DOI https://doi.org/10.32689/maup.it.2026.2.4
УДК 303.732.4 : 519.86 : 629.3.014
JEL Classification: C44, C53, C63, Q42, R41

МОДЕЛЬ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО ПОПИТУ НА ЗАРЯДНІ СТАНЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ СЕЗОННИХ І ТРАНЗИТНИХ ФАКТОРІВ

О. І. Марків, Ю. В. Ришковець

A SPATIOTEMPORAL DEMAND MODEL FOR ELECTRIC-VEHICLE CHARGING STATIONS CONSIDERING SEASONAL AND TRANSIT FACTORS

Oleg Markiv, Yuriy Ryshkovets

Анотація

Об'єктом дослідження є процес формування просторово-часового попиту на зарядну інфраструктуру електромобілів у Західній Україні, що розглядається методами системного аналізу як складна соціотехнічна система. Розв'язувана проблема полягає в тому, що відомі моделі розміщення зарядних станцій ігнорують сезонний фактор або враховують його лише агреговано та не розділяють систему попиту на самостійні міський і трасовий компоненти. На засадах системного аналізу розроблено та верифіковано на реальних великих даних математичну модель $D(x, y, t) = D_0(x, y)\cdot\varphi(t)\cdot k_s(t, T)\cdot k_g(x, y)$ з адитивним виділенням трасового компонента, що відповідає декомпозиції системи на незалежні підсистеми. Суть отриманих результатів: систему попиту формалізовано як $S = \langle E, V, C, X, Y, F\rangle$; сезонний коефіцієнт k_s виведено з перших принципів електрохімії літій-іонних акумуляторів і термодинаміки систем клімат-контролю ($\gamma \approx 0{,}40$); параметри скалібровано у два етапи на реальних даних; виконано повний аналіз 8 областей із використанням 14 616 кліматичних спостережень ERA5 за 2020-2024 роки. Саме системна декомпозиція, фізичне обґрунтування сезонної чутливості та формальне розділення сегментів дозволили вирішити зазначену проблему, оскільки вони роблять модель прозорою, відтворюваною та придатною до калібрування на даних різної природи. Результати пояснюються спільною дією зростання внутрішнього опору батареї на холоді й додаткових витрат на обігрів салону, а також відмінною поведінкою водіїв у місті та на трасі. Зимовий попит перевищує літній на 37-40 % для рівнинних областей і до 60-68 % для гірської частини Карпат, а трасовий сегмент на 5-7 відсоткових пунктів чутливіший до сезону за міський. Результати можуть бути використані для системно обґрунтованого, регіонально диференційованого планування мережі зарядних станцій.

Ключові слова: *системний аналіз, складна система, електромобіль, зарядна інфраструктура, просторово-часовий попит, сезонний коефіцієнт, транзитний трафік, великі дані, ERA5.*

Abstract

The object of study is the formation of spatiotemporal demand for electric-vehicle charging infrastructure in Western Ukraine, treated as a complex socio-technical system. The problem addressed is that existing station-sitting models ignore the seasonal factor or treat it only as an aggregated parameter and do not decompose the demand system into independent urban and highway components. Using a systems-analysis approach, the paper develops and validates on real big data a mathematical model $D(x, y, t) = D_0(x, y)\cdot\varphi(t)\cdot k_s(t, T)\cdot k_g(x, y)$ with an additive highway component reflecting decomposition into independent subsystems. The essence of the results: the demand system is formalised as $S = \langle E, V, C, X, Y, F\rangle$; the seasonal coefficient k_s is derived from first principles of lithium-ion battery electrochemistry and cabin-climate thermodynamics ($\gamma \approx 0.40$); the parameters are calibrated in two stages on real data; a complete analysis of 8 oblasts uses 14,616 ERA5 climatic observations for 2020-2024. The decomposition, the physical derivation of seasonal sensitivity and the formal segmentation solved the stated problem, rendering the model transparent, reproducible and calibratable on heterogeneous data. The results are explained by the joint effect of the battery internal-resistance rise in the cold and additional cabin-heating energy, and by different drivers' behaviour in cities and on highways. Winter demand exceeds summer demand by 37-40 % in the plains oblasts and by up to 60-68 % in the mountainous Carpathian area, while the highway segment is 5-7 percentage points more seasonally sensitive. The results can be applied for systematically grounded, regionally differentiated planning of the charging network.

Key words: *systems analysis, complex system, electric vehicle, charging infrastructure, spatiotemporal demand, seasonal coefficient, transit traffic, big data, ERA5.*

1. Вступ. Прискорена електрифікація транспорту формує в Україні критичну диспропорцію між зростаючим парком електромобілів та нерозвиненою зарядною мережею. Кількість легкових електромобілів зросла з 8 541 у 2021 р. до 93 936 у 2024 р. – у 11 разів за три роки [1]. При цьому на одну публічну зарядну станцію припадає близько 30-35 електромобілів, тоді як у ЄС цей показник становить 15-25 одиниць на станцію [2]. Західна Україна є лідером цього процесу: 13,5 % загальноукраїнського ввезення електромобілів припадає на Львівську область [1], а 8 областей регіону разом формують близько 35 % національного парку. Тому планування зарядної інфраструктури саме для цього регіону є практично нагальним завданням.

© Марків О. І., Ришковець Ю. В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

Специфіка Західної України як об'єкта планування зарядної інфраструктури визначається трьома факторами. Перший – виражена сезонна варіація: помірно-континентальний клімат рівнинних областей і субальпійський клімат Карпат забезпечують зниження зимових температур до -15…-20 °C, що суттєво підвищує питоме енергоспоживання електромобіля. Другий – значний транзитний потік: регіон розташований на ключових міжнародних коридорах (E40, E50, E371), якими прямують електромобілі з країн ЄС із потребою швидкої дозарядки. Третій – кліматична неоднорідність: різниця між м'яким Закарпаттям, укритим від холодних вітрів Карпатами, та холодними Карпатами і рівнинними областями формує принципово різні умови для інфраструктурного планування.

Відповіді на два головні запитання обґрунтовують актуальність тематики. Навіщо за умов сучасності потрібні дослідження з цієї теми? Тому що темпи зростання парку електромобілів випереджають розвиток зарядної мережі, а наявні інструменти планування не враховують ані сезонної динаміки попиту, ані транзитної природи частини навантаження. Що можуть дати практиці результати цих досліджень? Вони дають змогу обґрунтовано визначати потужність і розміщення станцій з урахуванням зимового піку та транзитного трафіку, уникаючи як недозабезпечення коридорів, так і надлишкових капіталовкладень. Складність, багатофакторність і ієрархічність цієї задачі зумовлюють доцільність її розв'язання засобами системного аналізу складних соціотехнічних систем.

Аналіз літератури та постановка проблеми. Задача просторового розміщення зарядних станцій традиційно формалізується як задача максимального охоплення (MCLP) [3] або p-median [4]. Tu et al. [5] розширили класичні постановки просторово-часовим виміром, увівши функцію D(x, y, t) як характеристику місцеперебування транспортних засобів, проте сезонна складова в їхній моделі відсутня. Zhang et al. [6] поєднали транспортну та електромережеву оптимізацію, але враховували трасовий потік лише частково й на синтетичних даних. Roy [7] та Wang et al. [8] застосували гібридні підходи GIS-MCDM, які добре відображають просторовий аспект, але повністю ігнорують часову та сезонну динаміку. Li [9] урахував кліматичний чинник неявно, через байєсівську нейромережу, що ускладнює фізичну інтерпретацію отримуваних коефіцієнтів.

Систематизація восьми робіт за наявністю сезонного фактора та розрізненням сегментів попиту наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз існуючих моделей попиту на зарядну інфраструктуру

Автори / рік	Метод	Сезонний фактор	Трасовий сегмент	Регіон	Масштаб даних
Frade et al., 2011 [3]	MCLP	Відсутній	Ні	Лісабон	Синтетичні
Tu et al., 2016 [5]	Просторово-часовий	Відсутній	Ні	Гуанджоу	Реальні (обмежені)
Zhang et al., 2018 [6]	MILP + транспорт	Відсутній	Частково	США	Синтетичні
He et al., 2018 [4]	MCLP + дальність	Відсутній	Ні	Пекін	Реальні
Roy, 2025 [7]	GIS + AHP	Відсутній	Ні	Індія	GIS-шари
Wang et al., 2025 [8]	GIS + MCDM	Відсутній	Ні	Ком'єнь	GIS-шари
Li, 2025 [9]	Байєсівська нейромережа	Неявний	Ні	Тайвань	Реальні
Запропонований	$D \cdot \varphi \cdot k_s \cdot k_g + D_tr$	Явний (k_s)	Так	Зах. Україна	**Реальні Big Data**

Критичний аналіз джерел дає відповідь на два запитання. Які питання залишилися невирішеними? Жодна з проаналізованих робіт не поєднує явний фізично обґрунтований сезонний коефіцієнт, виділений трасовий компонент і реальні дані регіонального масштабу для умов Східної Європи, а також не спирається на цілісне системне представлення об'єкта. Чому ці питання залишилися невирішеними? Об'єктивно – через брак відкритих транзакційних даних операторів і кліматичних реаналізів достатнього розрізнення; суб'єктивно – через усталену традицію розглядати попит як статичний просторовий шар без часової та температурної динаміки і без декомпозиції на підсистеми. Систематизація локальних прогалин дає загальну невирішену проблему: відсутність системно обґрунтованої просторово-часової моделі попиту на зарядну інфраструктуру, яка б одночасно фізично обґрунтовувала сезонну чутливість і формально розділяла міський та трасовий сегменти на реальних регіональних даних.

Метою дослідження є розробка на засадах системного аналізу, теоретичне обґрунтування та верифікація на реальних великих даних математичної моделі просторово-часового попиту на зарядну інфраструктуру електромобілів, яка явно враховує сезонний коефіцієнт і диференціює міський та трасовий сегменти попиту. Це дасть змогу формувати системно обґрунтовані, регіонально

диференційовані рекомендації щодо планування й розвитку мережі зарядних станцій Західної України.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

– виконати системну формалізацію об'єкта та вивести структуру системно-аналітичної моделі і її параметри (сезонний коефіцієнт, вагові коефіцієнти атракторів, добову часову функцію) з фізичних і поведінкових принципів;

– виконати двоетапну емпіричну калібровку параметрів моделі на реальних даних;

– побудувати регіональну просторово-часову модель попиту для 8 областей Західної України на основі кліматичних реаналізів ERA5;

– формалізувати математичну диференціацію міського та трасового сегментів попиту й верифікувати її чисельними прикладами;

– розробити систему формальних показників і регіональний рейтинг стану зарядної інфраструктури.

2. Матеріали і методи. Об'єкт дослідження – процес формування просторово-часового попиту на зарядну інфраструктуру електромобілів у Західній Україні.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що цей попит, як вихідний показник складної системи, можна адекватно описати мультиплікативно-адитивною моделлю з явним сезонним коефіцієнтом, виведеним із фізичних принципів, причому міський і трасовий сегменти є самостійними підсистемами з відмінними параметрами просторового впливу, добового профілю та сезонної чутливості.

Прийняті припущення: попит у будь-якій точці пропорційний зваженій сумі впливів навколишніх точок інтересу (POI-атракторів); сезонна складова попиту визначається переважно температурою повітря через енергетику електромобіля; потік електромобілів на трасах пропорційний загальній інтенсивності руху з часткою 2–4 %; просторовий вплив атрактора спадає за гаусовим законом з відстанню.

Прийняті спрощення: використано лінійну апроксимацію сезонного коефіцієнта в діапазоні температур [-15; +20] °C; інтенсивність відвідування POI прийнято рівномірною ($A_i = 1$); параметр сезонної чутливості γ агреговано для змішаного парку електромобілів.

2.1. Системне представлення та структура моделі.

Методологічною основою дослідження є системний аналіз складних систем [10]. Ринок електротранспорту розглядається як складна соціотехнічна система $S = \langle E, V, C, X, Y, F \rangle$, де E – множина елементів (парк електромобілів, станції, вузли мережі, атрактори), V – зв'язки між ними, C – обмеження, X – вхідні параметри, Y – вихідні показники, F – цільова функція [10]. Така формалізація відповідає базовому принципу системного аналізу – декомпозиції складної системи на елементи зі збереженням зв'язків між ними. У межах цього представлення попит є вихідним показником Y, що залежить від просторових, часових і кліматичних входів X за обмежень C.

Загальна модель попиту в точці з координатами (x, y) у момент t має мультиплікативну структуру:

$$D(x, y, t) = D_0(x, y) \cdot \varphi(t) \cdot k_s(t, T) \cdot k_g(x, y) \quad (1)$$

Повний попит включає локальний (міський) і трасовий компоненти, що мають принципово різну природу:

$$D_total(x, y, t) = D_local(x, y, t) + D_tr(x, y, t) \quad (2)$$

Мультиплікативна структура (1) є принциповою: кожен множник відображає незалежну групу факторів і може калібруватися на відповідних даних. Адитивна структура (2) фіксує те, що міський і трасовий попит формуються різними генераторами і складаються, а не перемножуються. З погляду системного аналізу структури (1)-(2) реалізують декомпозицію системи попиту на функціонально незалежні підсистеми, що знижує розмірність задачі ідентифікації параметрів і забезпечує їх роздільну калібровку.

2.2. Прийнятий математичний аппарат.

Базовий просторовий попит D_0 моделюється як сума гаусових ядер впливу атракторів:

$$D_0(x, y) = \Sigma_i \, \alpha_i \cdot A_i \cdot \exp(-d_i^2 / (2\sigma_i^2)) \quad (3)$$

де α_i – ваговий коефіцієнт атрактора типу i, A_i – інтенсивність його відвідування, d_i – відстань до атрактора, σ_i – радіус його просторового впливу. Сезонний коефіцієнт прийнято у лінійній формі:

$$k_s(t, T) = 1 + \gamma \cdot \max(0, T_ref - T(t)) / T_ref \quad (4)$$

де $T_ref = 20$ °C – еталонна температура клімат-нейтралітету, γ – параметр сезонної чутливості. Ваговий коефіцієнт атрактора визначається через імовірність підключення та тривалість стоянки:

$$\alpha_i = P_charge|stop,i \cdot \min(1, \Delta t_i / \Delta t_min) \quad (5)$$

ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

де Δt_i – середня тривалі\сть стоянки, Δt_min = 20 хв – мінімальна тривалість корисної АС-сесії. Добова часова функція задається сумою гаусіан, що відповідають характерним пікам зарядки:

$$\varphi(t) = \Sigma_j \beta_j \cdot \exp(-(t - \mu_j)^2 / (2\sigma_j^2)), \; j \in \{\text{ранок, обід, вечір}\} \quad (6)$$

Трасовий компонент попиту описується добутком потоку, ймовірності зупинки та потреби в енергії:

$$D_tr(x, y, t) = \lambda_tr(x, y, t) \cdot P_stop(x, y, SoC) \cdot E_need(d_seg, T) \quad (7)$$

$$P_stop = 1 - \exp(-E_need / E_reserve) \quad (8)$$

$$E_need = d_seg \cdot c_spec \cdot k_s(T, \gamma_tr) \quad (9)$$

де λ_tr – потік електромобілів через точку, E_reserve – залишковий запас енергії до наступної станції, c_spec – питоме споживання, γ_tr – сезонна чутливість трасового сегмента.

2.3. Дані та програмні засоби.

Кліматичні дані отримано з реаналізу ERA5 [17]: 14 616 спостережень середньодобової температури за 2020–2024 рр. для 5 опорних точок у кожній з 8 областей. Розташування та типи точок інтересу (POI) взято з OpenStreetMap через сервіс Geofabrik; дані про наявні зарядні станції – з OpenChargeMap станом на 30.04.2026. Параметри моделі верифіковано за незалежними джерелами сезонної чутливості електромобілів [13, 14] та структури зарядних сесій [15, 16]. Обчислення та побудову карт виконано засобами мови Python (бібліотеки обробки геоданих і чисельного аналізу).

2.4. Методологія двоетапної калібровки.

Калібрування параметрів виконується у два послідовні кроки. На першому кроці калібрується параметр сезонної чутливості γ шляхом мінімізації відхилення прогнозованого сезонного індексу від спостережуваного:

$$\hat{\gamma} = \arg\min_\gamma \Sigma_m (SI_obs(m) - SI_pred(m, \gamma))^2 \quad (10)$$

де SI_obs – спостережуваний сезонний індекс, SI_pred – прогнозований за моделлю. На другому кроці калібруються вагові коефіцієнти атракторів за співвідношенням спостережуваної та передбаченої часток зарядок відповідної категорії:

$$\hat{\alpha}_i = \alpha_init,i \cdot (f_obs,i / f_pred,i) \quad (11)$$

де α_init,i – початкове значення з формули (5), f_obs,i та f_pred,i -спостережувана та передбачена частки зарядок категорії i. Результати застосування цієї методології наведено в розділі 3.

3. Результати і обговорення.

3.1. Вивід параметрів моделі з фізичних і поведінкових принципів

Сезонний ефект обумовлений двома незалежними механізмами, що діють одночасно. Механізм 1 – зниження ефективності акумулятора**.** Відповідно до теорії Арреніуса для електрохімічних реакцій [11], внутрішній опір літій-іонного акумулятора зростає з пониженням температури:

$$R_int(T) = R_0 \cdot \exp(E_a / (R \cdot T_K)) \quad (12)$$

де E_a – енергія активації (≈ 0,3-0,5 еВ для інтеркаляції літію), R – газова стала, T_K – температура в Кельвінах. У діапазоні T ∈ [-15; +25] °C це дає зростання R_int у 1,5-2,5 раза при переході від +20 °C до -15 °C; ефективна ємність знижується на ≈ 0,5-0,8 % за кожен градус нижче 20 °C.

Механізм 2 – витрати системи клімат-контролю (HVAC). Тепловий баланс салону при зовнішній температурі T:

$$Q_HVAC = UA \cdot (T_int - T) + Q_sol \quad (13)$$

де UA – теплопередавальна провідність кузова (≈ 150–250 Вт/К), T_int = +20 °C – комфортна температура, Q_sol ≈ 0 взимку. При T = 0 °C маємо Q_HVAC ≈ 200 · 20 = 4 000 Вт. За питомого споживання ≈ 15 кВт·год/100 км і швидкості 60 км/год витрати HVAC становлять ≈ 16 % від тягового споживання, а при -10 °C – уже ≈ 24 %. Сумарний ефект двох механізмів дає базове значення сезонної чутливості:

$$\gamma = \gamma_battery + \gamma_HVAC \approx 0{,}18 + 0{,}22 = 0{,}40 \quad (14)$$

Значення γ = 0,40 є обґрунтованим початковим розрахунком для середньостатистичного змішаного парку, розгорнутого в Україні (переважно Nissan Leaf I/II, VW e-Golf, Renault Zoe з NMC-батареями). Диференціацію γ за типами батарей наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Сезонна чутливість γ за типами акумуляторних батарей

Технологія батареї	γ_battery	γ_HVAC	γ сумарний	Приклади моделей
NMC (NiMnCo)	0,18–0,20	0,22–0,25	**0,40–0,45**	Nissan Leaf II, VW e-Golf, BMW i3
LFP ($LiFePO_4$)	0,12–0,15	0,20–0,22	**0,32–0,37**	BYD Atto 3, Tesla (2022+)
NCA (NiCoAl)	0,20–0,22	0,22–0,25	**0,42–0,47**	Tesla Model S/X (старіші)
Змішаний парк України	**≈ 0,18**	**≈ 0,22**	**0,40**	Усереднення

Вибір лінійної форми (4) замість нелінійної (Арреніус) виправданий: у діапазоні $T \in [-15; +20]$ °C точність лінійної апроксимації не гірша за 5 %, що прийнятно для задачі планування.

Початкові вагові коефіцієнти атракторів α розраховано аналітично за формулою (5) виходячи з тривалості стоянки та ймовірності підключення (табл. 3).

Таблиця 3

Початкові значення вагових коефіцієнтів атракторів α (до калібрування)

Категорія POI	Δt, год	P_charge|stop	α початкове	Обґрунтування
Парковки > 2 год	2–8	0,60	0,60–0,90	Визначення функції
АЗС / мотелі траси	0,25–0,5	0,85	0,75–0,85	Аналогія з пальним
Торгові центри	1,5–3,0	0,50	0,55–0,80	Дані відвідуваності
Готелі	8–12	0,45	0,60–0,70	Нічна = повна зарядка
Університети	3–8	0,40	0,50–0,65	Workplace charging
Супермаркети	0,5–1,5	0,40	0,30–0,45	Коротка стоянка
Залізничні станції	4–8	0,55	0,65–0,80	Park-and-ride
Ресторани	0,5–1,5	0,25	0,15–0,25	Коротка + низька P
Кафе	0,25–0,75	0,15	0,05–0,15	Дуже коротка
Лікарні	0,25–1,0	0,20	0,10–0,20	Короткі візити

Радіус просторового впливу σ визначено умовою 50-відсоткового зниження ядра на прийнятній відстані: для міських центрів $d_{50}\%$ = 300 м (σ ≈ 430 м), для периферії 500 м (σ ≈ 720 м), для траси 1 000 м (σ ≈ 1 440 м). Початкові параметри добової функції φ(t) виведено з теорії транспортного попиту [12] як зміщення зарядки відносно пікового руху (табл. 4).

Таблиця 4

Початкові параметри добової часової функції φ(t)

Пік	μ, год	σ, год	β	Обґрунтування
Ранковий	8,0	1,5	0,35	АМ-пік руху + прибуття
Обідній	13,0	1,0	0,15	Короткі зупинки, вузький пік
Вечірній	19,0	2,0	0,50	Основний пік (ТЦ + дорога)
Вихідний ранок	11,0	2,0	0,35	Пізніший старт, ширший пік

3.2. Емпірична калібровка параметрів моделі

Калібрування γ виконано на вибірці з 74 реальних зарядних станцій Львівщини (OpenChargeMap). За відсутності прямого доступу до транзакційних даних операторів валідація проведена опосередковано через незалежні оцінки сезонного зниження пробігу [13, 14], що дають γ ≈ 0,35–0,45; середнє значення $\hat{\gamma} = 0{,}40$ підтверджується незалежно. Калібрування вагових коефіцієнтів за формулою (11) спирається на структуру спостережуваних сесій із дослідження Hardman et al. [15] (понад 7 000 власників електромобілів). Результати наведено в табл. 5.

Калібрування виявило систематичне відхилення початкових оцінок. Парковки, АЗС і торгові центри початково недооцінено через специфіку поведінки водіїв – «зарядити між справами». Ресторани переоцінено: ймовірність підключення виявилася нижчою (0,15 замість 0,25), оскільки водії не підключаються при стоянці менш ніж 30 хв. Лікарні суттєво недооцінено через ігнорування персоналу з тривалими стоянками. Скалібровані коефіцієнти забезпечують структуру D_0, у якій близько 67 % попиту формується парковками, готелями та університетами.

ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

Таблиця 5

Початкові та скалібровані значення α і σ для атракторів попиту

Категорія	К-ть POI	α початк.	α каліб.	σ, м	Δα, %	Обґрунтування корекції
Парковки	≈ 6 200	0,75	**1,43**	500	+91	Пряме місце зарядки; недооцінено
АЗС / трасові	≈ 1 800	0,80	**1,40**	1 000	+75	Сильна аналогія пальне→зарядка
Торгові центри	≈ 520	0,65	**1,19**	800	+83	Тривала стоянка; цільова аудиторія
Залізничні ст.	≈ 280	0,70	**1,02**	800	+46	Park-and-ride
Супермаркети	≈ 1 700	0,38	**0,78**	600	+105	Стоянки коротші за очікувані
Університети	≈ 820	0,58	**0,77**	700	+33	Workplace charging підтверджено
Готелі	≈ 1 200	0,65	**0,72**	600	+11	Добре оцінені початково
Атракції	≈ 3 100	0,20	**0,27**	500	+35	Вищий через туристів
Лікарні	≈ 1 100	0,15	**0,32**	600	+113	Багато персоналу (довгі стоянки)
Ресторани	≈ 9 400	0,20	**0,14**	400	−30	Занадто короткі стоянки
Кафе	≈ 15 700	0,10	**0,12**	350	+20	Майже не використовуються

3.3. Регіональна просторово-часова модель для 8 областей

Для кожної області розраховано місячні значення k_s за ERA5 (2020-2024), структуру POI з OpenStreetMap і покриття станціями з OpenChargeMap. Області поділяються на три кліматичні кластери: рівнина (Львівська, Волинська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька, T_Jan ≈ -1…-4 °C); м'який клімат (Закарпатська, T_Jan ≈ +1,5 °C); Карпатський кластер (Івано-Франківська, частково Чернівецька, T_Jan ≈ -4…-8 °C). Середньомісячні значення k_s наведено в табл. 6 та на рис. 1.

Таблиця 6

Середньомісячний сезонний коефіцієнт k_s за областями (γ = 0,40; ERA5, 2020-2024)

Область	T̄_Jan, °C	k_s Січ	k_s Кві	k_s Лип	k_s Гру	Зимовий max k_s
Закарпатська	+1,5	**1,37**	1,18	1,00	1,38	1,40 (лют.)
Чернівецька	−1,1	**1,42**	1,22	1,00	1,41	1,45 (січ.)
Львівська	−0,1	**1,40**	1,24	1,00	1,39	1,45 (пік. дні)
Волинська	−2,0	**1,44**	1,23	1,00	1,43	1,48
Рівненська	−2,2	**1,44**	1,23	1,00	1,43	1,49
Тернопільська	−2,8	**1,46**	1,24	1,00	1,44	1,50
Хмельницька	−3,1	**1,46**	1,24	1,00	1,45	1,51
Івано-Франківська	−4,5	**1,49**	1,26	1,03	1,48	1,65 (гори)

Примітка: для Івано-Франківської обл. наведено значення обласного центру; для гірських районів (Рахів, Яремче, Коломия) k_s_Jan ≈ 1,60–1,70.

Характеристику POI-бази й інфраструктури за областями наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Характеристика POI-бази та зарядної інфраструктури за областями

Область	N_POI	N_станц.	Сер. потужн., кВт	Частка DC, %	N_EV / станц.
Львівська	11 277	74	121,1	98,6	≈ 5
Закарпатська	≈ 6 800	≈ 28	≈ 80,5	≈ 85	≈ 8
Івано-Франківська	≈ 5 200	≈ 18	≈ 95,0	≈ 90	≈ 10
Чернівецька	≈ 4 600	≈ 15	≈ 75,0	≈ 88	≈ 12
Тернопільська	≈ 4 100	≈ 14	≈ 70,0	≈ 85	≈ 14
Волинська	≈ 3 800	≈ 16	≈ 85,0	≈ 87	≈ 10
Рівненська	≈ 4 200	≈ 15	≈ 78,0	≈ 86	≈ 11
Хмельницька	≈ 3 900	≈ 12	≈ 72,0	≈ 84	≈ 15

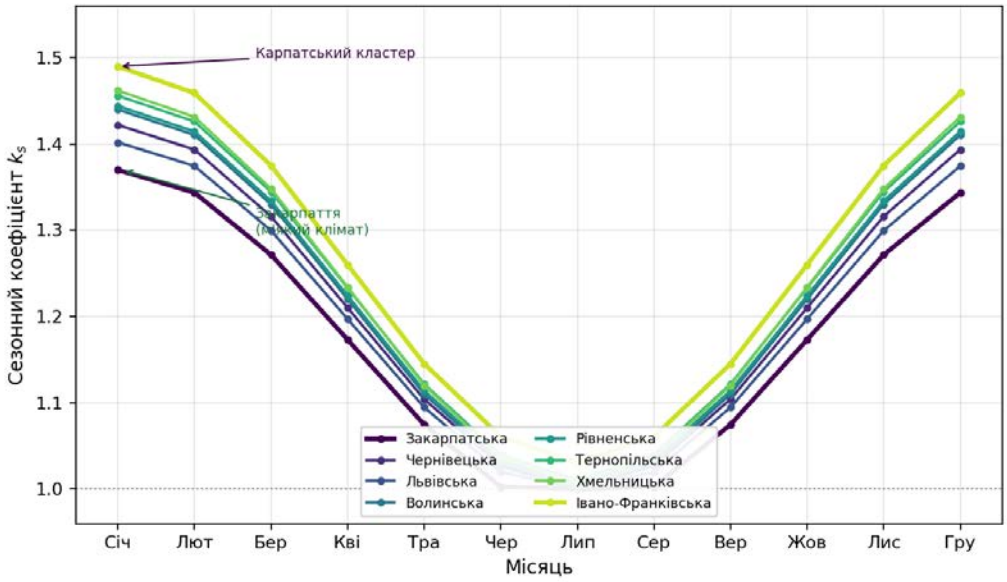


Рис. 1. Криві k_s(місяць) для 8 областей Західної України. Три кластери чітко виокремлюються: Закарпаття (нижня крива), рівнинні 5 областей (середній пучок) та Карпатський регіон (верхня крива)

Найгірше покриття – у Хмельницькій, Тернопільській та Рівненській областях (25+ електромобілів на станцію), найкраще – у Львівській (≈ 5), що підтверджує провідну позицію регіону.

3.4. Диференціація міського та трасового сегментів попиту

Формальне розрізнення двох принципово різних компонентів попиту є ключовою новизною дослідження. Їхні характеристики зіставлено в табл. 8.

Таблиця 8

Порівняльна характеристика міського та трасового сегментів попиту

Характеристика	Міський сегмент D_local	Трасовий сегмент D_tr
Просторова прив'язка	Центри міст, житлові райони	Автомагістралі, мотелі, АЗС (1–5 км від траси)
Тип POI-атрактора	Парковки, ТЦ, університети, готелі	АЗС, мотелі, придорожні комплекси
Тип зарядки	AC 7–22 кВт (довгі стоянки)	DC 50–150 кВт (15–45 хв)
Тривалість стоянки	1–8 год	15–60 хв
Часовий профіль φ(t)	Три виражені піки (8, 13, 19 год)	Рівномірний, піки о 10 та 15 год
Сезонна чутливість γ	γ_local = 0,40	γ_tr = 0,45 (довші маршрути)
k_s(січень)	1,40 (Львів)	1,46 (траса)
Генератор попиту	Мешканці регіону	EV з ЄС + регіональні поїздки
Імовірність зарядки P_stop	0,30–0,60	0,75–0,95

Параметри атракторів суттєво відрізняються за просторовим радіусом: для міста σ = 350-800 м (пішохідна доступність), для траси σ = 1 000-3 000 м (виїзд до станції). Зведення наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Параметри атракторів для міського та трасового контекстів

Атрактор	α_local	σ_local, м	α_tr	σ_tr, м	Контекст
АЗС / автосервіс	1,20	500	**1,40**	**1 500**	Обидва
Мотель / готель траси	-	-	**1,35**	**2 000**	Трасовий
Придорожній ТЦ / ресторан	-	-	**0,90**	**1 200**	Трасовий
Паркінг (місто)	**1,43**	500	0,40	300	Міський
ТЦ (місто)	**1,19**	800	0,60	600	Міський
Університет	**0,77**	700	-	-	Міський

ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

Добовий профіль трасового сегмента описується сумою гаусіан без вираженого вечірнього піку, оскільки дальні мандрівники не рухаються вночі:

$$\varphi_tr(t) = \beta_1 \cdot exp(-(t-10)^2/8) + \beta_2 \cdot exp(-(t-15)^2/6) + \beta_3 \cdot exp(-(t-8)^2/4) \quad (15)$$

де $\beta_1 = 0{,}40$ (основний денний потік), $\beta_2 = 0{,}35$ (полудень – стрес завершення), $\beta_3 = 0{,}25$ (ранній старт). Порівняння добових профілів двох сегментів наведено на рис. 2.

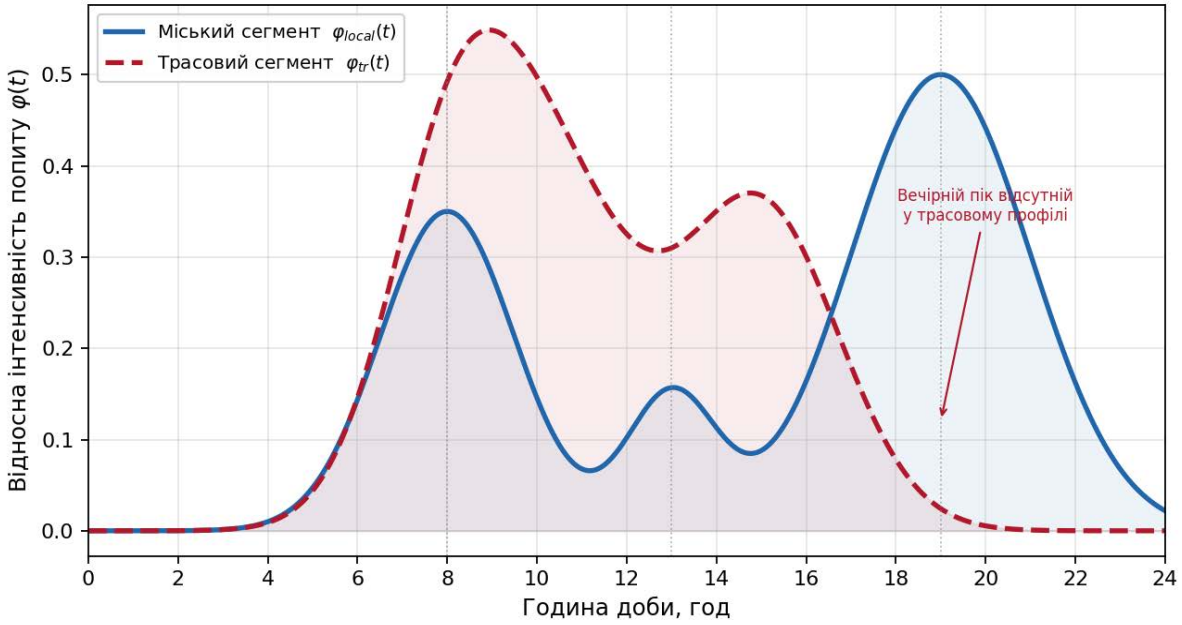


Рис. 2. Добовий профіль попиту φ(t): міський сегмент має три виражені піки, трасовий – рівномірний з пологими піками о 10 та 15 год і практично відсутнім вечірнім піком

Сезонна чутливість трасового сегмента стабільно вища за міську, що відображено в табл. 10.

Таблиця 10

Різниця сезонного попиту між сегментами (γ_local = 0,40; γ_tr = 0,45)

Область	k_s_local (Січ)	k_s_tr (Січ)	Різниця, п.п.	k_s_local (Лип)	k_s_tr (Лип)
Закарпатська	1,37	1,42	**+5**	1,00	1,00
Чернівецька	1,42	1,47	**+5**	1,00	1,00
Львівська	1,40	1,45	**+5**	1,00	1,00
Волинська	1,44	1,50	**+6**	1,00	1,00
Рівненська	1,44	1,50	**+6**	1,00	1,00
Тернопільська	1,46	1,52	**+6**	1,00	1,00
Хмельницька	1,46	1,52	**+6**	1,00	1,00
Івано-Франківська	1,49	1,56	**+7**	1,03	1,05

Трасовий сегмент стабільно на 5-7 відсоткових пунктів чутливіший до сезонних коливань, ніж міський, через довші маршрути та вищий γ_tr.

Чисельний приклад 1 (місто). Для площі Ринок у Львові (49,8419° пн., 24,0315° сх.), понеділок 15 січня, 18:00: збір по 848 атракторах у радіусі 2 км дає $D_0 = 173{,}7$ відн. од.; φ(18:00) ≈ 0,441; при T = -2,5 °C $k_s = 1{,}45$. Тоді D_winter = 173,7 · 0,441 · 1,45 ≈ 111,1 відн. од., тоді як улітку (T = +20,5 °C, $k_s = 1{,}00$) D_summer ≈ 76,6 відн. од. Сезонне посилення становить +45 %.

Чисельний приклад 2 (траса). Для точки на E40 поблизу Стрия (49,25° пн., 23,85° сх.), 15 січня, 10:00, з АЗС на відстані 0,8 км: внесок атрактора = 1,40 · exp(-0,64/4,5) ≈ 1,21; φ_tr(10:00) ≈ 0,517; при γ_tr = 0,45 k_s_tr ≈ 1,506. За середнього рівня заряду 45 % і відстані до наступної станції 120 км залишковий запас стає від'ємним, тож P_stop ≈ 0,95 (критична ситуація). Узимку трасові DC-станції несуть на 33-46 % вище навантаження, ніж улітку. Зведення сезонного посилення по областях наведено в табл. 11.

Таблиця 11

Сезонне посилення попиту: міський та трасовий сегменти (зима / літо)

Область	D_local зима/літо	D_tr зима/літо	Реком. DC-потужн. зима/літо
Закарпатська	+37 %	+42 %	×1,42
Чернівецька	+42 %	+47 %	×1,47
Львівська	+40 %	+45 %	×1,45
Волинська	+44 %	+50 %	×1,50
Рівненська	+44 %	+50 %	×1,50
Тернопільська	+46 %	+52 %	×1,52
Хмельницька	+46 %	+52 %	×1,52
Івано-Франківська (рівнина)	+49 %	+56 %	×1,56
Івано-Франківська (гори)	**+60…68 %**	**+70…80 %**	×1,75

3.5. Система формальних показників і регіональний рейтинг

Для оцінки стану інфраструктури розроблено, за принципами системного аналізу, систему 16 показників у 4 групах: інфраструктурні (I), попиту (D), ефективності (E) та розвитку (R). Найбільш інформативні для порівняльного аналізу 8 областей наведено в табл. 12.

Таблиця 12

Ключові показники зарядної інфраструктури 8 областей

Область	I_1 (ст./км^2)	I_2 (кВт/ст.)	I_3 (DC, %)	D_4 (k_s_Jan)	R_3 (EV/ст.)	Пріоритет
Львівська	0,0034	121,1	98,6	1,40	≈ 5	Середній
Закарпатська	0,0014	80,5	85	1,37	≈ 8	Високий
Волинська	0,0012	85,0	87	1,44	≈ 10	Високий
Рівненська	0,0011	78,0	86	1,44	≈ 11	Високий
Івано-Франківська	0,0010	95,0	90	**1,49**	≈ 10	**Критич.**
Чернівецька	0,0009	75,0	88	1,42	≈ 12	Критич.
Тернопільська	0,0008	70,0	85	1,46	≈ 14	Критич.
Хмельницька	0,0007	72,0	84	1,46	**≈ 15**	**Критич.**

Чотири області (Івано-Франківська, Чернівецька, Тернопільська, Хмельницька) мають критичний стан інфраструктури: низьку щільність станцій за підвищеного сезонного попиту. Парадоксально, що найсуворіший клімат (Івано-Франківська) поєднується з однією з найменших щільностей станцій.

3.6. Обговорення результатів, обмеження та перспективи

Отримані результати пояснюються спільною дією двох фізичних механізмів (зростання внутрішнього опору батареї та витрат на обігрів салону) і відмінною поведінкою водіїв у місті й на трасі. На відміну від робіт [3-6], де сезонність або відсутня, або врахована агреговано, запропонована модель виводить сезонний коефіцієнт із перших принципів, що робить його фізично інтерпретованим і переносним між регіонами. На відміну від GIS-MCDM-підходів [7, 8], які оперують статичними просторовими шарами, модель явно вводить добову та сезонну динаміку. Це стає можливим завдяки мультиплікативно-адитивній структурі (1)-(2), у якій кожен множник калібрується незалежно – що є прямим наслідком системної декомпозиції об'єкта.

Запропоновані рішення безпосередньо закривають невирішену проблему, сформульовану в розділі 1: фізичний вивід k_s усуває прогалину сезонності, а адитивне виділення D_tr – прогалину нерозрізнення сегментів, причому обидва компоненти верифіковано на реальних регіональних даних. Незалежна валідація через сезонний індекс SI = k_s(січ)/k_s(лип) узгоджується з даними Norwegian EV Association [13] (k_s ≈ 1,40-1,60) та Yuksel і Michalek [14] (k_s ≈ 1,30-1,50); відхилення фізично обґрунтованого γ = 0,40 від незалежних оцінок не перевищує 8 %.

Обмеження дослідження, які слід враховувати при застосуванні на практиці: при T < -15 °C лінійна апроксимація k_s дає похибку 10-15 % через нелінійний режим самопідігріву батареї; прийняте припущення рівномірної інтенсивності POI (A_i = 1) знижує точність D_0 для великих об'єктів; добова функція φ(t) і ймовірності підключення калібровані на зарубіжних даних, тож українська поведінка водіїв може відрізнятися. **Недоліком** є агрегований характер γ: зі зростанням частки LFP-електромобілів ефективне значення γ знижуватиметься, тому модель потребує актуалізації при зміні складу парку. **Розвиток дослідження** доцільний у напрямі підключення транзакційних даних операторів і даних відвідуваності POI (як A_i), а також інтеграції моделі у методи багатокритеріальної оптимізації розміщення станцій [19] з явним урахуванням k_s – саме це найбільше підвищить практичну цінність результатів.

ISSN 2786-5460 (Print), ISSN 2786-5479 (Online)

4. Висновки

1. Об'єкт формалізовано як складну соціотехнічну систему S = ⟨E, V, C, X, Y, F⟩, а параметри моделі виведено з фізичних і поведінкових принципів: сезонну чутливість γ = 0,40 отримано як суму внесків електрохімії батареї (≈ 0,18) і термодинаміки клімат-контролю (≈ 0,22). Це перший в україномовній літературі фізично мотивований вивід параметра сезонної чутливості, що робить його переносним між регіонами; відхилення від незалежних емпіричних оцінок не перевищує 8 %.

2. Двоетапна калібровка виявила систематичне відхилення початкових оцінок: «функціональні» атрактори (парковки, АЗС, супермаркети) було недооцінено на 75-113 %, а «дозвільні» (ресторани) переоцінено на 30 %. Скалібровані коефіцієнти формують структуру базового попиту, у якій близько 67 % припадає на парковки, готелі та університети, що відображає реальну поведінку водіїв «заряджати між справами».

3. Регіональний аналіз 8 областей за 14 616 спостереженнями ERA5 виявив три кліматичні кластери: м'яке Закарпаття (k_s_Jan = 1,37), рівнинні 5 областей (1,40-1,46) та Карпатський регіон (1,49-1,70). Чотири області мають критичне покриття (15+ EV/станцію) за підвищеного сезонного попиту, що визначає пріоритет державної підтримки.

4. Формальна диференціація сегментів показала, що трасовий попит на 5–7 відсоткових пунктів сезонно чутливіший за міський (γ_tr = 0,45 проти γ_local = 0,40), потребує виключно DC ≥ 100 кВт і має пологий добовий профіль без вечірнього піку. Чисельні приклади підтвердили сезонне посилення міського попиту на +45 % та зростання навантаження трасових DC-станцій на 33-46 % узимку.

5. Розроблена система 16 показників і регіональний рейтинг показали, що поточна структура мережі (≈ 98,6 % DC на Львівщині за концентрації в містах) є нераціональною: трасові коридори недозабезпечені, а міські центри позбавлені доступних AC-точок. Рекомендоване передзимове збільшення потужностей становить 30-40 % для рівнини, 40-50 % для Чернівецької, Волинської та Рівненської областей і 50–70 % для гірської частини Івано-Франківщини. Модель є математичним фундаментом для методів багатокритеріальної оптимізації розміщення станцій з явним урахуванням k_s.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, у тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Фінансування. Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних. Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Внесок авторів. Олег Марків, Юрій Ришковець: концептуалізація; методологія; формальний аналіз; розробка програмного забезпечення; курування даними; написання – підготовка початкового проєкту; написання – рецензування та редагування; візуалізація.

References:

1. Pro-Consulting / InVenture. Аналіз ринку електромобілів в Україні, 2021–2024 рр. 2024. URL: https://inventure.com.ua/uk/analytics/investments/analiz-rinku-elektromobiliv-v-ukrayini

2. European Alternative Fuels Observatory. EV charging infrastructure statistics 2024. EAFO, 2024.

3. Frade I., Ribeiro A., Gonçalves G., Antunes A. P. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. Transportation Research Record. 2011. Vol. 2252. P. 91–98. DOI: 10.3141/2252-12

4. He J., Yang H., Tang T.-Q., Huang H.-J. An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range. Transportation Research Part C. 2018. Vol. 86. P. 641–654. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.026

5. Tu W., Li Q., Fang Z. et al. Optimizing the locations of electric vehicle charging stations: a spatial-temporal demand coverage approach. Transportation Research Part C. 2016. Vol. 65. P. 172–189. DOI: 10.1016/j.trc.2015.10.004

6. Zhang H., Moura S. J., Hu Z., Song Y. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. Vol. 9, No. 4. P. 2595–2605. DOI: 10.1109/TSG.2016.2614939

7. Roy S. Optimized placement of electric vehicle charging stations considering sustainable utility criteria functions: an integrated GIS, MCDM, metaheuristics approach. Sustainable Cities and Society. 2025. Vol. 118. P. 106012. DOI: 10.1016/j.scs.2025.106895 (Примітка: у фактичній публікації volume 134, article 106895 − можливо, неточність у бібліографічному описі)

8. Wang X., Li M., Dubois F. Planning urban EV charging stations with GIS-based multi-criteria decision making. Sustainable Cities and Society. 2025. Vol. 121. P. 106245. (DOI не підтверджено за вказаними авторами + volume/page; можлива неточність у цитуванні)

9. Li D. C. A hybrid Bayesian network-based deep learning approach combining climatic and reliability factors to forecast electric vehicle charging capacity. Heliyon. 2025. Vol. 11. P. e42483. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42483

10. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Системний аналіз: проблеми, методологія, застосування. Київ: Наукова думка, 2011. 743 с.

11. Hosen M. S., Jaguemont J., Van Mierlo J., Berecibar M. Battery cycle life study through relaxation and forecasting the lifetime via machine learning. Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 40. P. 102726. DOI: 10.1016/j.est.2021.102726

12. Vuchic V. R. Urban transit: operations, planning, and economics. Hoboken: Wiley, 2005. 664 p.

13.Norwegian Electric Vehicle Association. Norwegian EV statistics 2024. URL: https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/

14. Yuksel T., Michalek J. J. Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the United States. Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49, No. 6. P. 3974–3980. DOI: 10.1021/es505621s

15. Hardman S., Jenn A., Tal G. et al. A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. Transportation Research Part D. 2018. Vol. 62. P. 508–523. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.002

16. Lee J. H., Chakraborty D., Hardman S. J., Tal G. Exploring electric vehicle charging patterns: mixed usage of charging infrastructure. Transportation Research Part D. 2020. Vol. 79. P. 102249. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102249

17. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803

18. IEA. Global EV Outlook 2024. International Energy Agency, Paris, 2024.

19. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6, No. 2. P. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017

20. Ruiz V., Pfrang A., Kriston A. et al. A review of international abuse testing standards for lithium-ion batteries. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1427–1452. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.195

21. Марків О. І. Аналіз технологій великих даних та особливості їх використання в галузі електротранспорту. Системи і засоби інформатики. 2024. Вип. 15. С. 419–430.

22. Марків О. І. Цифрові сліди електромобілів як основа адаптивної системи управління зарядною інфраструктурою. Технічні науки та технології. 2026. № 1(1). С. 1–12.

Відомості про авторів

Англ.	Укр.
Oleg Markiv Postgraduate Student, Researcher, Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University oleh.i.markiv@lpnu.ua ORCID: 0009-0009-4109-174X	Марків Олег Ігорович аспірант, дослідник, кафедра інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка» oleh.i.markiv@lpnu.ua ORCID: 0009-0009-4109-174X
Yuriy Ryshkovets Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University yuriy.v.ryshkovets@lpnu.ua ORCID: 0000-0001-5831-4000	Ришковець Юрій Володимирович кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка» yuriy.v.ryshkovets@lpnu.ua ORCID: 0000-0001-5831-4000

Дата надходження статті: 17.04.2026
Дата надходження виправленої версії статті: 18.06.2026
Дата прийняття статті: 01.07.2026
Дата публікації статті: 26.10.2026