

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ  
КАФЕДРА “АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

*“ ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З  
ЕЛЕКТРИЧНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ, ЩО ПРАЦЮЄ ВІД  
АКУМУЛЯТОРІВ АБО ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У РІЗНИХ ПРОФІЛЯХ  
ВИКОРИСТАННЯ ”*

ВИКОНАВ:

ХОЛОД АНТОН ЮРІЙОВИЧ

КЕРІВНИК:

МОНАСТИРСЬКИЙ ЮРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

Допущений до захисту

Зав. кафедрою АТ

« \_\_\_\_\_ » листопада 2024 р.

Ю.А.Монастирський

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ  
Кафедра “ Автомобільний транспорт ”  
Освітня програма – Автомобільний транспорт

Затверджую:

Зав. кафедрою АТ

\_\_\_\_\_ Ю.А.Монастирський

« » вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ  
*ХОЛОДУ АНТОНУ ЮРІЙОВИЧУ*

1. Тема роботи “ Оцінка продуктивності транспортного засобу з електричною силовою установкою, що працює від акумуляторів або паливних елементів у різних профілях використання ” затверджена наказом по університету від «16» вересня 2024 р. № 838с
2. Термін здачі закінченої роботи «30» листопада 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: *наукові статті за темою роботи.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: *Вступ, Вихідні дані та методи дослідження, Узагальнення результатів дослідження, Висновки, Список використаних джерел*
5. Перелік графічного матеріалу *Графіки та діаграми по результатам досліджень.*
6. Дата видачі завдання - \_\_\_\_\_ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор.№	Назва етапів випускної роботи	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналіз стану питання</i>	<i>10.09.24 – 01.10.24</i>	
2	<i>Методичні засади</i>	<i>02.10.24 – 20.10.24</i>	
3	<i>Дослідження та аналіз результатів</i>	<i>21.10.24 – 21.11.24</i>	
4	<i>Формулювання висновків</i>	<i>22.11.24 – 24.11.24</i>	
5	<i>Оформлення презентаційної частини</i>	<i>25.11.24 – 30.11.24</i>	

*Завдання видав керівник*

МОНАСТИРСЬКИЙ Ю.А.

*Завдання прийняв*

ХОЛОД АНТОН ЮРІЙОВИЧ

## ЗМІСТ

Анотація .....	4
1. Введення.....	5
2. Вихідні дані та методи дослідження.....	8
2.1. Тип транспортного засобу.....	8
2.2. Вибір циклу приводу .....	10
2.3. Розробка моделі для дослідження .....	11
2.4. Застосування моделі .....	17
3. Узагальнення результатів дослідження .....	21
3.1. Перевірка моделі .....	21
3.2. Оцінка ємності зберігання для кожного типу транспортного засобу для різноманітних діапазонів із різним корисним навантаженням .	22
3.3. Середнє споживання енергії на км на людину для різних сегментів транспортних засобів.....	29
3.4. Аналіз вартості трансмісії в сегментах транспортних засобів....	30
4. Висновки .....	35
Додаток А.....	38
Список літератури.....	40

## Анотація

Низькі показники заповнюваності транспортних засобів у поєднанні з рекордними продажами звичайних автомобілів виправдовують вимогу оптимізувати тип транспортного засобу на основі кількості пасажирів і силової установки з нульовим рівнем викидів. Це дослідження порівнює продуктивність різних типів транспортних засобів на основі кількості пасажирів/корисного навантаження, конфігурації трансмісії (електричні конфігурації батареї та паливних елементів) і циклів руху, щоб оцінити запас ходу та споживання енергії. Адекватний вибір сегмента транспортного засобу відповідно до реальної пасажиропотоку забезпечує найменше споживання енергії. Продуктивність автомобіля з точки зору запасу ходу вказує на чудові результати для FCEV (електричний автомобіль на паливних елементах) порівняно з BEV (електричний автомобіль з акумулятором), де перший досягав середнього запасу ходу 600 км або більше в усіх різних циклах руху, тоді як другий був пройшов лише близько 350 км. Рішуче, Аналіз витрат показав, що FCEV залишається найдорожчим варіантом з базовою вартістю втричі більшою, ніж BEV. FCEV показав помітні результати із середньою експлуатаційною вартістю менше 7 центів/км, де BEV коштував більше 10 євро/км на додаток до базової вартості для легкових автомобілів. Аналіз витрат на автобус і напіввантажівку показав, що з повним корисним навантаженням FCPT (силовий агрегат на паливних елементах) буде більш економічним із середньою вартістю енергії ~1,2 євро/км, тоді як з BPT вартість енергії перевищує 300 євро. /км.

Ключові слова: симуляція трансмісії ; продуктивність електромобіля ; сегменти автомобіля ; зайнятість ; корисне навантаження ; аналіз циклу приводу.

# 1. Введення

Енергія завжди вважалася основою будь-якої економіки в усьому світі. Індустріалізація та модернізація прискорили швидке зростання економіки разом із надмірним використанням викопних енергетичних ресурсів, що призвело до глобального потепління, повітря, води та шумового забруднення. Транспортний сектор намагається знайти альтернативи, які пом'якшують зовнішні ефекти, що призводить до збільшення кількості транспортних засобів у всьому світі [ 1 , 2 ] . Це прискорило потребу революціонізувати транспортну систему за допомогою більш ефективних силових агрегатів та енергетичних систем. Цей шлях призвів до розвитку нових технологій у транспортній системі, таких як електромобілі з акумуляторними батареями (BEV), гібридні електромобілі (PHEV) і електромобілі на паливних елементах (FCEV), які замінюють транспортні засоби з двигуном внутрішнього згоряння (ICEV). .

Відповідно до звіту Європейського агентства з охорони навколишнього середовища «Тенденції та прогнози в Європі 2020», загальна тенденція викидів парникових газів була скорочена на 26% до 2019 року (ЄС-28) порівняно з 1990 роком, що нижче цілі скорочення викидів парникових газів ЄС на 2020 рік [ 3 ]. Проте, 1103 Mt CO<sub>2eq</sub> загального обсягу викидів ЄС-28, близько 23% генерується автомобільним транспортом [ 4]. Завдяки нульовим викидам у вихлопну трубу, компенсації вуглецевого сліду та шумового забруднення електрифікація силових агрегатів стала світовою тенденцією. Крім того, можливість використання відновлюваної енергії в транспортних системах (наприклад, зелений водень, вітрова та сонячна енергія) виявилася важливою для зменшення викидів від колодязя до колеса, пов'язаних із цими альтернативними технологіями. З 2015 по 2020 рік продажі електромобілів стрімко зросли з 0,58 мільйона автомобілів до 3,24 мільйона одиниць у всьому світі, причому в Європі було зареєстровано майже 1,4 мільйона BEV і PHEV, що на 137% більше, ніж у 2019 році [5 , 6 ] .

Крім того, плавний перехід від транспортних засобів із звичайним двигуном до повністю електричних транспортних засобів повинен включати не лише легкі, але й середні та важкі [ 7 ]. Раніше проводилися дослідження з різними системами зберігання енергії електромобілів [ 8 ]. Використання батареї як системи накопичення енергії призводить до найменшого середнього споживання енергії на кілометр шляху завдяки вищій ефективності силової установки. Однак менший радіус дії та вимога до більшої батареї є суттєвим недоліком BEV [ 9 , 10 , 11 , 12] .]. Що стосується FCEV, дослідження показали, що при одній заправці 5 кг водню автомобіль може проїхати понад 500 км за менший час дозаправки. Навпаки, FCEV є менш сприятливим на даний момент [ 10 , 13 , 14 , 15 , 16], завдяки вищому середньому споживанню енергії на кілометр, меншій кількості заправок станцій і вищим капітальним витратам порівняно з BEV та ICEV. Ультраконденсатор (UC) також привертає увагу як новий варіант накопичення енергії через його вищу щільність потужності (1000–2000 кВт/кг). Він складається з опції швидкого заряджання та має набагато більшу потужність для виконання циклів заряджання та розряджання, що робить його вигідним вибором у варіантах транспортування. Він ідеально підходить для додатків, які вимагають більшого споживання енергії та можуть робити варіанти частої підзарядки, як-от EV для громадського транспорту [ 10 , 17 , 18 , 19 ]. Оцінка життєвого циклу, виконана Sacchi et al. [ 20] для серії вантажівок середньої та великої вантажопідйомності показує, що паливний елемент і батарея стануть найперспективнішими варіантами трансмісії для вантажівок у 2040 році навіть порівняно з передовими технологіями згоряння. Крім цього, для визначення оптимальної силової установки автомобіля також важливо оцінити профіль водіння та модель водіння користувача. Crozier та ін. [ 21 ] виконали детальне дослідження поведінкового аналізу профілів користувачів в електромобілях. Дослідження помітно показує, що користувачі, як правило, щодня долають відстань від 11 до 91 милі у Великобританії. Дослідження, проведене Sun et al. [ 22 ] показує

п'ять різних типів моделей використання транспортних засобів у робочий день на основі плаваючих даних про автомобілі у Франції зі змінними середніми значеннями та відстанню, пройденою за день.

Зі згаданої вище літератури можна помітити, що окремі дослідження були проведені для визначення оптимальної трансмісії автомобіля; однак жоден із них не дає чіткого уявлення про те, як продуктивність електромобілів змінюється залежно від кількості пасажирів і сегментів транспортних засобів для різних сценаріїв. Хоча трансмісія та профіль приводу впливають на продуктивність автомобіля, кількість пасажирів також впливає на продуктивність EV. Експлуатаційні результати, заявлені виробниками, враховують лише вагу транспортного засобу або з одним пасажиром для тестування та аналізу [ 23 ], але в реальних умовах транспортний засіб малої вантажопідйомності має право перевозити до 500 кг корисного навантаження, що може спричинити значні зміни в його продуктивності.

У цій роботі пропонується загальну імітаційну модель електромобіля для різних типів транспортних засобів для кількісної оцінки продуктивності транспортного засобу в електричній силовій установці, що працює від акумуляторів або паливних елементів у різних профілях використання. Інтегрований підхід охоплює всі сегменти транспортних засобів від мікроавтомобілів до вантажівок, шляхом оцінки енергоспоживання та економічності конфігурацій ВРТ і FCPT. Він також фіксує вплив описаних змінних: діапазон від 100–500 км; різні профілі водіння, включаючи цикли сертифікації та реальні цикли водіння; різні сегменти автомобіля; і різна маса корисного навантаження. У цьому дослідженні представлено інноваційний підхід, який дозволяє розробити індивідуальну трансмісію електромобіля та рішення для зберігання енергії на основі вимог профілю користувача.

## 2. Вихідні дані та методи дослідження

Це дослідження спрямоване на аналіз продуктивності транспортного засобу з різними конфігураціями трансмісії, профілями водіння, кількістю пасажирів і сегментами автомобіля. Щоб прийняти ці параметри як змінну, потрібна дуже гнучка модель. Модель повинна бути здатна розглядати попередні параметри як змінну. З огляду на потребу в гнучкості та аналізі різних сценаріїв, уже розроблену модель Simulink з було змінено відповідно до вимог цього дослідження [ 9 , 10] . Для цього дослідження модель була переглянута на основі попередньої моделі з налаштованим їздовим циклом для іншого аналізу, а визначені типи транспортних засобів були замінені загальною моделлю транспортних засобів для вивчення різних типів транспортних засобів. Модель складається з шести підсистем, включаючи цикл руху, модель автомобіля, фізичну модель автомобіля, систему двигуна, систему акумулятора та систему паливних елементів.

### 2.1. Тип транспортного засобу

Для цього дослідження було розглянуто шість загальних транспортних засобів на основі типів транспортних засобів, існуючих на автомобільному ринку. Таблиця 1 показує різні типи транспортних засобів, розміри та фізичні властивості (відповідає середньому значенню вибірки доступних транспортних засобів на ринку).

Таблиця 1. Сегмент транспортного засобу та фізичні властивості [ 49 ] .

Vehicle Type	Micro-Car	Urban 4s	Extra-Urban 5s	Shuttle	Bus	Semi-Truck
Mass * (kg)	450	1200	1350	1600	11,000	10,000
Motor power (kW)	13	130	130	60	220	560
Motor torque (N)	100	340	340	360	1200	2600
Max speed (kmph)	60	145	145	60	90	90
Max payload (kg)	150	350	500	1000	4500	27,000

З огляду на поточні ринкові тенденції, мікроавтомобілі відзначають своє домінування в багатьох відомих країнах продажу електромобілів. Завдяки низькому енергоспоживанню, більшій тривалості роботи



аккумулятора, простоті використання та зручності мікроавтомобілі стають популярними серед користувачів електромобілів. У Китаї венчурне підприємство GM Micro-EV стало найбільш продаваним електромобілем у серпні 2020 року, за ним йшла Tesla Model 3 під час пандемії [ 24 ]. Згідно з прогнозом Fortune Business Insights, у 2026 році розмір ринку мікроавтомобілів досягне 5,8 мільярдів доларів США [ 25 ].

Щоб вивчити концепцію індивідуального транспортного засобу для індивідуального використання, включено чотиримісний міський транспортний засіб (Urban 4s), метою якого є вивчення реальних характеристик компактного міського автомобіля з максимум чотирма пасажирами замість п'яти. Менший розмір автомобіля з меншою вагою порівняно з п'ятимісним транспортним засобом сприяє зменшенню споживання енергії та, можливо, більшому запасу ходу та тривалості роботи батареї. Ця гіпотеза буде пояснена пізніше на етапі аналізу. Для фізичних властивостей існуючий тип транспортного засобу хетчбек розглядається як 4-місний EV.

Для порівняння з більшістю електромобілів, представлених на ринку, також розглядається п'ятимісна позаміська модель (Extra-urban 5s). Властивості автомобіля визначаються на основі середнього показника аналогічних електромобілів (седан), присутніх на ринку. На додаток до цього, в контексті зростаючої потреби в просуванні модального переходу до варіантів масового транспорту та поштовху до послуг на вимогу, у дослідженні аналізується модель шатла з електричним приводом.

Крім того, через значну частку транспортних засобів великої вантажопідйомності в транспортному секторі (430 000 одиниць [ 26 ]) і враховуючи, що цей сектор був повільнішим у прийнятті альтернативних рішень, транспортні засоби великої вантажопідйомності, зокрема автобуси та напіввантажівки, також включені через їхню різну специфіку з точки зору конструкції трансмісії та пов'язаних моделей мобільності.

## 2.2. Вибір циклу приводу

Дані циклу руху суттєво впливають на результати моделювання, оскільки вони представляють робочі умови автомобіля. Типи транспортних засобів, описані в таблиці 1, були протестовані за допомогою сертифікованих і реальних циклів їзди, щоб вивчити їх енергоефективність. Цикл водіння WLTP класу 3 використовується як сертифікований цикл водіння для легкових транспортних засобів [ 27 ]. Для реального їздового циклу 2 окремі їздові цикли з рівнем дороги були витягнуті з більшої реальної вибірки їздових циклів, зібраної для легкових автомобілів у Лісабоні, Португалія [12] (перевірте Додаток А , Малюнок А1 ( Реальний цикл руху 1 (тривалість: 1800 с)) для реального циклу руху 1-RW1 і малюнку А2(Реальний цикл руху 2 (тривалість: 1880 с)) для реального циклу руху 2-RW2). Оскільки Micro-car і Shuttle мають обмежену потужність двигуна, максимальна швидкість, яку вони можуть досягти, нижча, ніж Urban 4s і Extra-urban 5s, тому використовувалися цикли руху з нижчою швидкістю, отримані раніше для мікроавтомобілів [28 ] . Крім того, сертифікований їздовий цикл WLTP модифікований для колишніх автомобілів з максимальною швидкістю 55 км/год. На рисунку А3 (Реальний цикл водіння мікроавтомобіля/шатла (тривалість: 14 004 с)) показано реальний цикл водіння мікроавтомобіля/шатла (RW\_m) і на малюнку А4 ( Модифікований цикл водіння WLTP класу 3 (тривалість: 1800 с) )) показує модифікований їздовий цикл WLTP класу 3. Таблиця 2 детально описує специфікацію циклів приводу, які використовуються для аналізу транспортних засобів малої вантажопідйомності.

Таблиця 2. Специфікації їздового циклу для різних типів транспортних засобів [ 49 ].

Drive-Cycles	WLTP C3 Modified	WLTP C3	RW_1	RW_2	RW_m	RW_b	RW_st
Distance (km)	17.6	23.3	17.8	27.1	46.9	71.3	93.83
Av speed (kmph)	31.5	46.5	35.5	51.8	12.1	19.18	30.63
Max speed (kmph)	55.0	131.4	75.0	103.0	53.9	74.9	58.5
Duration (s)	1800	1800	1800	1880	14,010	13,353	11,027
Av positive acc. (m/s <sup>2</sup> )	0.50	0.41	0.57	0.48	0.42	0.33	0.10
Av negative acc. (m/s <sup>2</sup> )	-0.19	-0.32	-0.45	-0.40	-0.22	-0.27	-0.11
Av positive road grade	-	-	0.025	0.019	0.027	0.037	0.028
Av negative road grade	-	-	-0.020	-0.019	-0.033	-0.033	-0.031

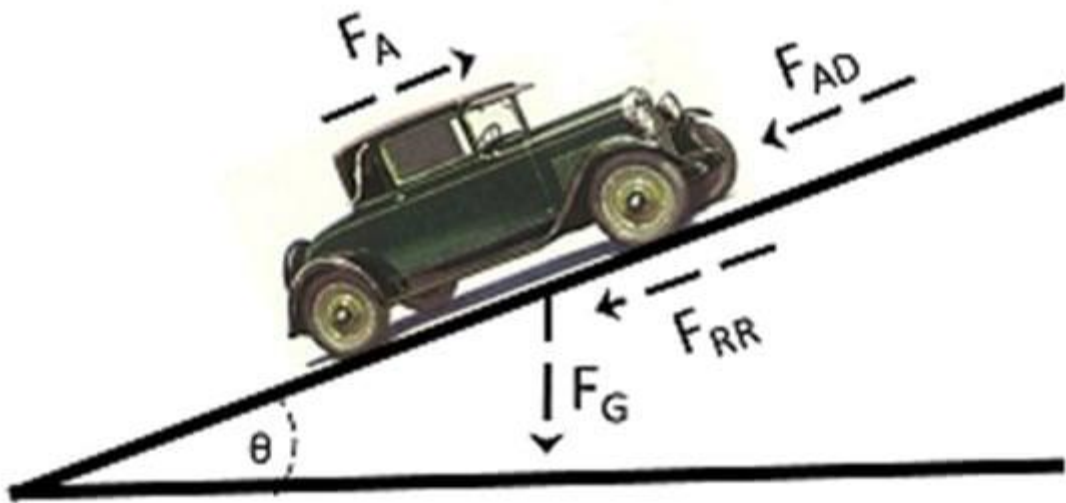
Для великовантажних транспортних засобів, оскільки немає сертифікованих їздових циклів, вони аналізуються лише з реальними їздовими циклами, які були зареєстровані в попередніх дослідженнях [ 10 , 29 ]. Рисунок А5 (Реальний цикл руху для автобуса (тривалість: 13 353 с)) представляє реальний цикл руху, використаний для моделювання автобуса, а Рисунок А6 (Реальний цикл руху для напіввантажівки (тривалість: 11 027 с)) показати профіль швидкості реального циклу руху, який використовується для моделювання напіввантажівки. Таблиця 2 показує специфікацію циклу руху, що використовується для моделювання транспортних засобів великої вантажопідйомності (RW\_b представляє реальний цикл руху для автобуса, а RW\_st представляє специфікації реального циклу руху для напіввантажівки).

### 2.3. Розробка моделі для дослідження

Розроблена модель складається з шести підсистем, включаючи цикл руху, модель транспортного засобу, фізичну модель автомобіля, систему двигуна, систему акумулятора та систему паливних елементів. Посекундні цикли приводу, визначені в розділі 2.2 , імпортуються як вхідні сигнали в підсистему циклу приводу. У моделі транспортного засобу технічні характеристики транспортного засобу були враховані на основі інформації, представленої в розділі 2.1 . Модель дозволяє змінювати ємність батареї,

максимальну потужність паливного елемента та тип сегмента автомобіля в цій підсистемі.

Підсистема фізичної моделі транспортного засобу складається з механічних, математичних і числових виразів для опису фізичної поведінки транспортного засобу, як і в інших дослідженнях у літературі [ 30 ]. Сила тяги, необхідна для прискорення транспортного засобу, і сили уповільнення розраховуються на основі одновимірного основного руху транспортного засобу. Це дає змогу обчислювати потребу в потужності транспортного засобу за кожну секунду на основі даних циклу водіння та базових сил навантаження транспортного засобу, як показано на малюнку 1 .



Малюнок 1. Сили, що діють на транспортний засіб [ 49 ].

Загальна сила, необхідна для руху транспортного засобу, називається силою тяги і розраховується як:

$$F_T = F_A + F_G + F_{RR} + F_{AD} \quad (1)$$

де  $F_A$  — сила прискорення (N),

$F_G$  — гравітаційна сила (N),

$F_{RR}$  — опір коченню (N),

$F_{AD}$  — аеродинамічний опір (N).

Попередній вираз розгортається так:

$$FT (N)=(m \times a)+(12 \times C_d \times \rho \times A_f \times v^2)+(C_r \times m \times g \times \cos \theta)+(m \times g \times \sin \theta) \quad (2)$$

де  $m$  – маса автомобіля (кг),

$a$  – прискорення ( $\text{м/с}^2$ ),

$C_d$  – коефіцієнт лобового опору,

$A_f$  – лобова площа автомобіля ( $\text{м}^2$ ),

$v$  – швидкість ( $\text{м/с}$ ),

$C_r$  – коефіцієнт опору коченню,

$g$  – прискорення сили тяжіння ( $\text{м/с}^2$ ),

$\theta$  – ухил дороги [ 9 ].

Модель розроблена таким чином, що щільність повітря обчислюється чисельно для кожного моделювання [ 31 ]. Опір коченню визначається на основі середньої швидкості циклу руху. Експериментальні результати шини T1071 (сучасна шина) на дорожньому покритті ISO r20 (еталонна поверхня ISO) при різних швидкостях беруться як еталонні для розрахунку коефіцієнта опору коченню [ 32 ].

У підсистемі двигуна чисельно моделюється двигун/генератор постійного струму з постійним магнітом. Крива ККД двигуна Nissan leaf 80 кВт взята за еталонну. Під час руху вперед/прискорення двигун постійного струму з постійним магнітом (PMDC) використовується як двигун, а під час гальмування/уповільнення PMDC працює як генератор і витягує енергію за допомогою рекуперативного гальмування. Рівняння (3) представляє вихідну потужність від PMDC до колеса під час прискорення, а рівняння (4) представляє регенеративне виробництво енергії під час гальмування. Потужність, необхідна протягом кожної секунди подорожі, обчислюється як сума потужності, необхідної для прискорення ( $P_{wheel}$ ), допоміжної потужності ( $P_{AUX}$ ) і втрати потужності ( $P_{loss}$ ), яка представлена у рівнянні (5)

$$P_{wheel} (W) = Ft \times v / \eta_m \quad (3)$$

$$P_{regen} (W) = F_T \times \eta_{regen} \quad (4)$$

$$P_{total} (W) = P_{wheel} + P_{AUX} + P_{loss} \quad (5)$$

де  $\eta_m$  (%) – ефективність двигуна,

$\eta_{regen}$  (%) – ефективність регенерації.

Очікується, що ефективність регенерації в конкретній точці уповільнення буде такою ж, як ефективність двигуна в тій самій точці прискорення, однак, згідно з літературою, максимальне виробництво рекуперативної енергії було обмежено до 25% від потужності двигуна [33 , 34].

Для акумуляторної силової установки (ВРТ) загальна потужність, що зберігається в батареї, визначається як добуток напруги (  $V$  ) батареї та загального струму (  $I$  ) в батареї, як представлено рівнянням (6). Струм, що надходить під час заряджання (рекуперативне гальмування) і вилучається під час розряджання (режим прискорення) батареї, оцінюється за рівнянням (7), а напруга на клеммах  $V_t$  обчислюється за рівнянням (8):

$$P_{bat} = V \times I \quad (6)$$

$$I (A) = \frac{V_t - \sqrt{V_t^2 - 4RP_{wheel}}}{2R} \quad (7)$$

$$V_t = V_{t(t-1)} - V_{пад} \quad (8)$$

де  $R$  — внутрішній опір акумулятора ( $\Omega$ ),

$t$  — час у секундах.

Опір батареї вважається рівним 0,1 Ом [ 35 ]. Загальна енергія, споживана протягом циклу руху, оцінюється шляхом підсумовування

споживання електроенергії за кожну секунду циклу руху. Остаточне загальне споживання електроенергії оцінюється шляхом віднесення різниці між загальним споживанням електроенергії та регенеративною енергією, виробленою під час подорожі, як представлено в рівнянні (9)

$$PT = \sum_{T=1}^T (P_{total} - P_{regen}) \quad (9)$$

Середнє споживання енергії ( $E_{avg}$ ) транспортного засобу – це кількість енергії, яка споживається для досягнення кожної одиниці відстані, км, і розраховується, як показано в рівнянні (10). Дальність (км) транспортного засобу розраховується, як показано в рівнянні (11)

$$E_{avg} \text{ (Вт} \cdot \text{год / км)} = Pt/d \quad (10)$$

$$Range = P_{bat}/E_{avg} \quad (11)$$

де  $d$  – відстань, пройдена за цикл руху (км).

Слід зазначити, що 100% наявної ємності енергії не можна використовувати, акумулятор зберігає останні 15% своєї щільності енергії, щоб запобігти повному розряду.

Стан заряду (SOC) визначається як рівень заряду акумулятора по відношенню до його ємності. Він представлений у відсотках: 100% означає повністю заряджений акумулятор, а 0% означає розряджений акумулятор. SOC обчислюється щосекунди за допомогою методу підрахунку кулонівського струму (див. рівняння (12)):

$$SOC(t) = SOC(t-1) \pm I_t/I \quad (12)$$

де  $I$  — струм, що зберігається в акумуляторі і струм, що споживається в цю конкретну секунду.

Для трансмісії на паливних елементах (FCPT) паливний елемент з протонообмінною мембраною (PEMFC) моделюється на основі поляризаційної кривої Toyota Mirai 2017, яка береться за еталон [36 , 37 ] . Частина вихідної потужності паливного елемента, необхідна для підтримки

$$P_{fc} (W) = \frac{P_{fcp}}{1 - BOP}$$

робочого стану, називається балансом установки (BOP). Потім потужність паливного елемента ( $P_{fc}$ ) розраховується за допомогою рівняння (13):

(13)

де  $P_{fcp}$  — максимальна потужність паливного елемента.

За поляризаційною кривою оцінюють струм і напругу для необхідної потужності. Вихідна напруга пакета ( $V$ ) паливного елемента – це загальна напруга, створена кількістю елементів у пакеті ( $N_c$ ), яка визначається як:

$$V_{fc p} = N_c \times V_{fc} \quad (14)$$

Електричний ККД паливних елементів розраховується як відношення вихідної електроенергії до енергії, що надходить від водню. Загальну ефективність модуля також можна розрахувати як добуток факторів, як показано в рівнянні (15):

$$\eta = \eta_{th} \times \eta_v \times \eta_F \times \mu_F \quad (15)$$

Де  $\eta_{th}$  -термодинамічна ефективність,

$\eta_v$  -ефективність напруги,

$\eta_F$  фарадичний ККД

$\mu_F$  - коефіцієнт використання.



Термодинамічна ефективність, фарадична ефективність і коефіцієнт використання приймаються рівними 0,83, 0,9 і 1 відповідно [ 38 ], а ефективність напруги обчислюється за рівнянням (16), а масова витрата палива водню обчислюється за рівнянням (17) :

$$\eta v = V f c / 1.23 \quad (16)$$

$$m_{H_2} (\text{г/с}) = P_{fc} / (Q \times \eta) \quad (17)$$

де  $Q = 120$  МДж/кг або  $33,33$  кВт·год — нижча теплотворна здатність/питома енергія водню.

Оскільки вимоги до потужності змінюються щосекунди, вироблені струм і напруга також змінюються, і це вплине на роботу паливного елемента. Щоб перехопити це, використовується DC-DC перетворювач з ефективністю 90%. Запас ходу (км) автомобіля розраховується як:

$$Range \text{ (km)} = m_{H_2} \times 33.33 \times 1000 / E_{avg} \quad (18)$$

Для FCPT моделювання виконується таким чином, що енергія, необхідна для круїзу, повністю виробляється через бортовий стек FC, тоді як енергія, необхідна для допоміжного споживання, постачається вторинною батареєю, яка моделюється подібно до акумуляторної системи. для ВРТ.

## 2.4. Застосування моделі

Імітаційна модель, розроблена для цього дослідження, визнана гнучкою, оскільки вона дозволяє нам легко змінювати кількість пасажирів, різні профілі водіння, типи сегментів транспортних засобів і варіанти зберігання як окремі змінні. Це допомагає оцінити різницю в продуктивності автомобіля в різних сценаріях водіння та визначити наслідки під час водіння

в реальному світі. За допомогою цієї моделі було проведено наступний аналіз.

- Оцінка обсягу зберігання для кожного типу транспортного засобу для різноманітних діапазонів з різним корисним навантаженням: діапазон є одним із ключових факторів, які впливають на світові продажі електромобілів. Виробники перевіряють сегменти транспортних засобів із сертифікованим їздовим циклом у суворих умовах випробувань і розглядають лише 1 пасажиря як водія. Однак у реальних умовах продуктивність різко змінюється. Користувачі не дотримуються сертифікованих їздових циклів прискорень і стикаються з різними профілями топографії доріг, виправдовуючи аналіз реальними їздовими циклами. Разом з цим, корисне навантаження транспортного засобу збільшується в дорожніх умовах відповідно до моделей використання, оскільки транспортні засоби можуть бути повністю або частково зайняті. Транспортні засоби, представлені в таблиці 1, вивчаються для різних циклів руху, описаних у розділі 2.2 для різних вантажопідйомностей 150, 250, 350 і 500 кг для легкових транспортних засобів. Для електричного автобуса моделювання проводилося для 10, 25, 40 і 55 пасажирів, які розглядалися як корисне навантаження, тоді як для напіввантажівки розглядалися 25%, 50%, 75% і 100% максимальної вантажопідйомності.

З аналізу існуючих BEV на ринку середня маса батареї транспортного засобу оцінюється як 32% спорядженої маси автомобіля без батареї [ 39, 40 ]. Припускаючи сучасні батареї в майбутніх автомобілях, оптимістичне значення 35% вважається максимальною масою накопичувача енергії. Крім того, для автобусів і напіввантажівок співвідношення змінюється до 26% і 42% відповідно [ 41 ]. Таблиця 3 показує максимальну масу батареї для кожного сегмента транспортного засобу та відповідну ємність батареї на основі призначеної маси батареї, а також специфікацій, прийнятих для FCPT.

Вважається, що середня маса батареї становить 8 кг/кВт-год, що також оцінюється за співвідношенням акумуляторної батареї та ваги від BEV,

доступного на ринку [ 10 , 40 ]. Для транспортних засобів на паливних елементах максимальний запас водню в FCEV на даний момент становить 5,6 кг [ 42 ], що також передбачається для моделювання легкових автомобілів.

Таблиця 3. Специфікація батареї для сегментів автомобіля [ 49 ].

Vehicles	Vehicle Mass (kg)	Battery Mass (kg)	Battery Capacity (kWh)	Payload (kg)/Passengers (no.)	Fuel Cell Capacity (kW)	H <sub>2</sub> Stored (kg)
Micro-car	450	152	19	150/2	13	3
Urban 4s	1200	424	53	350/4	130	5.6
Extra urban 5s	1350	472	59	500/5	130	5.6
Shuttle	1600	560	70	1000/12	60	5.6
Bus	11,000	2880	360	4500/60	220	100
Semi-Truck	10,000	4160	520	27,000	520	100

Для транспортних засобів великої вантажопідйомності розглядається ємність для зберігання H<sub>2</sub> вагою 100 кг , натхненна останнім транспортним засобом великої вантажопідйомності, випущеним компанією Nikola Motors (напіввантажівка Nikola 2) [ 43 ]. Базуючись на накопичувачі водню, модель оцінює масу накопичувального баку на додаток до маси автомобіля.

Середнє споживання енергії на кілометр на людину для різних сегментів транспортних засобів: Слід зазначити, що коли ми розглядаємо більші типи транспортних засобів для транспортування, ймовірно, середнє споживання енергії буде вищим, ніж для інших менших сегментів. І навпаки, аналізуючи кількість пасажирів, які проїхали, п'ятимісний транспортний засіб може мати найменше середнє споживання енергії на кожного пасажирів, ніж чотиримісний транспортний засіб, що показує, що п'ятимісний транспортний засіб має менше середнє споживання енергії на людину. Хоча споживання енергії на одного пасажирів зазвичай не враховується, воно може мати значне значення в майбутньому в ширшому впровадженні спільних транспортних рішень. Аналізуючи середнє споживання енергії на людину на одиницю відстані, можна визначити оптимальний вибір сегмента транспортного засобу на основі кількості пасажирів.

Аналіз вартості трансмісії в сегментах транспортних засобів: вартість транспортного засобу є одним із важливих факторів прийняття рішення з точки зору користувача перед покупкою електромобіля. На ринку ICEV отримав звання найдоступніших транспортних засобів, тоді як FCEV є найдорожчим варіантом, враховуючи ту саму категорію транспортних засобів, поміж BEV [ 10 ]. Однак для BEV і FCEV витрати на експлуатацію та технічне обслуговування становлять близько 10–20% CAPEX, а ICE сягає до 50%, що робить загальну вартість володіння майже рівною BEV протягом усього терміну служби автомобіля [10] . У цьому дослідженні проводиться аналіз витрат на трансмісії, де аналізуються витрати на різні варіанти накопичення енергії та експлуатаційні витрати для всієї поїздки, а також для транспортування одного пасажера або одиниці корисного вантажу.

Припущення щодо вартості ґрунтувалися на літературі. Наразі, через обмежене виробництво транспортних засобів, собівартість виробництва одиничної стеки FC становить близько 175 євро/кВт [ 10 ]. Збільшення виробництва до 100 000 одиниць на рік може знизити ціну нижче 60 євро/кВт [ 44 ]. У цьому дослідженні було розглянуто масове виробництво блоків FC. Що стосується ціни на паливо, то 0,21 євро/кВт-год вважається ціною електроенергії та 11,3 євро/кг для водню, тоді як середня вартість технічного обслуговування вважається 0,018 євро/км для обох транспортних засобів [10 , 45] . Вартість зберігання водню також включена в аналіз витрат на основі накопичення енергії, передбаченого для цих типів транспортних засобів [ 46 ]. Крім того, вартість батареї зараз оцінюється в 118 євро/кВт-год [ 46]. Крім того, це дослідження враховує технологічне зростання в майбутньому, і за оцінками, ціна на водневе паливо може бути знижена на 60% і досягне 6,5 євро/кг у 2030 році [47] . Батарея також стане дешевшою з орієнтовною вартістю 48 євро/кВт-год у 2030 році [ 46 ].

### 3. Узагальнення результатів дослідження

Розроблена імітаційна модель перевірена для різних типів транспортних засобів з різними циклами руху для транспортних засобів ВРТ і FCPT. Спочатку модель перевіряється та виконується аналіз. Аналіз виконується в два етапи: перший етап включає в себе аналіз транспортних засобів легкої вантажопідйомності для різних профілів водіння та корисного навантаження, а під час другого етапу аналіз транспортних засобів великої вантажопідйомності виконується як для конфігурацій BEV, так і для FCEV.

#### 3.1. Перевірка моделі

Перевірка моделі виконується в два етапи, спочатку для BEV, а потім для FCEV [ 9 , 10]. Для перевірки використовується їздовий цикл WLTP класу 3, а потім результати моделювання порівнюються з результатами лабораторних випробувань. Сім різних моделей транспортних засобів, доступних на ринку від різних виробників транспортних засобів, були протестовані за допомогою сертифікованого їздового циклу для підтвердження моделі. Для FCEV результати моделювання Toyota Mirai порівнювали з результатами лабораторних випробувань FTP 75 і HWFET. Для транспортних засобів великої вантажопідйомності (HDV) автобус City eGold був змодельований у реальному циклі руху, а результати порівнювалися із зафіксованим споживанням енергії. Технічні характеристики транспортного засобу, такі як розміри транспортного засобу, маса автомобіля, маса акумулятора та інші параметри, наведені для вибраних транспортних засобів, а результати зведені в таблицю 4 .

Результати порівняння показали, що результати імітаційної моделі були надійними із середньою середньою похибкою 5% для транспортних засобів легкої вантажопідйомності та 2% для транспортних засобів великої вантажопідйомності [ 9 , 10 ]. Це свідчить про надійність і послідовність моделі.

Таблиця 4. Результати моделювання електромобіля (EV) (похибка порівняно з еталонним, %) [ 49 ].

Vehicle	Energy Consumption (Wh/km)	Range (km)	Battery Rated Energy (kWh) or Hydrogen Stored (kg)
EV			
Nissan Leaf S	138.6 (-1.7)	288 (1.4)	40.0
Renault Zoe R110	132.5 (0.4)	392 (-0.8)	52.0
Kia Niro	140.2 (3.0)	280 (-3.2)	39.2
Kia Soul EV	145.1 (2.1)	271 (-2.2)	39.2
Hyundai IONIQ	122.1 (-0.7)	313 (0.6)	38.3
BMW i3	129.9 (-2.4)	324 (2.8)	42.0
Mini Cooper	121.9 (-1.7)	267 (1.5)	32.6
City eGold (HDV)	822.5 (-1.1)	103.3	85
Fuel cell EV			
Toyota Mirai	313.5 (1.3)	528 (4.6)	5.6 (kg of H <sub>2</sub> )

### 3.2. Оцінка ємності зберігання для кожного типу транспортного засобу для різноманітних діапазонів із різним корисним навантаженням

Діапазон електромобілів є однією з найважливіших змінних, коли мова заходить про електромобілі, і в цьому аналізі симулюються різні типи транспортних засобів із різними їздовими циклами та корисним навантаженням. Це допомагає оцінити потребу в накопиченні енергії (ємність батареї або кількість накопиченого H<sub>2</sub>) для досягнення певних позначок діапазону з кожним варіантом трансмісії. Для транспортних засобів легкої вантажопідйомності транспортний засіб моделюється з різними діапазонами маси корисного навантаження від 150, 250, 350 і 500 кг, що відповідає 2, 3, 4 і 5 пасажиром відповідно, разом із максимально можливою додатковою вагою. Враховуючи максимальну ємність батареї та характеристики паливного елемента з таблиці Зможна оцінити запас енергії, необхідний для транспортування корисного вантажу вагою 150 кг у різних сегментах транспортного засобу, враховуючи повну конфігурацію BEV або FCEV, дотримуючись різних циклів руху, як показано на рисунку 2, малюнку 3, малюнку 4 та малюнку 5. Вони показують вимоги до зберігання енергії для корисного навантаження 250, 350 і 500 кг відповідно.

Легенди до рисунків:

	WLTP red.—мікрокар;
	WLTP red.—Urban 4s;
	WLTP red.—Позаміський 5с;
	WLTP C3—Urban 4s;
	WLTP — позаміські 5с;
	RW_m—мікроавтомобіль;
	RW1—Міські 4s;
	RW1—позаміські 5с;
	RW2—Міські 4s;
	RW2—позаміський 5с;
	Мікрокар — максимальна місткість;
	Urban 4s — максимальна місткість;
	Позаміські 5с — максимальна місткість.

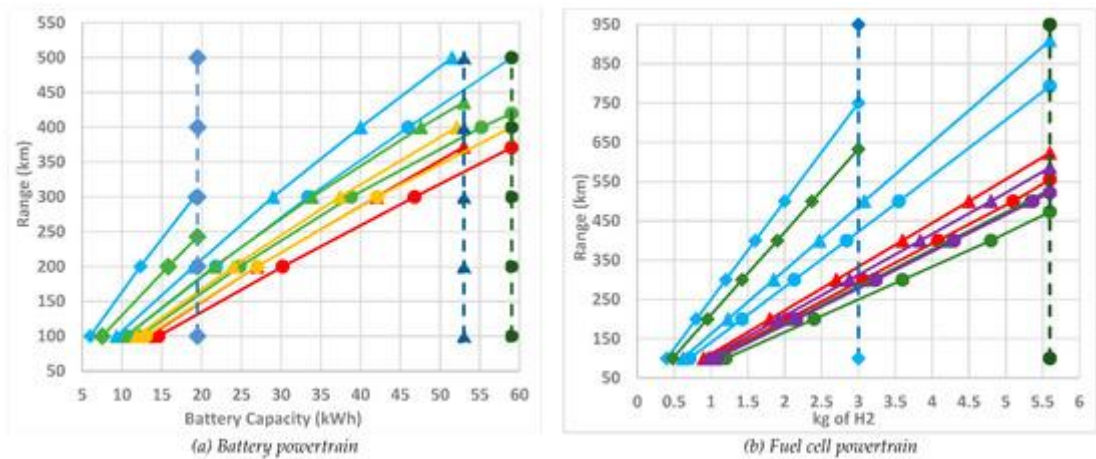


Рисунок 2. Вимоги до накопичення енергії для транспортування 150 кг корисного вантажу з різними циклами руху.

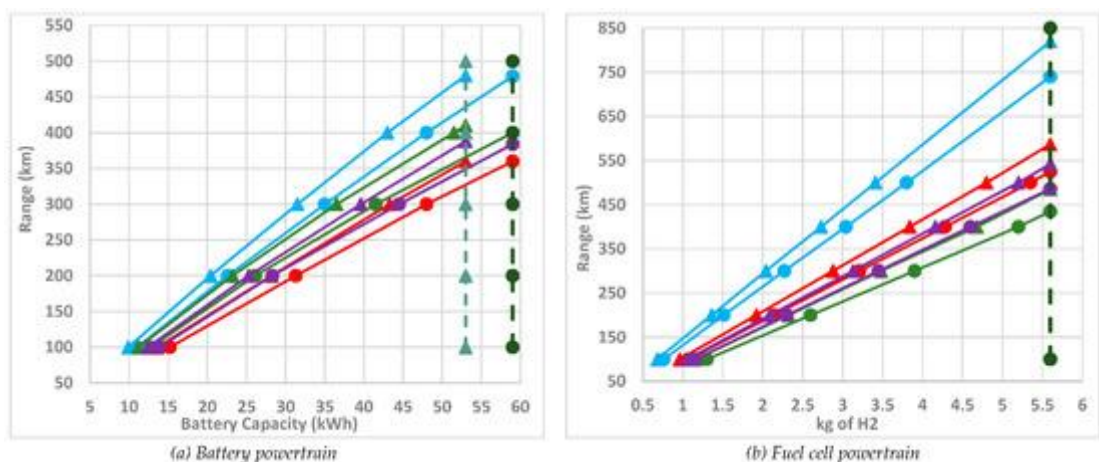


Рисунок 3. Вимоги до накопичення енергії для транспортування 250 кг корисного вантажу з різними циклами руху.

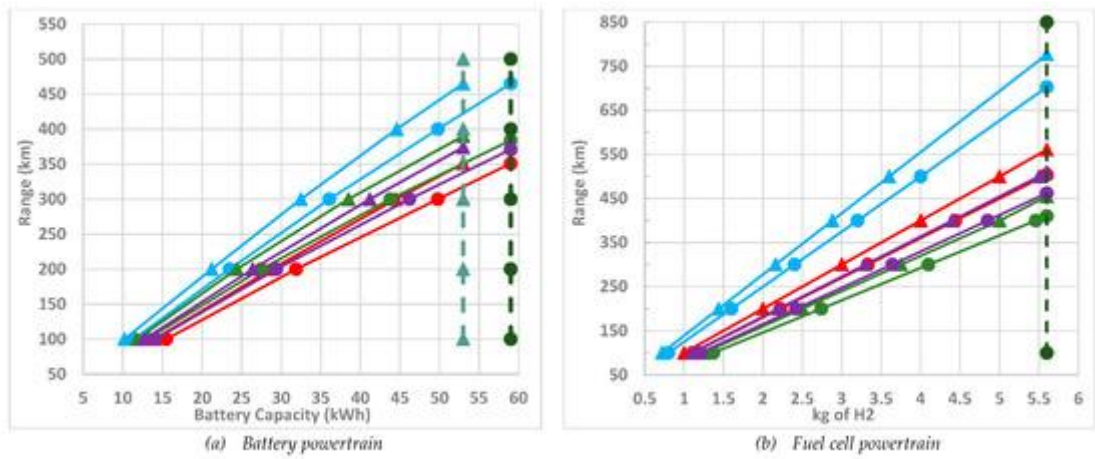


Рисунок 4. Вимоги до накопичення енергії для транспортування 350 кг корисного вантажу з різними циклами руху.

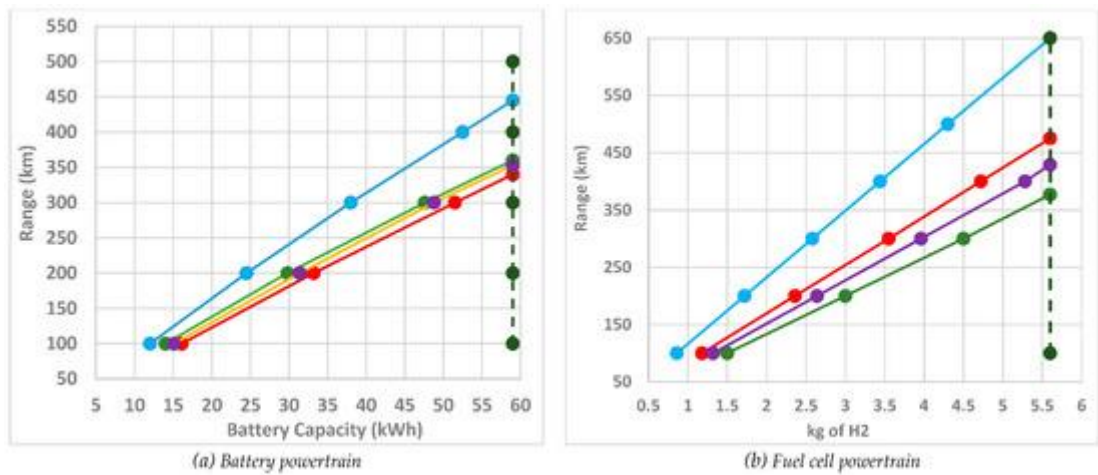


Рисунок 5. Вимоги до зберігання енергії для транспортування 500 кг корисного вантажу з різними циклами руху.

Було змодельовано транспортні засоби для досягнення маркера дальності 100 км, 200 км, 300 км, 400 км і 500 км, а результати нанесено на малюнки 2 , 3 , 4 та 5 . Симуляції розширюються, щоб проаналізувати максимальний діапазон, який можна подолати з призначеною ємністю накопичувача енергії, і обмежуються після того, як транспортний засіб досяг максимально можливої відстані з максимально можливою ємністю накопичувача.

На рисунку 2 показано обсяг енергії, необхідний для перевезення двох пасажирів мікроавтомобіля. Ми бачимо, що мікроавтомобіль може проїхати в



середньому 270 км із середнім споживанням енергії 74 Вт/км. Тоді як міський 4s або позаміський 5s транспортний засіб досягає більшого запасу ходу 430 км і 445 км із середнім споживанням енергії 124 і 140 Вт-год/км відповідно. Це вказує на те, що мікроавтомобіль ідеально підійде для 2 пасажирів, задовольняючи вимоги циклу водіння та мінімальне споживання енергії, а сучасні технології заряджання дають додаткові переваги у скороченні часу заряджання батареї ємністю 13 кВт/год, ніж для батареї 53 або 59. кВт/год акумуляторів.

На рисунках 3 і 4 показано результати моделювання транспортних засобів, що перевозять корисний вантаж 250 і 350 кг відповідно. Для вантажопідйомності 250 кг і 350 кг або 3 і 4 пасажирів автомобілі Urban 4s і Extra-Urban 5s можуть перевозити майже однакову дальність, однак Urban 4s перевозить тих самих пасажирів з меншим споживанням енергії. Для корисного навантаження 500 кг імітується лише тип автомобіля Extra Urban 5s малюнку 5 показано результати моделювання.

З іншого боку, дивлячись на FCPT для двох пасажирів ( рис. 2 ), мікрокар може досягти середнього запасу ходу 690 км із 3 кг водню та 13 кВт FC FC, тоді як автомобілі Urban 4s і позаміські 5s з 5,6 кг водню і 130 кВт FC досягають середньої відстані 660 і 590 км відповідно. Мікрокар досяг більшого запасу ходу в 690 км завдяки меншому профілю прискорення та загальній масі автомобіля. Беручи до уваги Urban 4s і Extra-urban 5s, меншу загальну масу та однакову ємність бака FC і накопичене паливо, Urban 4s можуть досягати більших відстаней, ніж Extra-urban 5s. Подібну тенденцію можна спостерігати за результатами з різними корисними навантаженнями на рисунках 3 , 4 і 5 .

В таблиці A1 (приведена у додатку A) детально показано середнє споживання енергії, запас ходу та енергію рекуперативного гальмування, вироблену для різних сегментів транспортних засобів із різними циклами руху для змінного корисного навантаження. Порівнюючи FCPT і ВРТ, ми можемо помітити, що для більших відстаней ємність акумулятора повинна

бути збільшена в певний момент. Через вантажопідйомність шасі та фактори безпеки ємність акумулятора не можна збільшити. Це обмежує запас ходу BEV до 400 км або менше за реальних їздових циклів. На відміну від цього, для FCEV потрібен лише додатковий простір для паливного палива, який менше впливає на загальну масу автомобіля та вантажопідйомність шасі, і тому може легко досягти запасу ходу 600 км і більше за реальних їздових циклів.

Моделювання було однаково виконано для маршрутки, автобуса та напіввантажівки. На рисунку 6 показано результати моделювання транспортного засобу-шатла з урахуванням корисного навантаження 1000 кг або загалом 12 пасажирів. Можна побачити, що з максимально дозволеною ємністю батареї 70 кВт/год транспортний засіб може проїхати в середньому лише 270 км, тоді як із FCPT автомобіль може проїхати на 80 км більше лише з передбачуваним накопиченням  $H_2$  5,6 кг. Розглядаючи застосування транспортного засобу, припускаючи, що додаткове зберігання водню за допомогою FCPT практично здійснимо та пояснюється, транспортний засіб може досягати більшого запасу ходу без жодного навантаження на існуючу загальну масу автомобіля.

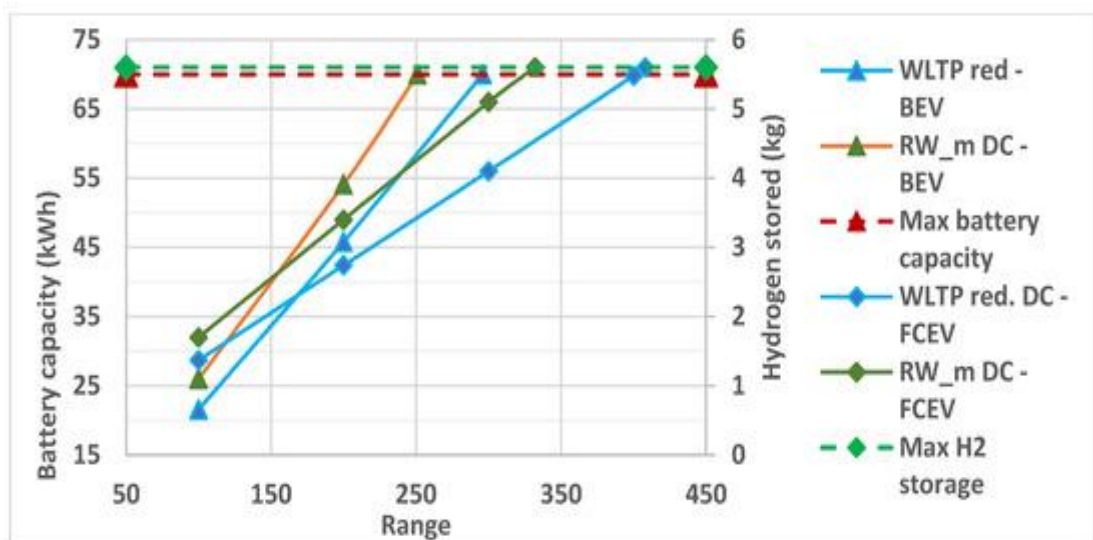


Рисунок 6. Вимоги до накопичення енергії для перевезення 12 пасажирів (еквівалент 1000 кг) з різними циклами руху.

Для автобуса моделювання виконується зі змінною кількістю пасажирів. Вантажопідйомність - 10, 25, 40 і 55 пасажирів відповідно. На рисунку 7 показано результати моделювання, які показують, що з максимальною ємністю батареї 360 кВт/год автобус може проїхати лише 315 км з 10 пасажирами та до 250 км з максимальною ємністю 55 пасажирів. Що стосується FCPT, 100 кг Н<sub>2</sub> дозволяє транспортному засобу проїхати 1300 км з 10 пасажирами і до 980 км з 55 пасажирами, що майже в чотири рази більше, ніж у конфігурації BEV.

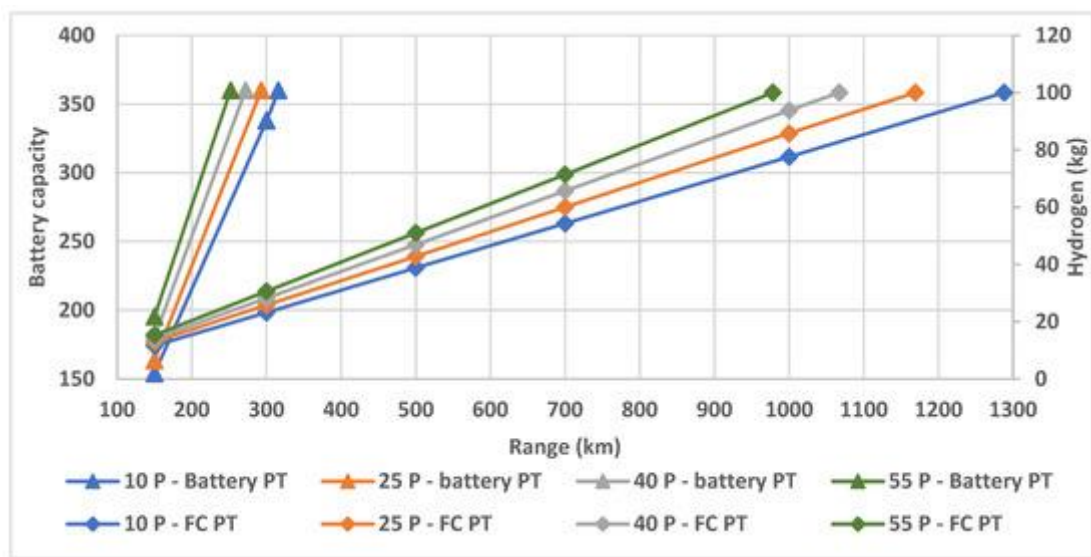


Рисунок 7. Вимоги до накопичення енергії для електробуса для перевезення пасажирів.

Враховуючи відстань їздового циклу (73,1 км) і припускаючи повну ємність протягом усієї подорожі та три поїздки на день, повна конфігурація BEV потребуватиме підзарядки після кожного дня. У FCPT дозаправка потрібна лише раз на 4 дні або після 13 поїздок. Цей аналіз показує переваги вимоги FCPT в автобусах або великовантажних транспортних засобах.

Для напіввантажівки моделювання проводилося для різних корисних навантажень: 25%, 50%, 75% і 100% максимальної вантажопідйомності. На малюнку 8 показано результати моделювання моделі для різного корисного навантаження з реальним циклом руху.

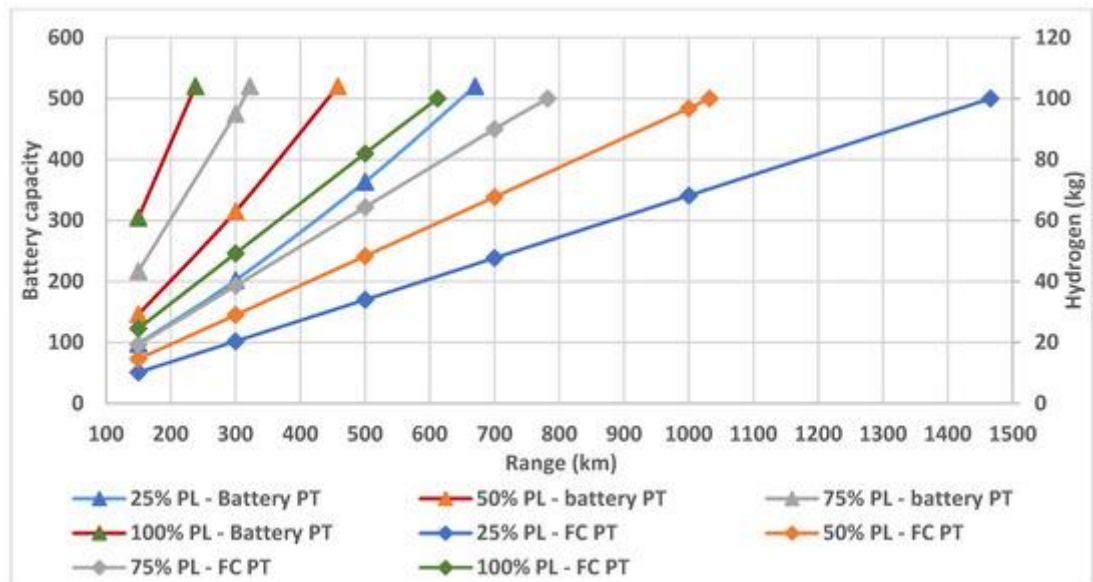


Рисунок 8. Вимоги до накопичення енергії для напіввантажівки для переміщення вантажу.

З рисунка 8 можна помітити, що з ВРТ при максимальному навантаженні транспортний засіб може проїхати лише до 240 км з акумулятором потужністю 520 кВт, а з половинним навантаженням транспортний засіб може проїхати до 450 км. Відображаючи аналогічну тенденцію для FCPT, вантажівка може подолати відстань 612 км з повним завантаженням і 1030 км з половинним завантаженням. У таблиці А1 детально показано середнє споживання енергії, запас ходу та енергію рекуперативного гальмування, вироблену для різних сегментів транспортних засобів із різними циклами руху для змінного корисного навантаження.

Це дослідження показує вплив маси корисного вантажу на характеристики транспортного засобу та запас ходу. Це показує, що тип послуги та моделі мобільності, які необхідно виконувати, є вирішальними змінними, які впливають на рішення щодо вибору адекватного варіанту зберігання енергії.

### 3.3. Середнє споживання енергії на км на людину для різних сегментів транспортних засобів

Це дослідження спрямоване на аналіз середнього споживання енергії на один кілометр для кожного перевезеного пасажирів, щоб визначити найбільш ефективний спосіб транспортування. Оскільки ми помітили зменшення запасу ходу зі збільшенням кількості пасажирів, це дослідження підтверджує, наскільки вигідно мати додаткового пасажирів порівняно з наявністю додаткового автомобіля на дорозі.

На рисунку 9 показано середнє споживання енергії на пасажирів для вищевказаних типів транспортних засобів. Для цього аналізу використовуються дані про середнє енергоспоживання з моделювання реального циклу руху.

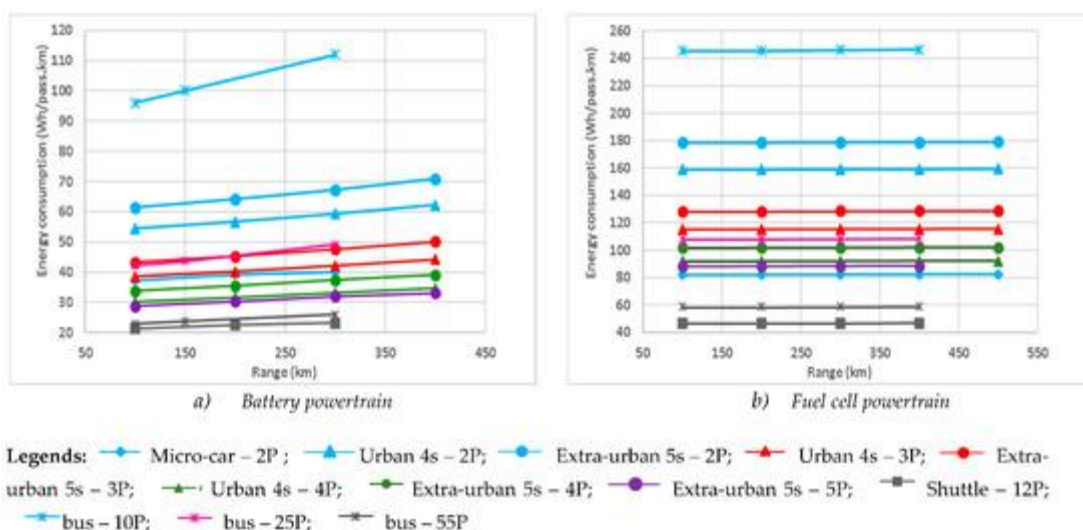


Рисунок 9. Середнє споживання енергії на пасажирокілометр у конфігурації електромобіля з повним акумулятором (BEV) ( а ) та електромобіля на паливних елементах (FCEV) ( б ).

Початкове спостереження показує, що ВРТ і FCРТ мають подібну тенденцію щодо середнього споживання енергії/км для кожного пасажирів. Переглядаючи результати, ми можемо помітити, що для двох пасажирів мікрокар є оптимальним транспортним засобом із найменшим споживанням енергії порівняно з іншими типами транспортних засобів. Враховуючи Urban

4s і позаміські 5s, Urban 4s споживає менше енергії лише для різних сценаріїв корисного навантаження. Однак для масового перевезення пасажирів цей маршрутний транспорт набагато ефективніший, ніж використання кількох транспортних засобів будь-якої іншої категорії.

Враховуючи автобус у цьому аналізі, результати показують, що з 25% місткості, тобто з 10 пасажирами, споживання енергії на одного пасажирів є найвищим серед інших транспортних засобів. Наповнюваність 45%; з 25 пасажирами середнє споживання майже дорівнює споживанню Urban 4s та позаміських 5s. Хоча при повному розміщенні 55 пасажирів енергоспоживання найменше.

Враховуючи дві різні трансмісії, ВРТ, безсумнівно, споживає менше енергії завдяки своїй високій ефективності від бака до колеса. Низька ефективність і втрата рекуперативної енергії через меншу вторинну батарею в FCEV зменшують потенціал отримання найповнішого потенціалу рекуперативної енергії гальмування.

Цей аналіз показує, що менша кількість пасажирів може рекламувати легший транспортний засіб, такий як мікрокар, який має кращі робочі характеристики, ніж легкий EV. З іншого боку, вибір п'ятимісного автомобіля для чотирьох осіб був би не ідеальним, оскільки результати моделювання показують, що автомобілі Urban 4s і позаміські 5s можуть досягати того самого запасу ходу, але транспортний засіб Urban 4s споживає менше енергії на пасажирів. З точки зору трансмісії, FCPT перевершує ВРТ, забезпечуючи довший запас ходу та простішу процедуру заправки, хоча ВРТ має найменше споживання енергії.

### 3.4. Аналіз вартості трансмісії в сегментах транспортних засобів

Попереднє дослідження в Розділі 3.2 і Розділі 3.3 показало, незважаючи на нижчу енергоефективність, ніж його аналог, FCEV може досягати майже

вдвічі більшого діапазону BEV. Незважаючи на те, що це значна частина, кількість автомобілів FCEV на ринку не становить навіть 1% порівняно з BEV на ринку. Це пояснюється вищими витратами на придбання FCEV, а також відсутністю водневих заправних станцій. Тим не менш, нещодавній поштовх Європи до «зеленого» водню з метою декарбонізації суспільства може допомогти пом'якшити деякі бар'єри переходу на водень. У цьому аналізі середня вартість енергії, витрачена на подолання одиниці відстані з іншою силовою установкою, оцінюється для сегментів автомобіля.

У таблиці 5 показано витрати, пов'язані з поїздкою на задану відстань з різними силовими агрегатами. Базова ціна визначається як вимога початкової ціни зберігання енергії для досягнення 100 км. Для ВРТ розраховується вартість ємності батареї, необхідної для досягнення 100 км, а для подальшої подорожі додаткова вартість батареї оцінюється для кожного додаткового кілометра. Що стосується FCPT, вартість одиниці включає вартість паливних елементів і вартість палива для досягнення початкових 100 км, а для подальшої подорожі потрібно лише паливо, отже, вартість водню.

З першого погляду на результати можна помітити, що базова ціна ВРТ для мікроавтомобіля становить майже одну третину від ціни FCPT. Враховуючи витрати на енергію для подолання дистанції в 1 км на додаток до базових витрат, власники BEV повинні платити більше, ніж власники автомобілів FC. Це пояснюється тим, що для ВРТ разом із вартістю енергії потрібно встановити додаткову батарею, тоді як для FCPT включено лише вартість палива, а вища нижча теплота згоряння водню (33,33 кВт·год/кг [ 48 ]) допомагає зменшити вартість далі вниз. Подальші дослідження були проведені для аналізу розподілу витрат на перевезення кожного пасажера різними типами транспортних засобів у конфігурації BEV та FCEV, як показано в таблиці 6 .

Таблиця 5. Аналіз витрат на силову установку від батареї та трансмісію

Payload (kg)	Veh.	Battery Powertrain (BPT)				Fuel Cell Powertrain (FCPT)				
		Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	500 km
150	Micro	888.4	9.8	10.2		2637	0.07	0.07	0.07	0.07
	4s	1574.0	16.2	17.7	18.1	11,514	0.14	0.14	0.14	0.14
	5s	1727.7	18.5	19.6	20.3	11,515	0.15	0.15	0.15	0.15
250	4s	1609.4	17.3	18.0	18.9	11,515	0.15	0.15	0.15	0.15
	5s	1798.6	19.0	20.2	20.9	11,516	0.16	0.16	0.16	0.18
350	4s	1656.7	17.5	18.6	19.7	11,516	0.16	0.16	0.16	0.16
	5s	1834.0	19.4	21.2	21.4	11,517	0.17	0.17	0.17	0.18
500	5s	1905.0	20.2	21.7	22.2	11,519	0.19	0.19	0.14	-
1000	shuttle	3075.3	33.2	36.9		7321	0.21	0.21	0.23	-
700		10,955.9	145.0	145.0		31,790	0.90	0.89	0.90	0.90
1750		11,207.4	162.5	162.5		32,800	1.00	1.00	1.00	1.01
3850	Bus	13,526.9	191.0	191.0		31,817	1.17	1.17	1.17	1.17
6750		7488.4	82.0	82.0		49,779	0.79	0.79	0.79	0.79
13,500	Semi-truck	10,632.8	133.0	133.0		49,812	1.12	1.11	1.12	1.12
27,000		21,578.3	289.1	289.1		49,887	1.87	1.87	1.87	1.87

на паливних елементах (у євро) [ 49 ].

Таблиця 6. Аналіз витрат на одного пасажера з силовою установкою на акумуляторах і паливних елементах (у євро на одного пасажера) [ 49 ].

Payload (kg)	Veh.	Battery Powertrain (BPT)				Fuel Cell Powertrain (FCPT)				
		Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	500 km
150 kg	Micro	444.2	4.9	5.1		1318.6	0.04	0.04	0.04	0.04
	4s	787.0	8.1	8.9	9.0	5756.9	0.07	0.07	0.07	0.07
	5s	863.8	9.2	9.8	10.2	5757.7	0.08	0.08	0.08	0.07
250 kg	4s	536.5	5.8	6.0	6.3	3838.3	0.05	0.05	0.05	0.05
	5s	599.5	6.3	6.7	7.0	3838.8	0.05	0.05	0.05	0.06
350 kg	4s	414.2	4.4	4.6	4.9	2879.0	0.04	0.04	0.04	0.04
	5s	458.5	4.9	5.3	5.3	2879.3	0.04	0.04	0.04	0.04
500 kg	5s	381.0	4.0	4.3	4.4	2303.7	0.04	0.04	0.03	-
1000	shuttle	256.3	2.8	3.1		610.1	0.02	0.02	0.02	-
700		1095.6	14.5	14.5		3178.9	0.09	0.09	0.09	0.09
1750		448.3	6.5	6.5		1272.0	0.04	0.04	0.04	0.04
3850	Bus	245.9	3.5	3.5		578.5	0.02	0.02	0.02	0.02
6750		1109.4	12.1	12.1		7374.6	0.12	0.12	0.12	0.12
13,500	Semi truck **	787.6	9.9	9.9		3689.8	0.08	0.08	0.08	0.08
27,000		799.2	10.7	10.7		1847.7	0.07	0.07	0.07	0.07

Таблиця 6 показує розбивку витрат на енергію на пасажера/км, і ми бачимо, що базова ціна трансмісії знижується для пасажирів одиниці, як і для більшої кількості пасажирів. Враховуючи повну місткість автобуса, ВРТ коштує 246 євро/км як базову вартість, тоді як з паливними елементами базова вартість становить 578 євро/км, що можна порівняти. Крім того, враховуючи витрати на паливо на решту шляху, можна підрахувати, що



автобус FCPT стає економічнішим, ніж аналог, з урахуванням загального терміну експлуатації.

Для напіввантажівки замість вартості проїзду одиниці відстані з 1 пасажиром оцінюється вартість транспортування 1 тонни на одиницю відстані. З результатів можна помітити, що при повному завантаженні базова ціна за тону вантажу на 50% вища з FCPT у вантажівках, тоді як вартість транспортування за кілометр, крім вартості силової установки, є найнижчою — 7 центів/км. Враховуючи половинне навантаження, базова вартість майже втричі збільшується, однак розмір стека FC для транспортування відповідного навантаження різко зменшує цю базову вартість. Однак для цього потрібен персоналізований розмір стека FC, що зменшує гнучкість транспортування широкого діапазону корисного навантаження.

Приймаючи можливість зниження в майбутньому ціни на батарею, вартість водневого палива та зниження ціни на електроенергію, очікується, що базова ціна та вартість круїзу на одиницю відстані зменшаться ще більше. На рисунку 10 показано варіацію цінового діапазону для різних типів транспортних засобів порівняно з результатами в таблиці 5 .

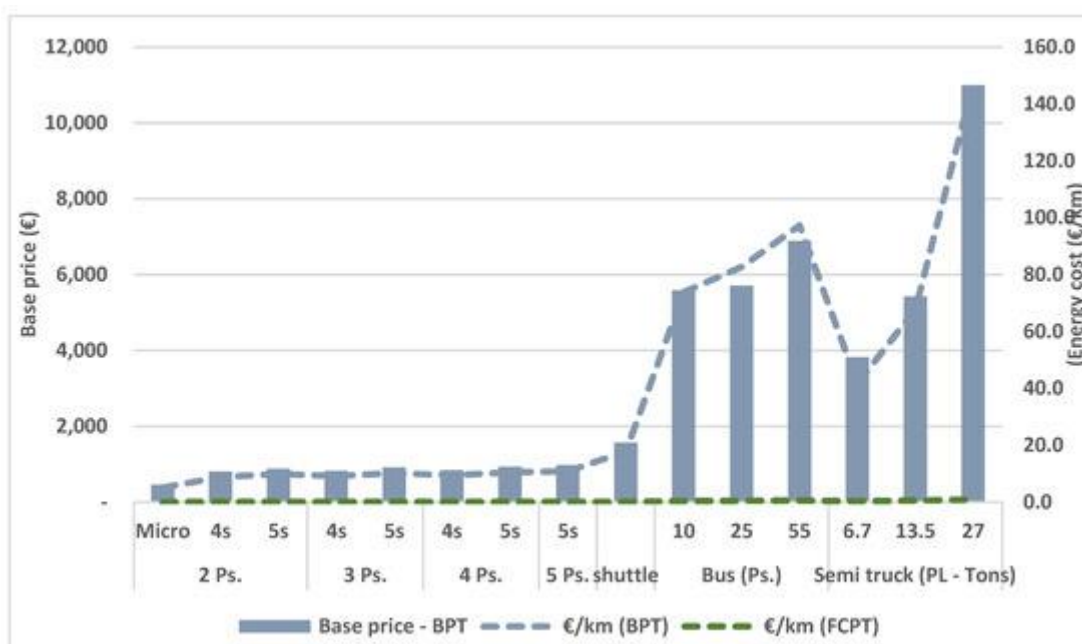


Рисунок 10. Аналіз витрат зі зниженою ціною акумуляторної батареї та палива (базова ціна трансмісії на паливних елементах (FCPT) не включена).

На рисунку 10 показано аналіз витрат зі зниженими цінами на акумулятор і паливо. Слід зазначити, що базова ціна FCPT не включена. Це пов'язано з тим, що ціна блоку паливних елементів залежить виключно від кількості вироблених одиниць, а оскільки технологія все ще знаходиться на початковій стадії розробки, неможливо оцінити майбутнє виробництво, а отже, і ціну блоку. Добре розвинений акумуляторний сектор дозволяє нам оцінити виробництво акумуляторів на майбутнє і, відповідно, вартість. З результатів можна помітити, що зниження ціни на акумулятор майже вдвічі знизило базову ціну та витрати на круїз за кілометр. Тим не менш, можна побачити, що зниження ціни на водень ще більше зменшує витрати на круїз на 50% і дозволяє напіввантажівкам з повним завантаженням здійснювати круїз менш ніж за 1 євро/км.

Невдовзі, коли транспортні засоби будуть адаптовані відповідно до вимог щодо зберігання, ця незначна зміна ціни за кожен кілометр призведе до більшої різниці в CAPEX транспортного засобу. Припускаючи ці сприятливі умови, це збільшить виробництво одиничної труби FC, що ще більше знизить вартість з 60 євро/кВт, що може знизити базову ціну FCEV.

## 4. ВИСНОВКИ

У магістерській роботі представлено оцінку продуктивності автомобіля в реальних умовах зі змінним корисним навантаженням, незважаючи на заяви виробників транспортних засобів. Ця різниця між заявленою продуктивністю автомобіля та реальною продуктивністю відкриває можливості для інших сегментів транспортних засобів, які розглядаються як модель для цього дослідження. Отже, ці різні типи транспортних засобів слід розглядати як взаємодоповнюючі (а не конкурентні) відповідно до вимог до використання та корисного навантаження, а це означає, що ми можемо переходити до більш індивідуальних, а не узагальнених рішень. У майбутньому виробництво індивідуальних транспортних засобів покращить підтримку з боку автомобільного сектору для досягнення стійких цілей. Згодом ця робота містить керівні принципи для всіх попередніх згаданих прогнозів щодо більш стійкої автомобільної промисловості.

Це дослідження спрямоване на оцінку продуктивності транспортних засобів ВРТ і FCPT в реальних умовах, оцінку запасу ходу та споживання енергії для різних сегментів транспортних засобів із реальними їздовими циклами та змінним корисним навантаженням. Імітаційна модель була розроблена в MATLAB з використанням Simulink, шляхом визначення моделей різних типів транспортних засобів і вимірювання ефективності різних залучених компонентів. Це дозволяє оцінити споживання енергії в різних реальних умовах водіння. Модель була попередньо перевірена [ 9 ] і забезпечила надійність з похибкою 5% для легкових автомобілів і 2% для великовантажних транспортних засобів.

Результати розділу 3.2 і 3.3 вказують на те, що вибір сегментів транспортних засобів на основі кількості пасажирів призводить до найменшого споживання енергії. Для двох пасажирів рекомендується мікрокар із споживанням енергії менше ніж на 60% порівняно з іншими транспортними засобами, разом із найменшим споживанням енергії на

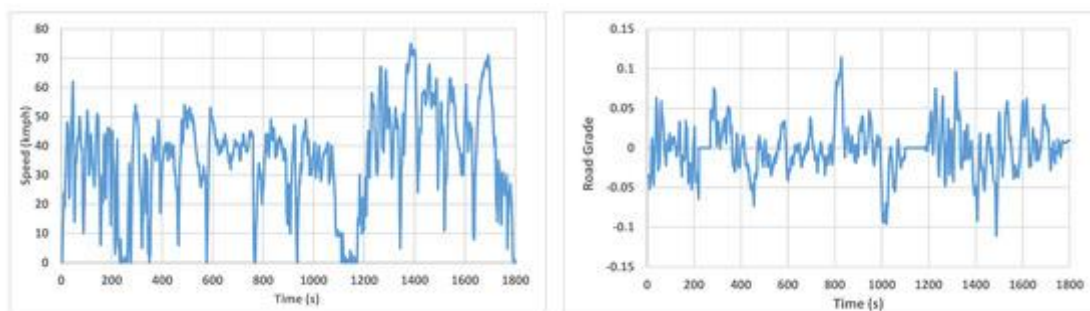
пасажира. У той час як для трьох і чотирьох пасажирів, Urban 4s підходить з максимальним запасом ходу, таким же, як позаміські 5s, з меншим споживанням енергії; і для п'яти пасажирів позаміський 5s є достатнім. Результати показали, що транспортні засоби Urban 4s і позаміські 5s можуть долати майже однакову відстань із відповідною повною ємністю акумулятора, що свідчить про те, що вибір правильного сегмента транспортного засобу допомагає скоротити CAPEX, OPEX і час зарядки акумулятора. Крім того, Результати показали, що було б вигідно розглянути транспортний засіб середньої вантажопідйомності для групи пасажирів, а не використовувати кілька автомобілів малої вантажопідйомності. Для перевезення понад 25 пасажирів автобус також був би кращим варіантом, хоча також можна розглянути наявність кількох маршрутних перевезень.

Враховуючи різні варіанти трансмісії, FCPT показав чудові результати порівняно з ВТ, де перший досяг середнього запасу ходу 600 км або більше в усіх різних циклах приводу з повним запасом палива, тоді як другий проїхав у середньому лише близько 350 км. Аналізуючи експлуатаційні витрати на основі вибору трансмісії для одиниці відстані, FCEV залишається найдорожчим варіантом із базовою вартістю від двох до восьми разів, ніж BEV на основі типів транспортних засобів. Однак FCEV показав чудові результати з середньою експлуатаційною вартістю електроенергії від 7 центів/км до 2 євро/км, де вартість енергії для круїзу BEV коливається від 10 євро/км до 290 євро/км на додаток до базової вартості. Крім того, варто зазначити, що враховуючи повну завантаженість автобуса, базова вартість на одну особу для FCPT була б лише на 60% вищою порівняно з ВРТ, а враховуючи експлуатаційні витрати, FCPT був би економнішим. Тестування реальних циклів руху зі змінним корисним навантаженням показало, що FCPT буде ідеальним для важких транспортних засобів для дальніх операцій порівняно з його вартістю, як із повною корисною вантажопідйомністю, навіть незважаючи на те, що базова вартість з FCPT на 50% більша, ніж ВРТ,

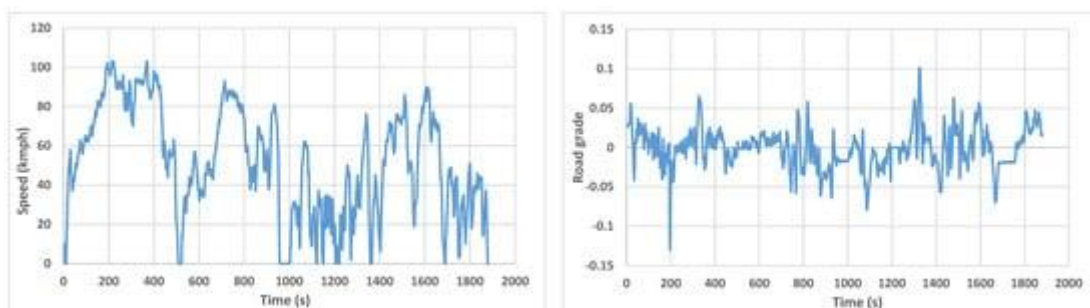
експлуатаційні витрати становлять приблизно 1,2 євро/км для ГСРТ порівняно з 300 євро/км для ВРТ.

Подальша робота буде виконана з урахуванням об'ємних обмежень, пов'язаних зі зберіганням водню та вимогами до теплового керування, пов'язаними з цими системами, які не враховані в цьому документі.

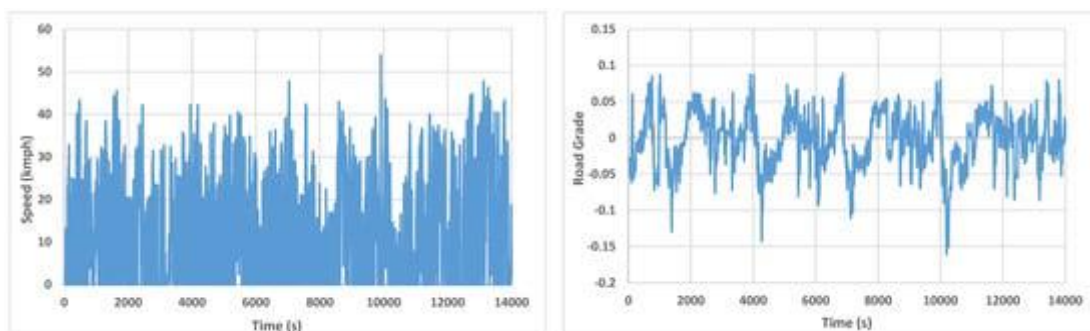
## Додаток А



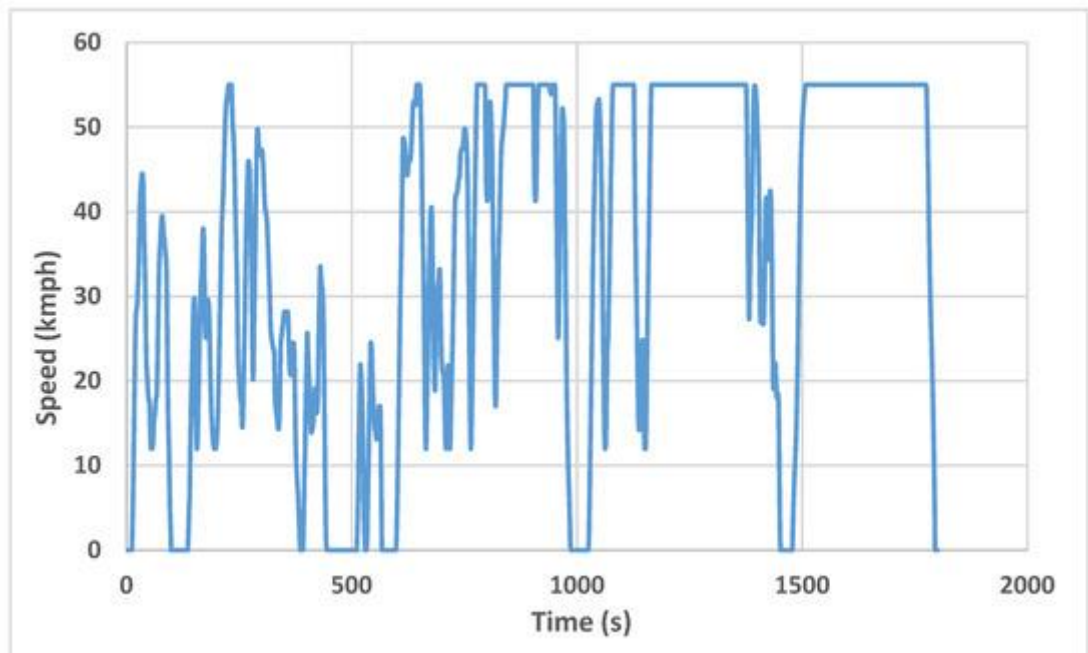
Малюнок А1. Реальний цикл руху 1 (тривалість: 1800 с). Реальний їздовий цикл 1 (RW1) для легкових транспортних засобів (Міський 4s і позаміський 5s).



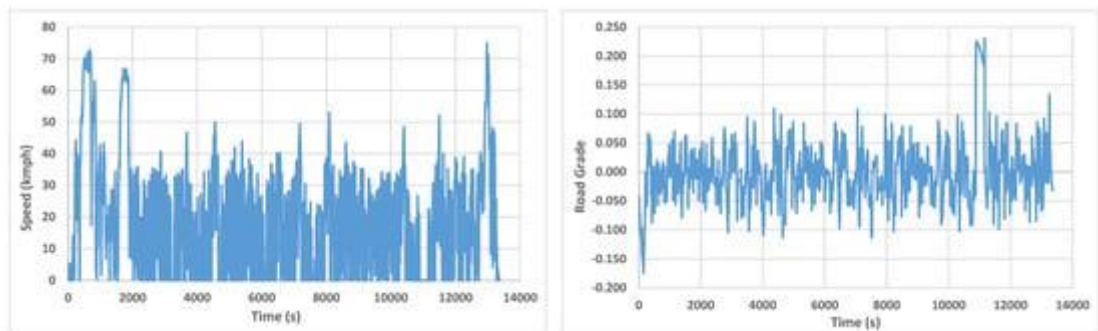
Малюнок А2. Реальний їздовий цикл 2 (тривалість: 1880 с). Реальний їздовий цикл 2 (RW2) для легкових транспортних засобів (Міський 4s і позаміський 5s).



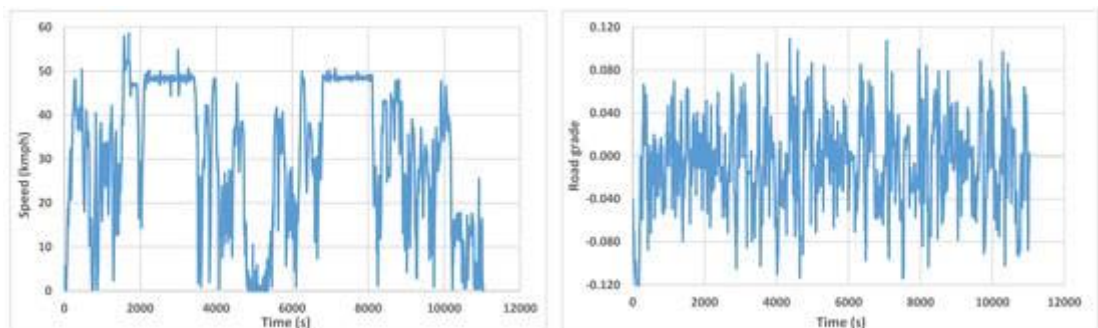
Малюнок А3. Реальний цикл руху мікроавтомобіля/шатла (тривалість: 14 004 с). Реальний цикл руху (RW\_m) для мікроавтомобіля/автомобіля Shuttle.



Малюнок А4. Модифікований їздовий цикл WLTP класу 3 (тривалість: 1800 с). Модифікований їздовий цикл WLTP класу 3 для мікроавтомобілів/шаттлів (максимальна швидкість обмежена 55 км/год).



Малюнок А5. Реальний цикл руху автобуса (тривалість: 13353 с). Реальний цикл руху (RW\_b) для автобуса.



Малюнок А6. Реальний цикл руху для напіввантажівки (тривалість: 11 027 с). Реальний їздовий цикл (RW\_st) для напіввантажівки.

# Список літератури

1. Statista. Кількість легкових автомобілів і комерційних транспортних засобів, що використовувалися в усьому світі з 2006 по 2015 рр. 2021 р. Доступно в Інтернеті: <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>
2. Звіт про зелений автомобіль. Зараз у світі їздить 1,2 мільярда автомобілів. 2021. Доступно в Інтернеті: [https://www.greencarreports.com/news/1093560\\_1-2-billion-vehicles-on-worlds-roads-now-2-billion-by-2035-report](https://www.greencarreports.com/news/1093560_1-2-billion-vehicles-on-worlds-roads-now-2-billion-by-2035-report)
3. Європейське агентство з навколишнього середовища. Тенденції та прогнози в Європі 2020. Доступно в Інтернеті: <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2020>
4. Європейське агентство з навколишнього середовища. Викиди парникових газів від транспорту в ЄС. 2020. Доступно в Інтернеті: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/greenhouse-gas-emissions-from-transport#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/greenhouse-gas-emissions-from-transport#tab-chart_1)
5. Statista. Продажі електромобілів, що підключаються до електромережі, у всьому світі 2015–2020. 2020. Доступно в Інтернеті: <https://www.statista.com/statistics/665774/global-sales-of-plug-in-light-vehicles/>
6. Обсяги EV. У 2020 році глобальні продажі заряджених автомобілів перевищили 3,2 мільйона. 2021. Доступно в Інтернеті: <https://www.ev-volumes.com/>
7. Ріма, А.; Челебі, Д. Планування змішаного парку електричних і звичайних транспортних засобів для міських вантажних перевезень з урахуванням маршрутизації та заміни. *Сустейн. Міста Соц.* 2021 , 73 , 103105.
8. Кушачвілі, EEL; Уаїсі, W. Гібридна батарея/суперконденсаторна система зберігання енергії для електромобілів. *Ж. Джерела живлення* 2018 , 374 , 237–248. [ ] [ ]



9. Сагарія, С.; Нето, RC; Баптіста, П. Підхід до моделювання для оцінки впливових факторів для енергетичної ефективності EV. *Сустейн. Енерготехн. Оцінити*. 2021 , 44 , 100984. [ ] [ ]
10. Сагарія, С.; Нето, RC; Баптіста, П. Оцінка продуктивності транспортних засобів, що працюють від акумулятора, паливного елемента та ультраконденсатора: застосування до легкових автомобілів і автобусів. *Перетворення енергії кер*. 2020 , 229 , 113767. [ ] [ ]
11. Ваз, В.; Нанді, АКР; Ландерс Р.Г.; Koulu, УО Прогнозування дальності руху електричного транспортного засобу для постійної швидкості з використанням багатоцільової оптимізації Прогнозування дальності електричного транспортного засобу для постійної швидкості з використанням багатоцільової оптимізації. *J. Power Sources* 2014 , 275 , 435–446. [ ] [ ]
12. Фарія, М.В.; Дуарте, ГО; Варелла, Р.А.; Фаріас, Т.Л.; Баптіста, ПК Дослідження в галузі енергетики та соціальні науки Спрямування на декарбонізацію: оцінка енергетичних, екологічних та економічних переваг менш агресивного водіння в Лісабоні, Португалія. *Energy Res. Соц. Sci.* 2018 , 47 , 113–127. [ ] [ ]
13. Чан, К. І. Сучасний стан електричних, гібридних транспортних засобів і транспортних засобів на паливних елементах. *IEEE Trans. Силовий Електрон*. 2007 , 95 , 704–718. [ ] [ ]
14. Поллет, Б.Г.; Коча, СС; Staffell, І. Electrochemistry Поточний стан автомобільних паливних елементів для сталого транспорту. *Curr. Opin. електрохім*. 2019 , 16 , 90–95. [ ] [ ]
15. Томпсон, ST; Джеймс, ВD; Нууа-Кouadio, JM; Houchins, С.; ДеСантіс, Д.А.; Ахлуваля, Р.; Вілсон, АР; Клін, Г.; Папагеоргопулос, Д. Прямий аналіз вартості електромобіля на водневих паливних елементах: опис, перевірка та перспективи виробництва системи та великого обсягу. *J. Power Sources* 2018 , 399 , 304–313. [ ] [ ]

16. Грін, DL; Огден, Дж.М.; Лін, З. Проблеми в проектуванні, плануванні та розгортанні інфраструктури для заправки воднем для електромобілів на паливних елементах. *eTransportation* 2020 , 6 , 100086.
17. Фатхабаді, Х. Гібридний електричний автомобіль на паливних елементах (FCHEV): Нова гібридна система виробництва електроенергії на паливних елементах/SC. *Перетворення енергії кер.* 2018 , 156 , 192–201.
18. Аламлілі, А.; Сюе, Ю.; Анауї, Ф. Експериментальне та аналітичне дослідження ультраконденсаторного накопичувача, який використовується в системах рекуперативного гальмування. *Energy Procedia* 2019 , 159 , 376–381.
19. Яо, Е.; Лю, Т.; Лу, Т.; Янг Ю. Оптимізація розкладу електромобілів із кількома типами транспортних засобів у громадському транспорті. *Сустейн. Міста Соц.* 2020 , 52 , 101862. [ ] [ ]
20. Саккі, Р.; Бауер, К.; Кокс, Б. Л. Чи розмір має значення? Вплив розміру, коефіцієнта навантаження, автономності запасу ходу та типу застосування на оцінку життєвого циклу поточних і майбутніх транспортних засобів середньої та великої вантажопідйомності. *Навколишнє середовище. Sci. технол.* 2021 , 55 , 5224–5235.
21. Crozier, С.; Апостолопулу, Д.; Маккаллох, М. Кластеризація профілів використання для аналізу поведінки електромобіля. У матеріалах Європейської конференції IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies 2018 (ISGT-Europe), Сараєво, Боснія та Герцеговина, 21–25 жовтня 2018 р.
22. Сонце, Д.; Леран, Ф.; Хіе, Х. Виявлення моделей використання транспортних засобів на основі щоденних профілів мобільності, отриманих із даних плавучих автомобілів. *трансп. Lett.* 2021 , 13 , 163–171. [ ] [ ]
23. TNO. Порівняльне тестування NEDC-WLTP. 2021. Доступно в Інтернеті: [https://www.researchgate.net/profile/Norbert-Ligterink-2/publication/316716593\\_NEDC\\_-\\_WLTP\\_comparative\\_testing/links/590f0ff74585159781872f24/NEDC-WLTP-comparative-testing.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Norbert-Ligterink-2/publication/316716593_NEDC_-_WLTP_comparative_testing/links/590f0ff74585159781872f24/NEDC-WLTP-comparative-testing.pdf)

24. Автомобільні новини Китаю. Мікролітражка GM Venture була найбільш продаваним електромобілем у Китаї в серпні. 2021. Доступно в Інтернеті: <https://www.autonews.com/china/gm-ventures-minicar-was-chinas-most-sold-ev-august>

25. Fortune Business Insights. Розмір ринку мікроелектричних транспортних засобів (EV). 2021. Доступно в Інтернеті: <https://www.fortunebusinessinsights.com/micro-electric-vehicles-ev-market-103474>

26. Європейський Союз. European Vehicle Market Statistics 2020. 2021. Доступно в Інтернеті: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU\\_Pocketbook\\_2020\\_Web\\_Dec2020.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU_Pocketbook_2020_Web_Dec2020.pdf)

27. Вікіпедія. Цикл водіння WLTP. 2021. Доступно в Інтернеті: [https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide\\_Harmonised\\_Light\\_Vehicles\\_Test\\_Procedure](https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure)

28. Алвес, Ж.; Баптіста, П.; Gonçalves, G.; Дуарте, Г. Непрямі методології для оцінки споживання енергії в транспортних засобах: застосування до акумуляторних електромобілів. *Перетворення енергії кер.* 2016, 124, 116–129. [ ] [ ]

29. Reis, RFG *Енергетична оцінка екологічного водіння та заходів з раціоналізації енергії для важких вантажів*; Instituto Superior Técnico: Лісабон, Португалія, 2016. [ ]

30. Цзян, С.; Wang, С.; Чжан, К.; Бай, Х.; Сюй, Л. Адаптивна оцінка нахилу дороги та маси автомобіля на паливних елементах. *eTransportation* 2019, 2, 100023. [ ] [ ]

31. Євтімов І.; Іванов, Р.; Сапунджієв М. Енергоспоживання допоміжних систем електрокарів. *MATEC Web Conf.* 2017, 133, 06002. [ ] [ ]

32. Ейсмонт, Дж.; Тарима, С.; Роновський, Г.; Swieczko-Zurek, В. Вплив температури на опір коченню шини. *Міжн. Дж. Автомоб. технол.* 2017, 19, 45–54. [ ] [ ]
33. Сайні, М.; Walia, К. Максимальна рекуперація енергії в електромобілі. *Міжн. J. Res. apl. Sci. інж. технол.* 2018, 6, 1780–1785.
34. Іора, П.; Трібіолі, Л. Вплив температури навколишнього середовища на енергоспоживання та запас ходу електромобілів: визначення моделі та аналіз чутливості на основі даних Nissan Leaf. *World Electr. Veh. J.* 2019, 10, 2.
35. Девіс, К.; Хейс, Дж. Г. Аналіз симуляторів трансмісії електромобілів для розрахунків споживання палива. У матеріалах Міжнародної конференції з електричних систем для літаків, залізниць, суден і дорожніх транспортних засобів і міжнародної конференції з електрифікації транспорту (ESARS-ITEC), Тулуза, Франція, 2–4 листопада 2016 р. [ ] [ ]
36. Сузукі, КҮТ; Ліяма, А.; Кубо, Н.; Сайто, Н.; Шиохара, К.; Шимоторі, С.; Sugawara, Y. Назустріч паливним елементам майбутнього - завдання до 2040 року. *Електрохімія. Соц.* 2019, 92, 3–7. [ ] [ ]
37. Танака, С.; Нагумо, К.; Ямамото, М.; Чіба, Х.; Йосіда, К.; Окано, Р. Система паливних елементів для паливних елементів Honda CLARITY. *eTransportation* 2020, 3, 100046. [ ] [ ]
38. Нето, РС; Тейшейра, JS; Азеведо, Дж. Теплові та електричні експериментальні характеристики стека паливних елементів PEM потужністю 1 кВт. *Міжн. J. Hydrogen Energy* 2013, 38, 5348–5356. [ ] [ ]
39. База даних EV. 2021. Доступно в Інтернеті: <https://ev-database.org>
40. Специфікації EV. 2021. Доступно в Інтернеті: <https://www.evspecifications.com/>
41. BYD. Електромобілі BYD. 2021. Доступно в Інтернеті: <https://www.byd.com/en/index.html>
42. H2.Live. Водневі автомобілі – короткий огляд усіх моделей. 2021. Доступно в Інтернеті: <https://h2.live/en/wasserstoffautos>

43. Паливні вантажівки. Напіввантажівка з двома паливними елементами Nikola. 2021 р. Доступно в Інтернеті: <https://fuelcelltrucks.eu/project/nikola-two/>
44. Джеймс, ВД; Нууа-Kouadio, JM; Houchins, С.; ДеСантіс, О.А. Остаточний звіт: Оцінка витрат на масове виробництво систем паливних елементів прямого Н2 РЕМ для транспортних застосувань (2012–2016). Доступно в Інтернеті: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1346414>
45. Колб, О. «Розгортання інфраструктури альтернативних видів палива»—Порівняння цін на пальне ; Європейська Комісія: Брюссель, Бельгія, 2017; ISBN 9789279575372. [ ]
46. Statista. Вартість літій-іонної батареї в усьому світі між 2011 і 2030 рр. 2021 р. Доступно в Інтернеті: <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>
47. Шлях до водневої конкурентоспроможності з точки зору витрат. Hydrogen Council, 2020. Доступно в Інтернеті: <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>
48. H2data. Дані про водень. 2021. Доступно в Інтернеті: <http://www.h2data.de/>
49. Sagaria S, Moreira A, Margarido F, Baptista P. From Microcars to Heavy Duty Vehicles: Vehicle Performance Comparison of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles. *Транспортні засоби*. 2021 рік; 3(4):691-720. <https://doi.org/10.3390/vehicles3040041>