядки вбудованих акумуляторів. Також включено систему керування потужністю, зв'язку та управління акумуляторами (BMS), щоб уникнути будь-яких проблем зі здоров'ям та безпекою та забезпечити стабільну роботу. На обох сторонах передавача і приймача використовуються магнітні феритові пластини для зменшення будь-яких шкідливих витоків потоку та покращення розподілу магнітного потоку [14, 15]. Основна блок-схема статичної системи бездротової зарядки для електромобілів показана на рис. 2.



Рис. 2. Принципова блок-схема статичної бездротової зарядної системи для електромобілів [14]

Ємнісний метод бездротової передачі енергії

Ємнісний метод бездротової передачі енергії (CWPT – Capacitive Wireless Power Transfer) – це технологія, що перекладається як бездротова передача потужності через конденсатори. Ця технологія виявляє високу економічну ефективність та простоту використання для середніх і малопотужних пристроїв, портативної електроніки і зарядних пристроїв для телефонів. Вона використовує покращені механічні конфігурації та геометричні схеми, такі як конденсатори зв'язку, що робить її дуже вигідною [16]. Усередині CWPT для передачі енергії від приймача до джерела використовуються конденсатори зв'язку, а не котушки або магніти. Напівмостові перетворювачі отримують первинну змінну напругу через схему контролю якості електроенергії. Схема ємнісного методу бездротової передачі енергії представлена на рис. 3.

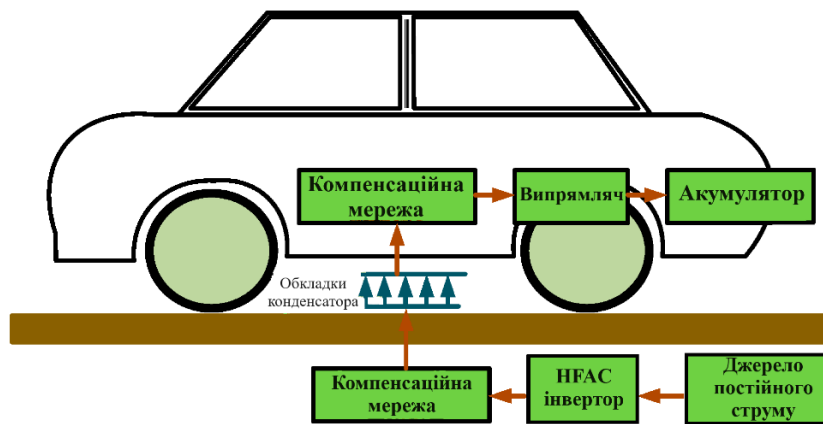


Рис. 3. Схематичне зображення ємнісного методу бездротової передачі електроенергії [6]

Конденсатори зв'язку на стороні приймача передають змінний струм, створений H-образним мостом, на високу частоту. На відміну від індуктивного бездротового передавання енергії (IPT), CWPT працює на мінімальному і максимальному струмі [17].

Крім того, щоб зменшити діапазон значень опору в системі передачі, в резонансній конфігурації додаткові котушки індуктивності повинні бути з'єднані тільки з тією комбінацією, яка присутня в конденсаторах зв'язку. Враховуючи це, можна інтегрувати м'яке перемикання в схему. Схеми випрямлячів і фільтрів використовуються для перетворення вхідного змінного струму в постійний для навантаження або акумуляторної батареї. Дві змінні, що впливають на рівень передачі потужності, – це "розмір конденсатора зв'язку" і "відстань між його двома пластинами". Технологія бездротової передачі енергії через магнітне спрямування (CWPT) відзначається відмінними характеристиками та забезпечує кращі обмеження магнітного поля для невеликих повітряних проміжків, що утворюються між пластинами двох конденсаторів.

З моменту свого впровадження технологія CWPT була лише частково застосована в електромобілях через значні потреби у високій потужності та повітряних проміжках. На робочій частоті 540 кГц було представлено статичний дослідницький прототип з вихідною потужністю понад 1 кВт і коефіцієнтом корисної дії приблизно 83% (від джерела живлення постійного струму до акумуляторної батареї).

Бездротова передача енергії між передавачем і приймачем можлива завдяки використанню струму зміщення, який створює змінне

електромагнітне поле. У цьому випадку в якості передавача і приймача для бездротової передачі енергії замість магнітів або котушок використовуються конденсатори зв'язку.

Напруга змінного струму подається на схему регулювання складової коефіцієнта потужності для покращення діапазону ефективності, підтримання рівня напруги та зменшення втрат при передачі. Високочастотне джерело змінного струму подається на передавальну пластину, створюючи коливальне електричне поле, яке через електростатичну індукцію виробляє струм зміщення на приймальній пластині. Після цього він подається на напівміст для генерації та підвищення максимальної напруги змінного струму. Змінна напруга з боку приймача перетворюється на постійну і використовується для живлення або заряду акумуляторної батареї в усій системі управління батареєю за допомогою фільтрів і пристрою для випрямлення. Напруга, частота, розмір і ємність конденсатора зв'язку, а також повітряний зазор між передавальною та приймальною сторонами впливають на потужність, що передається. Частота передачі знаходиться в діапазоні від 100 кГц до 600 кГц.

Ємнісний метод бездротової передачі енергії характеризується своєю простотою та ефективністю у використанні для малих пристроїв із низьким споживанням енергії, що становить його суттєву перевагу. Однак його обмеження у відстані передачі енергії та потужності робить його менш відповідним для великих пристроїв чи тих, що потребують значної енергії. Крім того, CWPT може бути вразливим до зовнішніх перешкод, які впливають на продуктивність передачі енергії [18, 19].

Бездротовий метод передачі електроенергії за допомогою магнітів у системах бездротової зарядки

Магнітна передача електроенергії відрізняється від СВРПТ та індуктивної передачі потужності своєю особливою методикою передачі, яка базується на використанні магнітних полів, як показано на рис. 4.

У цьому методі використовуються два паралельно синхронізованих постійних магніти (РМ).

Обмотка передавача отримує основне джерело живлення, оскільки джерело струму змушує первинний РМ відчувати силу механічного крутного моменту.

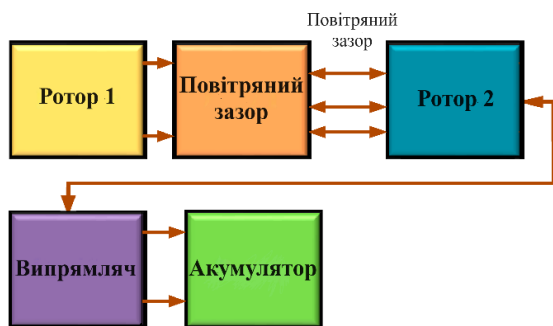


Рис. 4. Метод бездротової передачі за допомогою магнітів [6]

Первинний РМ обертається та механічно взаємодіє з вторинним РМ для застосування крутного моменту, використовуючи механічний крутний момент. Функціонування в режимі генератора здійснюється за допомогою основного постійного магніту такої комбінації синхронних постійних магнітів. У свою

чергу, вторинний постійний магніт збирає енергію та передає її до батареї через електронний перетворювач потужності та систему керування батареєю [20].

До недоліків цього методу можна віднести наступні:

- невисока ефективність. Ефективність магнітної передачі електроенергії зазвичай становить близько 70%. Це означає, що 30% електроенергії, що передається, втрачається в вигляді тепла;

- обмежена відстань передачі. Відстань, на яку можна передавати електроенергію з використанням магнітної передачі, зазвичай становить кілька метрів. Для передачі електроенергії на більші відстані необхідно використовувати більш потужні магнітні поля, що може призвести до підвищення втрат і небезпеки для здоров'я людини;

- небезпека для здоров'я людини. Магнітне поле, яке використовується для передачі електроенергії, може мати негативний вплив на здоров'я людини. Однак, згідно з дослідженнями, вплив магнітного поля, що використовується в бездротових зарядних пристроях, є безпечним для здоров'я людини.

Індуктивний метод передачі енергії

У 1914 році Нікола Тесла значно вплинув на розвиток концепцій бездротової передачі енергії, які стали фундаментом для подальших технологій, таких як індуктивна передача потужності (IPT). На рис. 5. показана принципова блок-схема традиційного IPT.

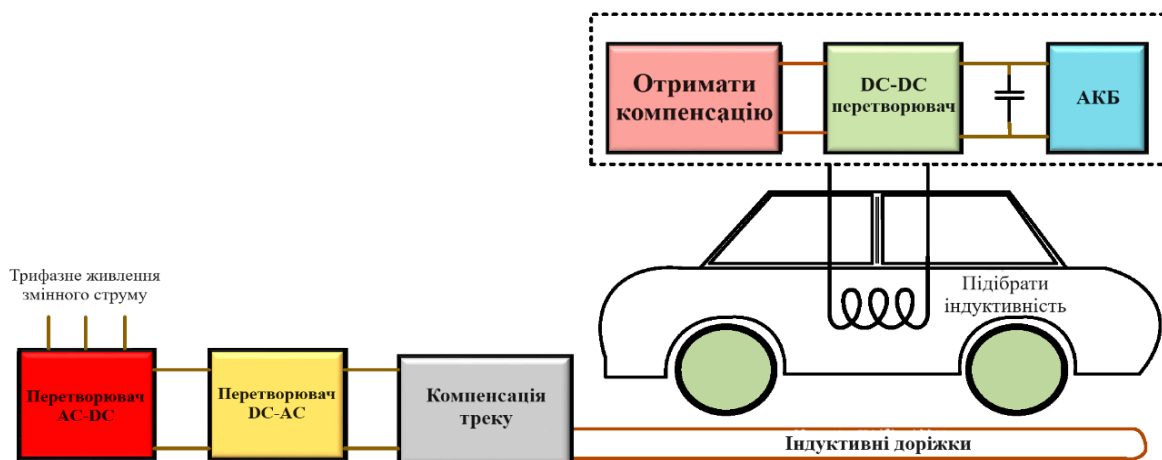


Рис. 5. Індуктивний спосіб передачі енергії [6]

Кілька систем зарядки електромобілів вплинули на неї. IPT була оцінена і реалізована в деяких системах, починаючи від мВт до кВт для безконтактної передачі сили від джерела до приймача. У 1996 році відомий виробник автомобілів General Motors представив Chevrolet S10 EV. Для його живлення використовувалася система магнітного заряду IPT (J1773), що надавала можливість зарядки з різними рівнями потужності: повільно (6,6 кВт) і швидко (50 кВт).

Катушка з магнітним зарядом першого ступеня – це зарядний пристрій, який містить індуктивний з'єднувач (зарядний пропелер). Ця катушка вставляється в зарядний порт автомобіля. Вона відправляє енергію через індукцію до вторинної катушки, що дозволяє заряджати транспортний засіб.

Основною передумовою IPT є індукція за законом Фарадея. Електроенергія передається бездротовим способом за допомогою взаємної індукції магнітного поля між передавальною та приймальною катушками. Коли на катушку передавача подається змінний струм, магнітна область змінного струму, яка проходить через неї і транспортує електрони, створює потужність змінного струму. Акумулятор електромобіля заряджається цим випрямленим і відфільтрованим вихідним змінним струмом. Частота, взаємна індуктивність і відстань між катушками передавача і приймача впливають на кількість переданої та отриманої електроенергії. IPT використовує діапазон частот від 19 кГц до 50 кГц [21].

Резонансна індуктивна бездротова система зарядки

Резонансна індуктивна бездротова система зарядки (RIWC) є технологією, яка базується на використанні резонансу для безпроводної передачі електроенергії між пристроями.

Незалежно від слабших магнітних полів, робота в резонансному режимі дозволяє перемикати таку ж кількість електроенергії, як і в IPT, оскільки резонатори з додатковою ємністю передають електроенергію з набагато більшим зарядом. Енергію можна передавати на великій відстані без використання кабелів - резонансна індуктивна бездротова система зарядки показана на рис. 6.

Найбільш значна потужність, яка може передаватися повітрям, відбувається тоді, коли резонансні частоти (смуга пропускання) сторін котушок поширення (передавача) і прийому

(приймача) котушок узгоджені, або коли котушки передавача і приймача регулюються [22].

Для досягнення відповідних резонансних частот послідовно і паралельно катушкам передавача і приймача підключаються додаткові компенсаційні мережі.

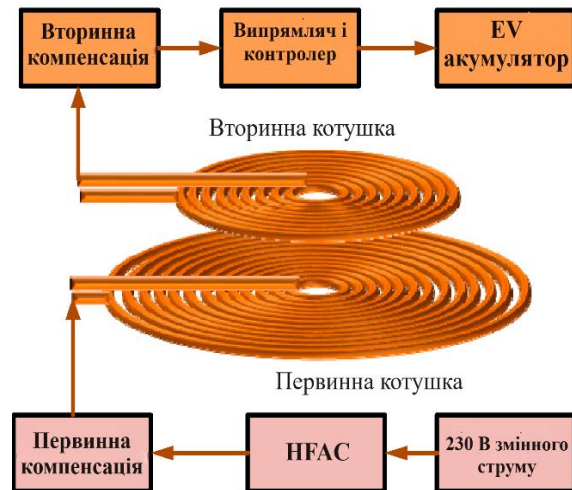


Рис. 6. Резонансна індуктивна система бездротової зарядки [6]

Разом зі збільшенням резонансної частоти ці додаткові компенсаційні мережі також допомагають зменшити додаткові втрати. Робоча частота резонансної індуктивної бездротової системи знаходиться в діапазоні від 10 кГц до 150 кГц [23].

Статична та динамічна бездротова зарядка

Бездротові системи зарядки електромобілів поділяються на дві категорії, залежно від застосування:

- статична бездротова зарядка: включає в себе методи, такі як RIWC, CWPT та IPT;
- динамічна бездротова зарядка: також використовує методи, такі як RIWC та CWPT для бездротового заряджання електромобілів під час руху.

Метод статичної бездротової зарядки передбачає заряджання автомобіля кожного разу, коли він перебуває у статичному режимі, як показано на блок-схемі статичної бездротової зарядки на рис. 7.

Таким чином, електромобіль можна було б легко припаркувати в певному місці або в сховищі, що дозволяло б взаємодіяти з бездротовою системою зарядки що спрощує та забезпечує процес зарядки автомобіля без необхід-

ності використання кабелів чи проводів. Передавач буде розташований під землею, а приймач під кузовом автомобіля. Перед тим, як вийти з автомобіля для завершення зарядки, водій повинен вирівняти передавач і

приймач. Простір між краями передавача і приймача, розмір їхніх прокладок і сила подачі змінного струму впливають на швидкість заряджання [24-25].

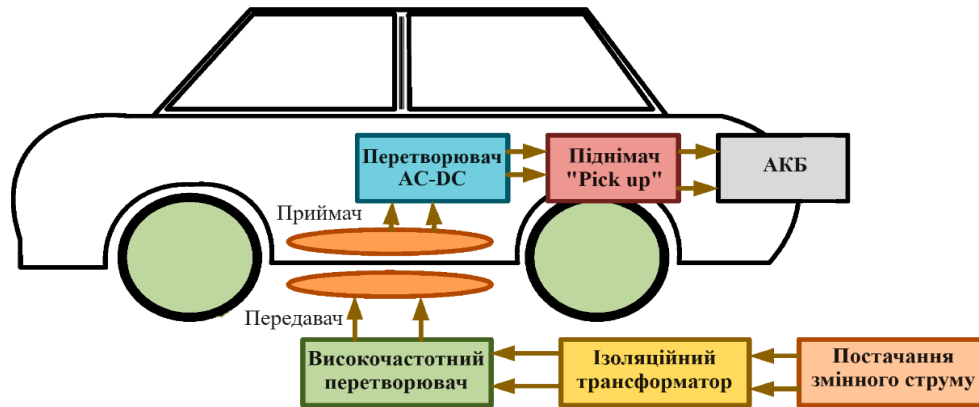


Рис. 7. Метод статичної бездротової зарядки [6]

Найкраще будувати зарядні станції там, де електромобілі регулярно паркуються на тривалий час.

Динамічна бездротова зарядка використовується для підзарядки електромобілів під час руху, що робить непотрібним очікування, поки батарея зарядиться. Ця теорія, висунута в 1978 році Дж. Г. Болгером та ін., стверджує, що енергія передається транспортному засобу під час його руху. Динамічна бездротова зарядка електромобілів вирішує проблеми обмеженого діапазону поїздок і необхідності частого заряджання на зарядних станціях. Індуктивна бездротова передача енергії використовується в сучасних пристроях динамічної бездротової зарядки. Ця технологія базується на котушці-приймачі, встановленій в електромобілі, яка отримує електромагнітне поле, що генерує височастотний струм, і котушках, прихованих під дорожнім покриттям [26]. Дорожні котушки постійно подають живлення на котушку-перехоплювач протягом усього шляху.

Після відповідної підготовки батарею електромобіля можна заряджати струмом, який передається цією котушкою. Для передачі енергії до інтегрованої системи з котушкою-передавачем і кількома резонаторами були створені малопотужні бездротові системи. Однак, оскільки вони слідує за траєкторією, ці системи не придатні для електромобілів. Два типи колій, розроблені для систем динамічної бездротової зарядки (DWC), мають

різну форму, які називаються розтягнутими або кусковими коліями. Розтягнута колія включає котушку передавача, яка значно більша за котушку приймача кускової колії, яка містить багато котушок з радіусами, що можуть досягати майже до котушки приймача. Тільки частина об'єднаної колії зі зв'язаною котушкою передавача може приводити в рух відповідну котушку приймача. Така стратегія живлення, яку іноді називають сегментацією, допомагає підвищити ефективність DWC і зменшити випромінювання електромагнітного поля від незв'язаних сегментів рейок. Переваги бездротової зарядки електромобілів порівнюючи з контактною зарядкою полягають у гальванічній ізоляції та зручності для користувача.

Щоб уникнути використання дротів та шнурів і уникнути потреби у ретельному контролі заряджання і розряджання, можна доволі часто поповнювати заряд акумулятора транспортного засобу. При цьому автомобіль може бути припаркований в різних місцях зарядки, в тому числі, на парковці, вдома, на світлофорі, в магазині. Впроваджуючи зарядні смуги на автомагістралях, які дозволять заряджати під час руху, DWC може покінчити з інфраструктурою швидкої зарядки. Порівняно з провідною зарядкою, бездротова зарядка має нижчу вартість, розмір, складність виробництва, ефективність та щільність потужності [27-29].

Порівняльний аналіз методів бездротової зарядки електромобілів

У ході цієї роботи було розглянуто чотири методи бездротової зарядки, зокрема: індуктивний метод передачі енергії (CWPT), бездротовий метод передачі електроенергії за допомогою магнітів, індуктивний метод передачі енергії (IPT), резонансна індуктивна бездротова система зарядки (RIWC).

RIWC відрізняється високою ефективністю передачі енергії на великі відстані, що робить його привабливим для використання у великих автопарках або громадському транспорті. Однак, необхідність точного налаштування системи та специфічні вимоги до узгодження частот

можуть бути викликом при впровадженні цього методу.

CWPT, з іншого боку, відзначається відсутністю магнітного поля, що робить його більш безпечним для навколишнього середовища. Він також може працювати на відносно великі відстані, але його ефективність може зменшуватися при поганих погодних умовах або внаслідок перешкод.

IPT, як стандартний метод бездротової зарядки, має високий рівень ефективності при перенесенні енергії на короткі відстані. Однак його ефективність зменшується зі збільшенням відстані між зарядною платою та автомобілем. В таблиці 1 наведені результати аналізу основних методів безпроводної зарядки.

Таблиця 1 – Огляд основних методів бездротового заряджання

Особливості	IPT	CWPT	RIWC
Технологія	Використовує магнітні поля для передачі енергії між котушками	Використовує електричні поля для передачі енергії між електродами	Використовує комбінацію магнітного та електричного полів для передачі енергії на великі відстані
Ефективність	85-95%	70-80%	90-95%
Відстань	Невелика дальність дії (до 20 см)	Мала та середня дальність (до 1 метра)	Середня та велика дальність (до декількох метрів)
Вартість	Нижча вартість завдяки простішій технології	Вища вартість через складні конструкції електродів	Помірна вартість
Безпека	Низький ризик електромагнітних перешкод	Можливість утворення дуги та іскріння	Низький ризик перешкод, висока безпека завдяки резонансній частоті
Діапазон частоти передачі	від 19 кГц до 50 кГц	від 100 кГц до 600 кГц.	від 10 кГц до 150 кГц

Виходячи з аналізу, найкращою системою бездротової зарядки електромобілів є резонансна індукційна зарядка. Вона поєднує в собі високу ефективність передачі енергії, безпеку електромагнітного поля та відносну простоту реалізації. Резонансна індукційна зарядка використовує резонанс для підвищення ефективності передачі енергії. При цьому резонансна частота зарядної станції та електромобіля збігаються, що дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії передачі енергії до 95%. Крім того, резонансна індукційна зарядка безпечна для здоров'я людини. Електромагнітне поле, яке використовується для передачі енергії, має низьку частоту, що робить його нешкідливим. RIWC відносно проста в реалізації. Вона не вимагає використання височастотних компонентів, що знижує її вартість.

Звичайно, резонансна індукційна зарядка має і деякі недоліки. Наприклад, вона більш складна в реалізації, ніж традиційна індукційна зарядка. Однак ці недоліки не є критичними та не перешкоджають її широкому поширенню. У майбутньому, резонансна індукційна зарядка може стати основним методом бездротової зарядки електромобілів. Вона поєднує в собі всі необхідні характеристики для забезпечення ефективної та безпечної зарядки електромобілів.

Висновки

У статті було детально проаналізовано різноманітні технології бездротової зарядки для електромобілів, розглянуто їх переваги, особливості та недоліки. Виявлено, що існують різні методи передачі енергії, такі як ємнісний,

магнітний, індуктивний, резонансна індуктивна система зарядки, а також статична та динамічна бездротова зарядка.

Висвітлено перспективи їхнього застосування та потенційні виклики, такі як ефективність передачі, вартість впровадження та вплив на навколишнє середовище. Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, виявлено також деякі недоліки, серед яких можна виділити ефективність зарядки, втрату енергії та нестабільність систем.

На даному етапі розвитку електромобілів бездротова зарядка стає значущим напрямком у вдосконаленні та розвитку транспортної інфраструктури. Вона пропонує низку переваг, таких як зручність для користувачів, відсутність необхідності у фізичному підключенні для заряджання, що сприяє зростанню комфорту в користуванні електромобілями.

Серед потенційних викликів бездротової зарядки для електромобілів - вартість впровадження цієї технології. Хоча ціни на обладнання для бездротової зарядки поступово знижуються, вони все ще можуть бути значними для встановлення інфраструктури на великих масштабах.

Ефективність передачі енергії також залишається питанням удосконалення. Оптимізація систем для зменшення втрат енергії під час зарядки та підвищення швидкості заряджання є ключовими напрямками подальших досліджень.

Незважаючи на виявлені недоліки, бездротова зарядка має потенціал стати основним методом заряджання електромобілів у майбутньому. Щоб це сталося, необхідно продовжувати дослідження та розвиток технологій, зокрема, зосередитися на підвищенні ефективності, зниженні вартості впровадження та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Бездротова зарядка може вирішити багато проблем, пов'язаних зі звичайними методами заряджання електромобілів, і стати ключовим етапом у створенні більш ефективних та екологічно чистих рішень для майбутнього транспорту. Вона відкриває шлях до збільшення зручності та розвитку більш доступної інфраструктури заряджання.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Dai, J., Ludois, D.C. (2015). A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 6017–6029.
2. Qiu, C., Chau, K.T., Liu, C., & Chan, C.C. (2013). Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging. *Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, 7, 1–9.
3. *Electric Vehicle Outlook 2023*. (2023). Retrieved from <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
4. A Review of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Prospects to Enhance Sustainable Mobility. (2016). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.003>
5. Electrified mobility overview and challenges. (2016). Retrieved from <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/innovation-and-industry/our-expertise/sustainable-mobility/electrified-mobility>
6. Challenges and Barriers of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. (2023). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en16052138>
7. Review on Contactless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. (2017). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en10050636>
8. Mi, C.C., Buja, G., Choi, S.Y., & Rim, C.T. (2016). Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 6533–6545.
9. Transportation systems management considering dynamic wireless charging electric vehicles: Review and prospects. (2022). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554522001521>
10. A Survey on User Acceptance of Wireless Electric Vehicle Charging Technology. (2018). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/wevj9030036>
11. Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. (2023). *Applied Sciences*, 13(10), Article 6016. <https://doi.org/10.3390/app13106016>
12. Coil Design for High Misalignment Tolerant Inductive Power Transfer System for EV Charging. (2016). Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/11/937>
13. Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless Power Transfer based on Finite Element Analysis. (2023). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/297728994_Comparison_of_circular_and_rectangular_coil_transformer_parameters_for_wireless_Power_Transfer_based_on_Finite_Element_Analysis

14. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. (2018). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>
15. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Uliyanets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of a unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon) (pp. 248-253). IEEE.
16. High frequency two-plate capacitive wireless power transfer system. (2018). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/325417925_High_frequency_two-plate_capacitive_wireless_power_transfer_system
17. Li, S., Liu, Z., Zhao, H., Zhu, L., Shuai, C., & Chen, Z. (2016). Wireless Power Transfer by Electric Field Resonance and its Application in Dynamic Charging. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 6602–6612.
18. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Saraiev, O. (2022, May). Features of converting a car with an internal combustion engine into an electric car. In 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON) (pp. 1-6). IEEE.
19. Wireless Energy Transfer by Resonant Inductive Coupling. (2015). DOI:10.13140/RG.2.2.34549.52969
20. Inductive Power Transfer. (2018). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inductive-power-transfer>
21. Nagendra, G.R., Covic, G.A., & Boys, J.T. (2014). Determining the physical size of inductive couplers for IPT EV systems. In Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC. Fort Worth, TX, USA.
22. Jeong, S., Jang, Y.J., & Kum, D. (2015). Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 6368–6377.
23. A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive Coupling Vehicles. (2022). Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/9/1355>
24. Hnatov, A., & Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(4), 4649-4664.
25. Gnatov, A., Argun, S., & Rudenko, N. (2017, May). Smart road as a complex system of electric power generation. In 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (pp. 457-461). IEEE.
26. Gnatov, A., Argun, S., & Uliyanets, O. (2017, May). Joint innovative double degree master program «Energy-saving technologies in transport». In 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (pp. 1203-1207). IEEE.
27. Different types of wireless electric vehicle charging methods. (2023). Retrieved from <https://ijari.org/assets/conf/NCEVI-2022/NCEVI-09.pdf>
28. Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Гнатова Г. А., Сохін П. А. (2022). Переобладнання автомобіля з ДВЗ в електромобіль. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, 21, 22-30. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Hnatova H. A., Sokhin P. A. (2022). Pereobladnannia avtomobilia z DVZ v elektromobil. [Conversion of a car from an ICE into an electric car]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, 21, 22-30. [in Ukrainian].
29. Гнатів, А. В., & Аргун, Ш. В. (2017). Аналіз схем сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів. *Автомобільний транспорт*, (41), 163-169. Hnatov, A. V., & Arhun, Shch. V. (2017). Analiz skhem soniachnykh elektrostantsii na fotoelektrychnykh moduliakh dlia zariadnykh stantsii elektromobiliv. [Analysis of solar power station schemes on photoelectric modules for electric cars charging stations]. *Avtomobilnyi transport*, (41), 163-169. [in Ukrainian].

Буряківський Віталій¹, студент, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, тел. + 38 095-039-17-63, buryakovskiyvitaliy@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4880-6335>

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

Analytical review of wireless charging technologies for electric vehicles

Abstract. Problem. *The article provides a comprehensive analysis of the various wireless charging technologies tailored for electric vehicles (EVs). It delves into an in-depth exploration of existing methodologies, challenges, and prospective advancements in this burgeoning field. Goal.* *The purpose of this work is to conduct a comprehensive analysis and critical assessment of diverse wireless charging technologies tailored for electric vehicles (EVs). The primary aim is to systematically evaluate and elucidate the existing methodologies, highlighting their advantages, drawbacks, and key challenges prevalent in this domain. Methodology.* *The research methodology involves an extensive literature review to gather information on wireless charging technologies for electric vehicles. It includes data collection from reputable sources, comparative analysis of technologies based on efficiency and limitations, identification of trends and challenges, interpretation of findings, and conclusions with recommendations. Ethical considerations and acknowledgment of*

limitations are integral parts of the methodology. **Originality.** Research will focus on analyzing wireless charging technologies for electric vehicles, emphasizing original insights derived from comprehensive literature review, comparative analysis, and identification of emerging trends and challenges, ensuring unique contributions to the field. Ethical practices and acknowledgment of limitations will be integral aspects of the research. **Conclusions.** The study presents detailed results of a comparative analysis that highlights the effectiveness, limitations, and emerging trends in wireless charging technologies for electric vehicles. It presents the findings of a comprehensive review that provides insight into the current state and future prospects of these technologies. **Practical value.** Research aims to provide practical

value by offering insights into the effectiveness, limitations, and future potential of wireless charging technologies for electric vehicles, contributing actionable recommendations for industry stakeholders and policymakers.

Keywords: electricity, electric car, wireless charging, inductive charging, magnetic resonance charging, energy transfer, induction.

Vitalii Buriakivskiy¹, Student, Kharkiv National Automobile and Highway University, tel. +38 095-039-17-63, buryakovskiyvitaliy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4880-6335>

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

UDC 378.14

DOI: 10.30977/VEIT.2023.24.0.4

Інноваційні підходи до навчання студентів технічних спеціальностей в умовах війни в Україні

Аргун Щ.В.¹, Трунова І.С.¹, Гнатов А.В.¹, Гнатова Г.А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Через війну в Україні заклади освіти зазнали руйнувань, відбулось масове переміщення студентів в межах країни та за кордон. Це погіршило якість надання освітніх послуг, особливо для технічних спеціальностей, де неможливе повноцінне навчання без лабораторних та практичних робіт. Метою цієї статті є пошук шляхів вирішення проблеми навчання українських студентів технічних спеціальностей під час війни. В статті розглянуто можливості дистанційного навчання в закордонних університетах без виїзду за кордон, а також використання лабораторії цифрової віддаленої електротехнічної освіти "My digital electrical engineering", розробленої в Ризькому технічному університеті. Результати дослідження можуть бути використані для покращення дистанційного навчання в технічних ВНЗ України, що дозволить студентам продовжувати навчання під час війни, забезпечуючи якість та безпеку освіти.*

***Ключові слова:** дистанційна освіта; електротехніка; енергетика; війна в Україні; онлайн навчання; цифрові інструменти; віртуальні лабораторії; якість освіти; інтернет речей.*

Вступ

Триваюча збройна агресія російської федерації проти України спричинила загрозу життю та здоров'ю всіх громадян України. Це суттєво вплинуло на всі сфери життя, в тому числі і на освіту. В багатьох регіонах України навчальні заклади зазнали масштабних руйнувань – пошкоджено, а в деяких випадках, повністю зруйновано навчальні приміщення з усім матеріально-технічним обладнанням. Навіть в тих містах, де залишились незруйнованими освітні заклади, існує дуже велика небезпека (загроза життю) для студентів та працівників освіти, тому навіть там заняття переведені у дистанційну форму [1]. Тим паче це стосується українських територій, які знаходяться під окупацією, де повністю відсутня можливість проводити заняття.

В зв'язку з цим задля створення безпечно-го освітнього середовища для учасників освітнього процесу у областях, де тривають активні бойові дії, у відповідності до рекомен-

дацій Міністерства освіти і науки України, в частині навчальних закладів, де немає можливості проводити заняття face-to-face, навчання було переведено на віддалену/дистанційну або змішану форму, залежно від ситуації в конкретному регіоні [2].

Аналіз публікацій

Як повідомляє Департамент освіти станом на 22 лютого 2023 року: «Внаслідок численних наземних та повітряних обстрілів було пошкоджено 241 будівлю закладів освіти, що складає 55% освітнього фонду міста Харкова» [3]. Навчальні заклади у прифронтових та окупованих областях, зокрема у місті Харкові, змушені проводити всю навчальну діяльність віддалено.

Навчання студентів на технічних спеціальностях неможливе без проведення лабораторних та практичних робіт. Наприклад, особливою підготовки фахівців у Харківському національному автомобільно-дорожньому

університеті (ХНАДУ) за спеціальністю “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” є забезпечення умов для розвитку знань і вмінь розв’язування складних спеціалізованих задач, вирішення практичних проблем в галузі електромобілів, автомобільної електроніки та енергозберігаючих технологій [4]. Це передбачає використання лабораторного обладнання.

Під час пандемії COVID-19 навчальні заклади усього світу стикнулись з необхідністю проведення занять віддалено. Наразі існує багато прикладів успішного вирішення проблеми проведення лабораторних і практичних занять дистанційно. В них використовуються інноваційні підходи та технології.

Наприклад, Массачусетський технологічний інститут (MIT) розробив систему віддаленого доступу (RAT), яка надає можливість вчителям управляти віртуальною класною кімнатою для курсів інформатики та електроніки [5]. Використання RAT у дистанційній освіті дає змогу викладачам безпосередньо керувати класом, надавати негайну підтримку учням, які навчаються дистанційно, взаємодіяти в режимі реального часу з віртуальною класною кімнатою, отримувати знімки віртуального класу у реальному часі та контролювати їх екзамени та навчальну діяльність з високою ефективністю.

Іншим прикладом є Стенфордський університет. У ньому використовуються віртуальні лабораторії та симуляційні програми для навчання студентів на практичних курсах, таких як механіка, фізика та інженерія. Наприклад, вони створили віртуальну лабораторію з робототехніки, де студенти можуть програмувати та керувати віртуальними роботами для виконання завдань [6].

Кембриджський університет також розробив спеціальну платформу, яка надає студентам можливість віртуально працювати зі складними науковими інструментами та обладнанням. Зокрема, для студентів механічного факультету була створена віртуальна лабораторія, яка дозволяє виконувати експерименти з реальними інструментами та отримувати дані в режимі реального часу. Цей підхід дозволяє студентам отримувати практичні навички навіть на віддаленому навчанні [7].

Крім перелічених вище, розроблені і інші віртуальні лабораторії: для підтримки курсів щодо розробки хімічних реакцій [8], для проведення віртуальних експериментів під час

навчання студентів у загально фізичній лабораторії [9], на факультеті машинобудування – лабораторії віртуальної механіки рідини [10] і багато інших.

Але загальною проблемою використання цих прогресивних наробок в українських університетах під час війни є відсутність матеріально-технічної бази, небезпека для викладацького та інженерного персоналу та відсутність програмного забезпечення.

В Харківському Національному Автомобільно-Дорожньому Університеті, як і в інших українських навчальних закладах, під час пандемії також було розроблено лабораторні та практичні роботи [11]. Деякі з них були повністю побудовані на використанні пакетів прикладних програм, деякі – передбачали присутність викладача в лабораторії, а студентів – віддалено [12–14]. Але, наразі, більшість лабораторій та серверів українських університетів постраждало або немає доступу до них. Незважаючи на військові дії, в Україні продовжується навчання студентів, але через обмежені можливості проведення лабораторних та практичних занять для студентів, що навчаються за прикладними спеціальностями, погіршується рівень надання освітніх послуг і, відповідно, рівень знань та вмінь, отримуваних здобувачами освіти.

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є пошук шляхів вирішення проблеми навчання українських студентів технічних спеціальностей під час війни для забезпечення безпеки і підвищення якості надання освітніх послуг.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих способів проведення лабораторних та практичних робіт у режимі дистанційного навчання;

- пошук шляхів запозичення існуючого досвіду дистанційного проведення лабораторних та практичних робіт і можливостей їх використання в освітньому процесі українських ВНЗ в умовах війни;

- дослідження побудови лабораторії цифрової віддаленої електротехнічної освіти (РТУ) на основі “Internet of things” IoT та алгоритму роботи з нею;

- розробка алгоритму імплементації лабораторії цифрової віддаленої електротехнічної освіти у навчальний процес ХНАДУ.

1. Способи навчання українських студентів віддалено

Аналіз існуючих способів і наявних можливостей вирішення проблеми дистанційного навчання студентів технічних спеціальностей показав, що є два шляхи:

- міжнародна співпраця, яка включає в себе мобільність студентів;
- дистанційне навчання українських студентів в іноземних університетах без переміщення за кордон.

Розглянемо ці способи.

1.1. Мобільність студентів

Цей спосіб полягає в тому, що студенти під час дії воєнного стану навчаються в іноземних ВНЗ очно.

З точки зору ефективності цей спосіб здається дуже перспективним, особливо, якщо враховувати міжнародну підтримку українських студентів [15–18]. Але далеко не всі студенти можуть скористатися такою допомогою. Однією з причин є мовний бар'єр. Проведене дослідження володіння іноземними мовами (англійська, польська, турецька, угорська, іспанська, французька та німецька) серед українців показало, що «взагалі не володіють іноземними мовами на будь-якому рівні майже третина дорослих жителів України – 31,8%» [19].

Крім того, існує і інша проблема. Розглянемо її на прикладі українського університету ХНАДУ. На автомобільному факультеті університету навчається 1150 студентів, 1132 з них – хлопці. Це співвідношення не є виключенням. В українських університетах на технічних спеціальностях навчається суттєво більше хлопців ніж дівчат. Знання цієї статистики важливо, тому що з початку дії воєнного стану в Україні, військовозобов'язаним чоловікам віком від 18 до 60 років заборонено виїзд за кордон. Через це, саме для студентів технічних спеціальностей, розглянутий спосіб не перекриває всі потреби і вирішує проблему лише частково.

2.2. Дистанційне навчання українських студентів в іноземних університетах без переміщення за кордон.

Цей спосіб полягає у тому, що студенти знаходяться в Україні в безпечних для себе місцях, тобто не обов'язково в місцях знаходження університетів, в яких вони навчаються. Важливою умовою є наявність інтернету та комп'ютера (планшета або мобільного телефону). Заняття відбуваються віддалено.

Студенти використовують віртуальну навчальну базу лабораторії та програмне забезпечення “приймаючого” університету, з яким укладено договір про співпрацю і інформаційну підтримку.

Заняття проводяться викладачами з України. На наш погляд цей спосіб є перспективним та має великі можливості для його реалізації.

2. Віддалені практичні заняття на основі ІоТ для українських студентів

2.1 Аналіз існуючих способів проведення лабораторних та практичних робіт у режимі дистанційного навчання.

В ХНАДУ на кафедрі автомобільної електроніки, яка займається розробками енергогенеруючих пристроїв і випускає фахівців зі спеціальності “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” є ряд електротехнічних дисциплін: «Електротехніка», «Електроніка», «Мікропроцесорна техніка», «Електричні машини та апарати», «Теорія електроприводу», повне опанування яких неможливе без проведення практичних та лабораторних робіт.

Наразі деякі лабораторні та практичні роботи проводяться віддалено з використанням пакетів прикладних програм (Electronics Workbench, Multisim, Proteus, Math Lab/Simulink та багато інших) та з використанням навчального відео контенту. При використанні навчального відео студенти виступають як спостерігачі, тобто викладач демонструє відео, і в процесі демонстрації дає роз'яснення та наголошує на важливих моментах [14].

Але для формування висококласних фахівців цих засобів недостатньо. Симуляція фізичних процесів не є досконалою. Вона не враховує всі реальні процеси, які протікають в електричних та магнітних колах, а спостереження за роботою інших не замінює досвід, який студент повинен отримати під час самостійного виконання роботи.

Ця проблема торкнулася не тільки українських ВНЗ, а також і європейських закладів освіти, які були змушені проводити заняття віддалено під час пандемії [20].

Деякі з них доволі успішно вирішили цю проблему. Наприклад, в РТУ під керівництвом Peteris Apse-Apsitis розроблено дистанційну лабораторію «Му digital electrical engineering» (MDEE), яка базується на

Internet of Things (IoT) [21].

Інтернет речей – це безліч фізичних об'єктів, підключених до Інтернету та даних, що обмінюються. Типова система IoT працює за допомогою збору та обміну даними в режимі реального часу. На рис. 2 представлено типову архітектуру IoT системи [22].

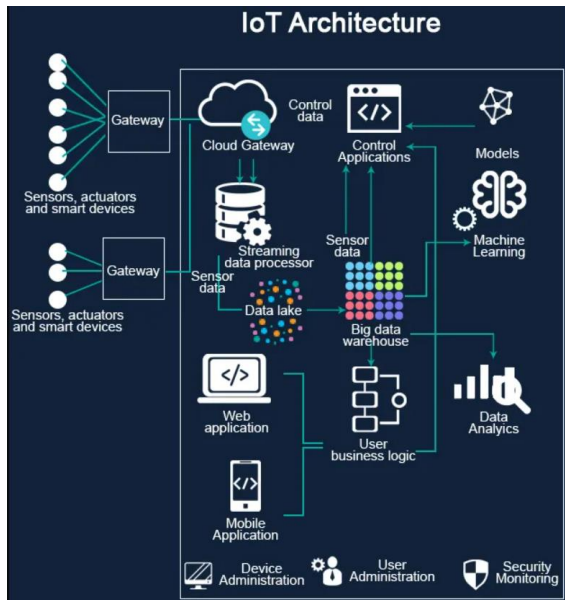


Рис. 1. Типова архітектура IoT системи

2.2. *Лабораторія MDEE.* Принцип роботи лабораторії полягає в тому, що студент, знаходячись, у будь-якій точці світу, у будь-який час має можливість виконати практичне завдання (лабораторну роботу), завантажити результати, провести симуляцію реального процесу та побудувати графіки. Це дозволяє студентам отримати більш глибокі знання та реальний практичний досвід.

Лабораторія знаходиться у відкритому доступі, але для того, щоб скористатися нею необхідно пройти простий етап реєстрації [23].

Лабораторія MDEE (рис. 2) складається з:

- обладнання для вивчення процесу, яке включає ШІМ Н-міст, керований двигуном постійного струму, що живиться від повнохвильового випрямляча з конденсаторною фільтрацією;

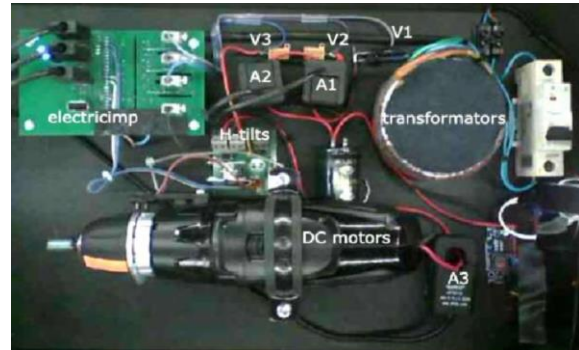
- IoT модуля: Twilio electricimp [24]; модуля imp003 [25] з 32-бітним мікроконтролером STM32F405 Cortex на борту;

- модуля керування (вимірювання): 3-фазного модуля вимірювання потужності власної розробки РТУ, датчика струму Холла із розщепленим сердечником;

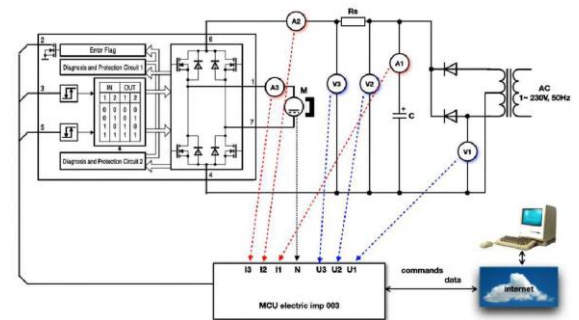
- безпечного веб-порталу HTTPS: веб-

серверу Apache і бази даних MySQL, веб-сторінки на основі скриптових мов HTML5, Javascript, PHP;

- веб-камери на базі веб-серверу.



а



б



в

Рис. 2. Обладнання для вивчення процесу: а – загальний вигляд; б – функціональна схема; в – власний модуль виміру (моніторингу) 3-фазної потужності з imp003 (плата розробки muRata)

2.3. *Алгоритм виконання лабораторної роботи у MDEE.* Для роботи із системою використовуються інтернет-браузери Google Chrome або Mozilla Firefox. Chrome дозволяє відобразити сторінки в англійській, українській чи у будь-якій мовній версії.

Робочий стіл складається з кількох сторінок: опису, завдань та результатів.

У вкладці Darbība (Дія) наведено відео запис з інструкцію (основні кроки), щодо порядку дій, отримання результатів та графіків.

Для виконання лабораторної роботи необхідно відкрити вкладення Uzdevumi (Завдання). У впливаючому меню Izvēlēties darbu (Оберіть роботу) нульовою є демонстраційна робота при виконанні якої можна обирати будь-які вимірювальні прилади (амперметри A1-A3 та вольтметри V1-V3). Натиснувши кнопки MĒRĪT (Виміряти) та Simulācija (Симуляція) у спливаючому вікні можна побачити процеси, що протікають в електричному колі, а натиснувши кнопки Atjaunināt (Оновлення) та Lejuplādēt (Завантажити) отримати графіки та результати вимірів.

Для безпосереднього виконання лабораторної роботи студенту необхідно виконати наступні кроки:

– у вкладці Uzdevumi (Завдання) обрати завдання у відповідності до номеру лабораторної роботи та прочитати короткий опис (рис. 3);

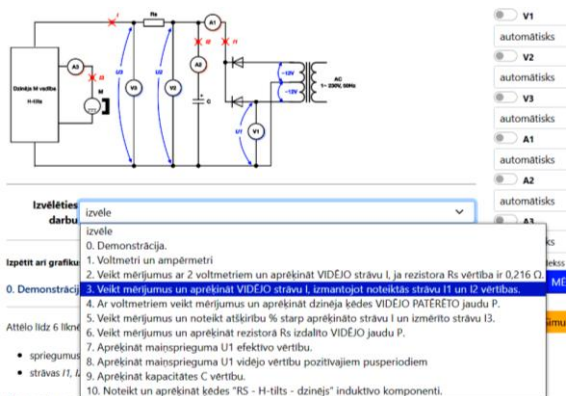


Рис. 3. Скріншот вкладки Uzdevumi (Завдання)

– обрати необхідні вимірювальні прилади V1...V3, A1...A3, відповідно до поточного завдання та діапазону вимірювань (наприклад, DC 10 В тощо). Якщо прилади та/або діапазон вимірювань вибрано неправильно, то результати будуть невірними або буде відображатися "0";

– натиснути кнопку MĒRĪT (Виміряти), щоб ініціалізувати роботу двигуна постійного струму на віддаленому пристрої і спостерігати за обертанням ротора двигуна у вікні;

– натиснути кнопку Simulācija (Симуляція) для спостереження за процесами, що протікають в електричній схемі, Рисунок 4;

– натиснути кнопку Atjaunināt (Оновлення) для отримання графіків залежності струмів та напруг від часу;

– натиснути кнопку Lejuplādēt (Завантажити) для отримання результатів вимірювання;

– зайти в меню Rezultāti (Результати) та внести результати для подальшої перевірки, викладачем, рис. 5.

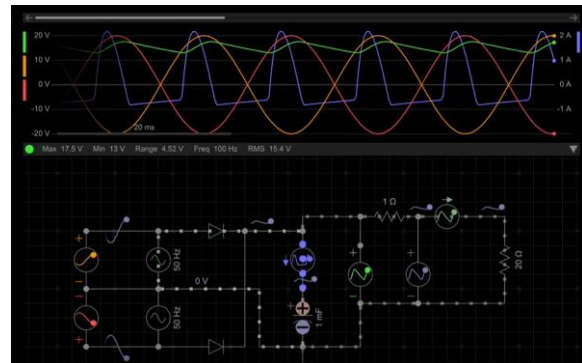


Рис. 4. Скріншот процесу симуляції



Рис. 5. Форма для внесення результатів розрахунку роботи перед відправленням на перевірку

Під час роботи студента з веб-сторінки надсилаються команди безпосередньо на систему керування установкою для запуску системи та проведення необхідних вимірювань. У відповідь, прилад видає виміряні значення і правильне значення, розраховане на вимірювальному пристрої, яке недоступне студентам. Це дозволяє легко порівняти розрахований студентом результат із фактичним. Якщо різниця становить менше 1,5%, то це вказує на високу точність проведених вимірювань.

3. Алгоритм впровадження лабораторії MDEE у навчальний процес ХНАДУ

Протягом багатьох років Ризький Технічний Університет (Латвія) та Харківський Національний Автомобільно-Дорожній Університет (Україна) ведуть плідну співпрацю як у наукових, так і в навчальних напрямках [26–28].

У рамках продовження цієї співпраці ХНАДУ зацікавлений у використанні лабораторії РТУ MDEE у своєму навчальному

процесі. Для цього необхідно виконати декілька кроків:

– укласти договір між університетами про можливість використання лабораторії MDEE в навчальному процесі ХНАДУ;

– з боку ХНАДУ – ввести в навчальні програми ХНАДУ та сілабуси дисциплін відповідні лабораторні роботи;

– з боку ХНАДУ – перекласти програми на українську та англійську мови (на даний момент звіти та інші завдання представлені латиською мовою);

– з боку РТУ – надати права викладача (адміністратора) у віртуальній лабораторії викладачам ХНАДУ;

– обговорити можливість проведення консультацій для викладачів ХНАДУ спеціалістами лабораторії MDEE;

– з боку ХНАДУ – розробити методичні вказівки українською та англійською мовами.

Треба відмітити, що існує проблема яку необхідно вирішити для успішного використання лабораторії. Вона полягає в тому, що якщо один студент, виконуючи лабораторну роботу, запускає обертання двигуна, інші студенти зможуть запустити двигун не раніше ніж через 40 с. Це пов'язано з наявністю лише однієї установки. Збільшення кількості стендів у лабораторії дозволить уникнути цієї проблеми.

Висновки

Військова агресія російської федерації проти України стала викликом самому існуванню держави, її суверенітету та соборності, а також сильно вдарила по усім складовим.

З'явилася суттєва загроза життю та здоров'ю учасників освітнього процесу, відбулися масштабні руйнування освітньої інфраструктури, вимушене масштабне переміщення учасників освітнього процесу в межах України та за кордон та призвело до погіршення надання освітніх послуг та отримання знань здобувачами освіти. Особливо це стосується спеціальностей практичного напрямку.

Навчання студентів на технічних спеціальностях неможливе без проведення лабораторних та практичних робіт, що передбачає використання лабораторного обладнання. Під час пандемії було розроблено лабораторні та практичні роботи, як ті що були повністю побудовані на використанні пакетів прикладних програм, так і ті, що передбачали

присутність викладача в лабораторії, а студентів віддалено. Але, наразі, більшість лабораторій та серверів університетів постраждало або немає доступу до них.

Метою роботи був пошук шляхів вирішення проблеми навчання українських студентів технічних спеціальностей під час війни для забезпечення безпеки і підвищення якості надання освітніх послуг.

Проаналізовано існуючі способи проведення лабораторних та практичних робіт у режимі дистанційного навчання. Аналіз показав, що найбільш перспективним є дистанційне навчання українських студентів в іноземних університетах без переміщення за кордон.

Проведено пошук шляхів запозичення існуючого досвіду дистанційного виконання лабораторних робіт і можливостей їх використання в освітньому процесі українських ВНЗ в умовах війни. Визначено, що для їх проведення доцільно використовувати лабораторію цифрової віддаленої електротехнічної освіти MDEE, розроблену Ризьким технічним університетом. Досліджено побудову цієї лабораторії та алгоритм роботи з нею.

Розроблено покроковий алгоритм імплементації лабораторії цифрової віддаленої електротехнічної освіти у навчальний процес ХНАДУ.

Результати цієї роботи можуть використовуватись для покращення дистанційного навчального процесу у технічних ВНЗ України.

Подяка

Висловлюємо щирі подяку колегам Ризького технічного університету за сприяння, підтримку, та надану можливість використання лабораторії «My digital electrical engineering».

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Khaniukov, O. O., Smolianova, O. V., & Shchukina, O. S. (2022). Distance learning during the war in Ukraine: Experience of internal medicine department (organisation and challenges). *Art of Medicine*, 134–138.
2. *About the recommendation of distance learning*. (n.d.). Освіта.UA. Retrieved July 2, 2023, from http://osvita.ua/legislation/Ser_osv/88527/

3. Department of Education. (n.d.). *In Kharkiv, 55% of the educational fund was damaged as a result of shelling*. <https://www.city.kharkiv.ua/>. Retrieved July 2, 2023, from <http://www.city.kharkiv.ua/uk/news/u-kharkovi-vnaslidok-obstriliv-poshkodzhenno-55-osvitnogo-fondu--53210.html>
4. Gnatov, A., Argun, S., & Ulyanets, O. (2017). *Joint innovative double degree master program «Energy-saving technologies in transport»*. 1203–1207. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100442>
5. Magetos, D., Sarlis, I., Kotsifakos, D., & Douligeris, C. (2021). Utilization of Remote Access and Distance Control Technology for the Management of Virtual Classrooms, During the Covid-19 Pandemic, in Vocational Education and Training (VET) Specialties' Laboratories. *European Conference on E-Learning*, 583–XIX.
6. *Design Group Offices and Labs | Mechanical Engineering*. (n.d.). Retrieved July 2, 2023, from <https://me.stanford.edu/groups/about-design-group/design-group-offices-and-labs>
7. Taylor, S. C. (2019, August 9). *Virtual Lab case study* [Text]. <https://www-smartinfrastruc-ture.eng.cam.ac.uk/files/virtuallabcasestudy>
8. Ramírez, J., Soto, D., López, S., Akroyd, J., Nurkowski, D., Botero, M. L., Bianco, N., Brownbridge, G., Kraft, M., & Molina, A. (2020). A virtual laboratory to support chemical reaction engineering courses using real-life problems and industrial software. *Education for Chemical Engineers*, 33, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.07.002>
9. Hamed, G., & Aljanazrah, A. (2020). *The effectiveness if using virtual experiments on students' learning in the general physics lab*. <https://doi.org/10.28945/4668>
10. Kapilan, N., Vidhya, P., & Gao, X.-Z. (2021). Virtual Laboratory: A Boon to the Mechanical Engineering Education During Covid-19 Pandemic. *Higher Education for the Future*, 8(1), 31–46. <https://doi.org/10.1177/2347631120970757>
11. Sus, B., Zagorodnyuk, S., Bauzha, O., Maliarenko, V., & Zahorodniuk, T. (2021). Development of Practical Exercises in Educational Institutions Using Intelligent Expert Systems. *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 279–284.
12. 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>
13. Holubiev, L., Tkach, M., & Makatora, D. (2023). Using tinkercad to support online the laboratory work on the design of microprocessor systems at technical university. *Information Technologies and Learning Tools*, 2023, Vol 93, № 1.
14. Borodenko, Y., Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Kunicina, N., & Patlins, A. (2022, October 10). *Features of training an electrical engineer in the context of distance learning*. 2022 IEEE 63rd Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2022 - Proceedings. Scopus. <https://doi.org/10.1109/RTUCON56726.2022.9978859>
15. Morrice, L. (2022). Will the war in Ukraine be a pivotal moment for refugee education in Europe? *International Journal of Lifelong Education*, 41(3), 251–256. <https://doi.org/10.1080/02601370.2022.2079260>
16. *Free tuition for displaced Ukrainian students*. (n.d.). Retrieved July 3, 2023, from <http://www.gov.scot/news/free-tuition-for-displaced-ukrainian-students/>
17. *Istituto fondo MUR per aiutare studenti e ricercatori ucraini*. (2022, February 27). Ministero dell'Università e della Ricerca. <https://www.mur.gov.it/it/news/domenica-27022022/istituto-fondo-mur-aiutare-studenti-e-ricercatori-ucraini>
18. Murray, R. (2022). UK University Initiatives Supporting Forced Migrants: Acts of Resistance or the Reproduction of Structural Inequalities? *Migration and Society*, 5(1), 99–114. <https://doi.org/10.3167/arms.2022.050109>
19. Yashnyk, M. (2023, March 16). *Press releases and reports—Level of proficiency in English and other foreign languages in Ukraine: Results of quantitative sociological research conducted in December 2022—January 2023*. <https://kiis.com.ua/?lang=ukr&cat=reports&id=1210&page=1>
20. Trunova, I., Arhun, S., Hnatov, A., Apse-Apsitis, P., Kunicina, N., & Myhal, V. (2023). Sustainable Approach Development for Education of Electrical Engineers in Long-Term Online Education Conditions. *Sustainability*, 15(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/su151813289>
21. Apse-Apsitis, P., Avotins, A., & Ribickis, L. (2012). Remote workshop for practical knowledge improvement in electrical engineering education: Computer control of electrical technology. *2012 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICL.2012.6402051>
22. *IoT arhitektura—Detaljno 4 glavne faze IoT arhitekture*. (n.d.). Education-WIKI.com. Retrieved November 13, 2023, from <https://hr.education-wiki.com/7028347-iot-architecture>
23. Apse-Apsitis, P. *Login*. My Digital Electrical Engineering. Retrieved July 3, 2023, from <https://remotelab.lv/dc/login.php>

24. *Ecosystem*. Electric Imp. Retrieved July 3, 2023, from <https://www.electricimp.com/ecosystem/>
25. *Imp003 Breakout | Dev Center*. (n.d.). Retrieved July 3, 2023, from <https://developer.electricimp.com/hardware/resources/reference-designs/imp003breakout>
26. 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*. 2019-October, 403–408.
27. 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*. 248–253. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236606>
28. 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>

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

Трунова Ірина Сергіївна¹, к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0677240653, trunova.irinaserg@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-4115>

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

Гнатова Ганна Андріївна¹, студентка автомобільного факультету ХНАДУ, тел. +38 0990679809, hannahnatova@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

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

Innovative approaches to the education of students of technical specialties in the conditions of war in Ukraine

Abstract. Problem. *The military aggression of the Russian Federation against Ukraine became a challenge to the very existence of the state, its sovereignty and collegiality, and also severely affected all components of education. There was a significant threat to the life and health of the participants of the educational process, large-scale destruction of the educational infrastructure took place, which caused the forced large-scale movement of participants in the educational process within Ukraine and abroad, and led to the deterioration of the provision of educational services and the*

acquisition of knowledge by those seeking education. This especially applies to specialties of the practical direction. Goal. *The aim of this work is to find ways to address the issue of educating Ukrainian students in technical specialties during times of war, to ensure safety, and improve the quality of educational services. Methodology.* *The study involves analytical research on laboratory and practical work in the context of distance learning. It includes detailed analysis the existing experience of remote performance of laboratory work and the possibilities of their use in the educational process of Ukrainian universities under the conditions of war was conducted. Results.* *The search for ways to borrow existing experience in the remote execution of laboratory work and the possibilities of their use in the educational process of Ukrainian universities in wartime conditions showed that it is advisable to implement them using the laboratory of digital remote electrical engineering education “My Digital Electrical Engineering”, developed by Riga Technical University. The structure of this laboratory and the algorithm for working with it have been studied. Originality.* *A step-by-step algorithm for introducing the laboratory of digital distance electrical engineering education into the educational process of KhNADU is proposed. Practical value.* *The results of this study can be used to enhance the process of distance learning in technical universities of Ukraine during times of war, ensuring safety and improving the quality of educational services.*

Key words: *distance education; electrical engineering; power engineering; war in Ukraine; online teaching; digital Tools; Virtual labs; quality of education, IoT.*

Arhun Shchasyana², professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Trunova Iryna¹, Ph.D., Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, tel. +38 0677240653, trunova.irinaserg@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-4115>.

Hnatov Andrii², professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Hnatova Hanna¹, student of the Automobile Faculty, tel.+38 0990679809, hannahnatova@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

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