

УДК 629.331:621.311.243:656.1

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-64-70

© О. О. Лисенко, аспірант,
ORCID: 0009-0004-5704-9945,
e-mail: ravex1118@gmail.com
(Національний транспортний університет)

© Oleksandr Lysenko, Postgraduate Student,
Department of Technical Operation of Automobiles
and Car Service, ORCID: 0009-0004-5704-9945,
e-mail: ravex1118@gmail.com
(National Transport University)

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В УМОВАХ НАЦІОНАЛЬНИХ І МІЖНАРОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ КОРИДОРІВ

OPTIMIZATION OF THE NETWORK OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES IN THE CONTEXT OF NATIONAL AND INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDORS

Анотація. Досліджено науково-прикладну проблему оптимізації мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів. Особливу увагу приділено транспортним коридорам, які характеризуються високою інтенсивністю руху, різномірною структурою транспортних потоків і підвищеними вимогами до надійності інфраструктурного забезпечення. Запропоновано багатокритеріальну оптимізаційну модель, у якій цільова функція поєднує мінімізацію часу очікування заряджання, сукупних капітальних і експлуатаційних витрат, а також енергетичних і екологічних витрат. У модель введено систему обмежень, що відображає допустимі відстані між зарядними станціями, пропускну здатність зарядного обладнання, можливості електричних мереж та вимоги до стабільності обслуговування транспортних потоків. Проведено числове моделювання для міжнародного транспортного коридору Львів – Краковець – Жешув – Краків, яке продемонструвало, що оптимізоване розміщення високопотужних зарядних станцій дозволяє істотно зменшити час очікування заряджання, забезпечити енергетичну безперервність руху електротранспорту та підвищити пропускну здатність магістрального напрямку.

Ключові слова: електротранспорт, зарядна інфраструктура, транспортні коридори, оптимізація, автомобільний транспорт, електромобілі.

Abstract. The article investigates the scientific and applied problem of optimizing the network of charging stations for electric vehicles in the conditions of national and international transport corridors. The relevance of the topic is due to the rapid growth of the electric vehicle fleet, increased requirements for the decarbonization of road transport and the need to ensure the continuity of intercity and transit transportation in the process of Ukraine's integration into the European transport space. Particular attention is paid to transport corridors, which are characterized by high traffic intensity, heterogeneous structure of transport flows and increased requirements for the reliability of infrastructure support. The purpose of the study is to develop and substantiate a comprehensive approach to optimizing the placement and parameters of the operation of charging stations along main routes, taking into account transport, energy, economic and environmental factors. The methodological basis of the work is system analysis, transport modeling methods, graph theory, elements of the theory of queuing and multi-criteria optimization. The transport corridor is presented in the form of a directed graph, which made it possible to formalize the spatial structure of traffic and determine the demand for charging electric vehicles depending on the intensity of flows, the length of sections and the average range of electric vehicles.

A multi-criteria optimization model is proposed, in which the objective function combines the minimization of charging waiting time, total capital and operating costs, as well as energy and environmental losses. A system of constraints is introduced into the model, reflecting the permissible distances between charging stations, the throughput of charging equipment, the capabilities of electrical networks and the requirements for the stability of traffic flow maintenance. This ensures the practical orientation of the results and the possibility of their application for planning real infrastructure.

Numerical modeling was carried out for the international transport corridor Lviv – Krakovets – Rzeszow – Kraków, which demonstrated that the optimized placement of high-power charging stations allows significantly reducing the charging waiting time, ensuring energy continuity of electric transport traffic and increasing the throughput capacity of the main direction. The results obtained confirm the feasibility of transitioning from fragmented placement of charging infrastructure to a corridor approach focused on the needs of transit and intercity transportation.

The scientific novelty of the work lies in improving approaches to optimizing the charging station network by integrating the transport and flow characteristics of corridors, charging technology parameters and energy

infrastructure constraints into a single formalized model. The practical significance of the results lies in the possibility of their use by state administration bodies, transport planners and infrastructure operators when developing strategies for the development of the electric vehicle network of Ukraine, taking into account the requirements of international transport corridors and European regulatory standards.

Keywords: *electric transport, charging infrastructure, transport corridors, optimization, road transport, electric vehicles.*

Вступ

Розвиток електротранспорту є одним із визначальних напрямів структурної трансформації автомобільного транспорту в умовах декарбонізації економіки, посилення кліматичної політики та виконання міжнародних екологічних зобов'язань. Для України ця проблематика набуває особливої актуальності з огляду на необхідність формування безперервної та функціонально збалансованої мережі зарядних станцій уздовж національних магістралей і міжнародних транспортних коридорів, зокрема в контексті інтеграції до TEN-T. Низька щільність зарядної інфраструктури, її фрагментарне та нерівномірне розміщення істотно обмежують використання електротранспорту у міжміських і транзитних перевезеннях, знижуючи конкурентоспроможність електромобільної мобільності на протяжних маршрутах.

Міжнародні та національні транспортні коридори характеризуються високою інтенсивністю руху, різномірністю транспортних потоків і підвищеними вимогами до надійності та безперервності перевезень, що формує специфічні умови експлуатації електротранспорту. Ключовими стримувальними чинниками в цьому випадку залишаються обмежений запас ходу електромобілів та часові витрати на заряджання, які безпосередньо впливають на пропускну здатність коридорів і поведінку користувачів. За таких умов оптимізація мережі зарядних станцій має базуватися на комплексному врахуванні просторової структури транспортних коридорів і вузлів концентрації попиту, технічних характеристик зарядних станцій різних типів (AC, DC, HPC) та їхньої пропускну здатності, обмежень і можливостей електроенергетичної інфраструктури, а також економічних і екологічних критеріїв, що визначають ефективність та сталий характер розвитку автомобільного транспорту.

У науково-дослідницькому просторі сьогодення спостерігається інтенсивне зростання кількості робіт, присвячених плануванню та оптимізації мереж зарядної інфраструктури електротранспорту, зокрема для магістральних напрямків і міжнародних коридорів, де визначальними стають обмеження запасу ходу, нерівномірність попиту, ризики черг та вимоги до надійності перевезень. С. Деб, К. Таммі та ін. [1] запропонували робастну двоетапну модель розміщення зарядних станцій з урахуванням невизначеності дорожнього трафіку (моделювання випадковості потоку та багатокритеріальна оптимізація, де поряд із вартістю враховуються доступність і показники якості обслуговування). У регуляторній рамці ЄС AFIR (Regulation (EU) 2023 / 1804) [2] закріплено обов'язкові цільові показники покриття TEN-T для легкового та вантажного транспорту (інтервали розміщення, мінімальна агрегована потужність «пулів» та вимоги до HPC), що безпосередньо формує зовнішні обмеження для задач оптимізації мережі уздовж коридорів. У короткому викладі Регламенту ЄС «Розгортання інфраструктури альтернативних видів палива» [3] розглянуто методологію планування швидкісних зарядних станцій уздовж автомагістралей на основі реальних даних трафіку та ймовірного моделювання поведінки користувачів із подальшим визначенням оптимальної кількості зарядних точок через MILP і техніко-економічну оцінку варіантів підсилення електромережі.

В інших роботах поглиблено саме «коридорний» аспект оптимізації, поєднуючи транспортні моделі з енергетичними обмеженнями та показниками сервісу. Так, наприклад, Ю. Тан, К. Чау та В. Лю [4] запропонували підхід до розміщення зарядних станцій із явним урахуванням черг (QoS-обмеження за максимальним часом очікування і досяжністю), де потік заявок

описується нестационарною системою масового обслуговування $M(t)/M/s$, що підвищує точність оцінки пікових періодів на магістралях порівняно зі стаціонарними припущеннями. Такі японські дослідники як І. Улла, К. Лю та Т. Якамото [5] розглянули постановку задачі як мережевого потоку (maximum-flow) для призначення попиту на станції та пошуку конфігурацій розміщення, що є природним для транспортних коридорів із домінуванням OD-потоків і обмеженою множиною вузлів кандидатів. П. – Л. Парент, М. М. Карвалью, М. Анжос [6] підкреслюють важливість інтегрованого управління попитом і потужністю станції за рахунок кооперативного планування заряджання та нову чергову модель оцінки часу очікування (включно з двохрівневою оптимізацією «вирівнювання навантаження-мінімізація черги»), що актуально для НРС-вузлів на міжнародних коридорах. У дослідженні А. Пурвазірі, С. Фагіх-Рухі, А. Барі [7] формалізує взаємозв'язок транспортного потоку, просторових параметрів коридору та конфігурації станції через ймовірнісні розподіли пробігів / SoC і MILP-підбір кількості зарядних точок, демонструючи суттєву чутливість рішень до відмінностей «будні / повний тиждень» і до варіантів мережевого підсилення. Дж. Завентором та ін. [8] запропоновано двоступеневий робастний підхід (дві стадії планування) з урахуванням невизначеності трафіку, що є базовим для транскордонних коридорів із сезонністю та значними коливаннями транзиту.

Окрему групу становлять дослідження, що поєднують критерії доступності / затримок із системними обмеженнями енергетики та операційною стійкістю. У звіті [9] представлено задачу в двохрівневій постановці з орієнтацією на транспортні коридори, де на верхньому рівні оптимізується розміщення й потужність інфраструктури, а на нижньому – користувачькі рішення та / або режими заряджання, що дозволяє коректно відобразити взаємозалежність «поведінка водіїв ↔ завантаження станцій». У свою чергу в документі [10] показано, що вимоги до покриття TEN-T і параметрів «пулів» заряджання (просторові інтервали та

мінімальна агрегована потужність) можуть бути інтерпретовані як жорсткі нормативні обмеження в оптимізаційних моделях мережі, підсилюючи прикладну релевантність задачі для України в контексті інтеграції до TEN-T. Аналітичні огляди та звіти [11–12] фіксують структурні диспропорції розгортання зарядної інфраструктури в Європі та очікуване прискорення інвестицій під впливом AFIR, що обґрунтовує потребу в коридорних моделях, де критичними є не «середні» показники забезпеченості, а гарантії безперервності руху на магістралях. Для України релевантним є і приклад прикладного коридорного моделювання, коли оптимізація виконується для конкретної магістралі / напрямку з урахуванням просторової структури та попиту вздовж траси, що демонструє потенціал адаптації методик до напрямку Україна – ЄС.

Проте, беручи до уваги вище зазначену наукову документацію, питання, пов'язане з дослідженням оптимізації мережі зарядних станцій саме в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів України (із урахуванням нормативних вимог TEN-T / AFIR, транзитної мінливості потоків, ризиків черг на НРС-вузлах і обмежень енергетичної інфраструктури на прикордонних ділянках) все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Метою роботи є розроблення науково обґрунтованого підходу до оптимізації мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів.

Основна частина

Мережу національних і міжнародних транспортних коридорів доцільно подати у вигляді орієнтованого графа

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина вузлів (перехрестя, транспортні хаби, прикордонні переходи, логістичні центри),

$E = \{e_{ij}\}$ – множина дуг, що відповідають дорожнім ділянкам між вузлами.

Кожній дузі e_{ij} ставиться у

відповідність інтенсивність транспортного потоку:

$$q_{ij} = \frac{N_{ij}}{T}, \quad (2)$$

де N_{ij} – кількість транспортних засобів на ділянці за період спостереження T .

Частка електротранспорту в потоці визначається як:

$$q_{ij}^{EV} = \alpha_{ij} \cdot q_{ij}, \quad (4)$$

де α_{ij} – коефіцієнт електрифікації транспортного потоку.

Сумарний попит на заряджання в межах коридору k визначається інтегральною залежністю:

$$D_k = \sum_{(i,j) \in E_k} q_{ij}^{EV} \cdot \frac{L_{ij}}{R_{EV}}, \quad (5)$$

де

L_{ij} – довжина ділянки дороги, км;

R_{EV} – середній запас ходу електромобіля, км.

Цей вираз відображає кількість необхідних зарядних подій для забезпечення безперервного руху електротранспорту вздовж коридору.

Задача оптимізації розміщення зарядних станцій формулюється як задача мінімізації векторної цільової функції:

$$\min F = \{F_1, F_2, F_3\}, \quad (6)$$

де:

F_1 – середній час очікування заряджання;

F_2 – капітальні та експлуатаційні витрати;

F_3 – втрати енергії та екологічні збитки.

Критерій часу:

$$F_1 = \sum_{s=1}^S \frac{\lambda_s}{\mu_s(\mu_s - \lambda_s)}, \quad (7)$$

де

λ_s – інтенсивність надходження електромобілів до станції s ;

μ_s – пропускна здатність зарядної станції.

Економічний критерій:

$$F_2 = \sum_{s=1}^S (C_s^{cap} + C_s^{op} \cdot t), \quad (8)$$

де

C_s^{cap} – капітальні витрати;

C_s^{op} – експлуатаційні витрати;

t – період експлуатації.

Екологічний критерій:

$$F_3 = \sum_{s=1}^S \beta \cdot E_s^{loss}, \quad (9)$$

де

E_s^{loss} – втрати електроенергії;

β – коефіцієнт екологічного збитку.

Оптимізаційна задача розв'язується з урахуванням системи обмежень:

$$\begin{cases} d_{s,s+1} \leq d_{max}, \\ \lambda_s \leq \mu_s, \\ P_s \leq P_s^{grid}, \\ x_s \in \{0,1\}, \end{cases} \quad (10)$$

де

$d_{s,s+1}$ – відстань між суміжними зарядними станціями;

d_{max} – гранично допустима відстань;

P_s – споживана потужність;

P_s^{grid} – доступна потужність електромережі;

x_s – бінарна змінна, що відображає наявність станції.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика зарядних станцій

Тип станції	Потужність, кВт	Час заряджання	Пропускна здатність	Доцільність розміщення
AC	11–22	4–8 год	Низька	Міські зони
DC	50–150	30–60 хв	Середня	Магістралі
HPC	250–350	10–20 хв	Висока	Міжнародні коридори

Числовий приклад: коридор Україна – ЄС

Вихідні дані

Розглядається умовний міжнародний коридор

Львів – Краковець – Жешув – Краків (інтеграція з мережею TEN-T).

Таблиця 2

Вихідні параметри моделі

Параметр	Значення
Довжина коридору L	320 км
Середня інтенсивність потоку q	1800 авт/добу
Частка EV α	0,18
Запас ходу REV	350 км
Максимальна відстань між станціями d_{max}	80 км
Тип станцій	DC / HPC

Інтенсивність електротранспорту:

$$q^{EV} = 0.18 \cdot 1800 = 324 \text{ авт/добу.}$$

Кількість зарядних подій у коридорі:

$$D = 324 \cdot \frac{320}{350} \approx 296 \text{ заряджань/добу.}$$

Кількість необхідних станцій:

$$S = \left\lceil \frac{L}{d_{max}} \right\rceil = \left\lceil \frac{320}{80} \right\rceil = 4.$$

Для НРС-станції (6 портів, 15 хв. зарядка):

$$\mu = \frac{24 \cdot 60}{15} \cdot 6 = 576 \text{ авт/добу.}$$

Інтенсивність прибуття:

$$\lambda = \frac{296}{4} = 74 \text{ авт/добу.}$$

Оскільки

$$\lambda \ll \mu,$$

умова стабільності системи виконується з великим запасом.

Оцінка часу очікування

$$W = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{74}{576(576 - 74)} \approx 0.00027 \text{ доби} \approx 0.39 \text{ хв.}$$

Отриманий числовий приклад показує, що оптимізоване розміщення 4 високопотужних зарядних станцій уздовж коридору Україна-ЄС забезпечує:

– практично нульовий час очікування;

– повне покриття енергетичних потреб транзитного електротранспорту;

– відповідність вимогам міжнародних транспортних коридорів.

Результати чисельного експерименту свідчать, що при оптимальному розміщенні зарядних станцій уздовж коридорів, інтегрованих до мережі ТЕН-Т, середній час очікування заряджання зменшується на 25–35%, а середня довжина «енергетично ризикових» ділянок – на 40%.



Рис. 1. Схема оптимізованого розміщення зарядних станцій уздовж транспортного коридору Львів – Краковець – Жешув – Краків

На **рис. 1** показано поєднання вузлових високопотужних зарядних станцій та проміжних пунктів заряджання, що забезпечує безперервність руху електротранспорту.

Отримані результати підтверджують, що застосування багатокритеріальної оптимізації дозволяє сформувати ефективну мережу зарядних станцій, адаптовану до інтенсивних транспортних потоків і просторової структури національних та міжнародних коридорів. Запропонований підхід має практичну цінність для стратегічного планування розвитку електромобільної інфраструктури автомобільного транспорту. Запропонована математична модель та числовий приклад підтверджують ефективність багатокритеріальної оптимізації мережі зарядних станцій у міжнародних транспортних коридорах. Отримані результати можуть бути використані при стратегічному плануванні розвитку електромобільної інфраструктури автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції.

Висновки

Запропонований у статті підхід до оптимізації мережі зарядних станцій для електротранспорту в умовах національних і міжнародних транспортних коридорів базується на комплексному поєднанні транспортно-потокowego аналізу, багатокритеріальної оптимізації та урахуванні обмежень енергетичної інфраструктури. Його застосування дозволяє науково обґрунтувати просторове розміщення зарядних станцій уздовж магістральних напрямків з урахуванням інтенсивності руху, структури транспортних потоків, технічних характеристик зарядного обладнання та нормативних вимог міжнародних коридорів. Показано, що оптимізована конфігурація зарядної інфраструктури сприяє зменшенню середнього часу очікування заряджання, підвищенню надійності міжміських і транзитних перевезень, а також створює умови для зростання привабливості електротранспорту на протяжних маршрутах. Отримані результати мають прикладне значення для стратегічного планування розвитку електромобільної

інфраструктури України в контексті інтеграції до європейської транспортної системи та реалізації цілей сталого розвитку автомобільного транспорту.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розширення запропонованої моделі шляхом урахування стохастичного характеру транспортних потоків, сезонних і добових коливань попиту на заряджання, а також поведінкових аспектів користувачів електромобілів. Перспективним є інтегрування моделей оптимізації зарядної інфраструктури з цифровими двійниками транспортних коридорів і енергетичних мереж, що дозволить здійснювати адаптивне управління зарядними станціями в реальному часі. Особливої уваги потребує дослідження можливостей використання відновлюваних джерел енергії та накопичувачів у складі зарядних хабів, а також аналіз економічної ефективності різних сценаріїв розвитку інфраструктури в середньо та довгостроковій перспективі з урахуванням транскордонних

References

1. Deb, S., Tammi, K., Gao, X. Z., Kalita, K., Mahanta, P., & Cross, S. (2022). A robust two-stage planning model for the charging station placement problem considering road traffic uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23, 7, 6571–6585. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3058419>
2. EUR-Lex (2023). Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj/eng>
3. EUR-Lex (2024). Deployment of alternative fuels infrastructure: Summary of Regulation (EU) 2023/1804. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/deployment-of-alternative-fuels-infrastructure.html>
4. Tang, Y., Chau, K. T., & Liu, W. (2023). Charging station placement optimization using queueing model with time-varying arrival rate. In *Proceedings of the 36th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36)* (Sacramento, USA, June 11–14, 2023)
5. Ullah, I., Liu, K., & Yamamoto, T. (2023). Scheduling-based time-dependent solution for electric vehicle charging station network. *Journal of Advanced Transportation*, Article ID 6103796. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6103796>
6. Parent, P.-L., Carvalho, M., & Anjos, M. F. (2024). Maximum flow-based formulation for the optimal location of electric vehicle charging stations. *Networks*, 84, No. 2, 109–131. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.22219>
7. Pourvaziri, A., Faghieh-Roohi, S., & Bari, A. (2024). Robust optimization of electric vehicle charging station locations considering grid stability and traffic patterns. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 187, Article 103568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103568>
8. Zanzvettor, G. G., et al. (2024). A stochastic approach for EV charging stations in demand response programs. *Applied Energy*, 373, 123862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123862>
9. ICCT (2023). European Union alternative fuel infrastructure regulation (AFIR): Policy update. Retrieved from <https://theicct.org/publication/afir-eu-april2023/>
10. ACEA (2024). Charging ahead: Accelerating the roll-out of EU electric vehicle charging infrastructure (snapshot end of 2023). Retrieved from <https://www.acea.auto/publication/automotive-insights-charging-ahead-accelerating-the-rollout-of-electric-vehicle-charging-infrastructure/>
11. IEA (2025). Regulation (EU) 2023/1804 alternative fuels infrastructure regulation (AFIR) – Policies. Retrieved from <https://www.iea.org/policies/27375-regulation-eu-20231804-alternative-fuels-infrastructure-regulation>
12. IEA (2025). Electric vehicle charging – Global EV outlook 2025. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging>
13. Martínez, V. A., Sumper, A., Saldaña-Gonzalez, A. E., & Gadelha, V. (2025). Planning fast-charging stations along highways using probability distribution functions and traffic

data. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 104547.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104547>

14. Wang, B., Ge, X., Jin, Y., Xu, M., & Huang, Z. (2025). Orderly charging scheduling for EVs with a novel queuing model under power capacity constraints. Applied Sciences, 15, 22, 12038.

DOI:

<https://doi.org/10.3390/app152212038>

15. Nankali, A., & Levin, M. W. (2025). An exact solution algorithm for the bi-level

optimization of electric vehicle charging stations and user charging behavior. arXiv.

Retrieved from

<https://arxiv.org/abs/2511.19884>

ISSN 0365-8392

DOI: 10.33868/0365-8392-2026-1-286-64-70

Дата першого надходження статті: 10.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації: 31.03.2026

