

ЕНЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОБУСІВ ЧЕРЕЗ ПРАВИЛЬНИЙ ВИБІР МІСЦЬ ДЛЯ СТАНЦІЙ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Шенуров К.О., Національний транспортний університет, Київ, Україна,
crashday654@gmail.com, orcid.org/0009-0001-3471-4146

ENERGY OPTIMIZATION OF ELECTRIC BUS CHARGING THROUGH THE PROPER SELECTION OF STATION LOCATIONS IN THE URBAN ENVIRONMENT

Shepurov K.O., National Transport University, Kyiv, Ukraine, crashday654@gmail.com,
orcid.org/0009-0001-3471-4146

Вступ. Електрифікація автомобільного транспорту є одним із головних трендів розвитку автомобільної галузі. Майже всі великі автомобільні корпорації (BMW, Opel, Mercedes, Tesla, Nissan) активно інвестують у створення електромобілів і зарядної інфраструктури. Якщо у 2015 році частка електромобілів у світовому автопарку становила лише 0,1 %, то за прогнозами вона може зрости до 10 % у 2030 році та до 50 % у 2040 році [1]. Зі зростанням кількості електротранспорту зростає й потреба у розвитку зарядних станцій. У наукових працях підкреслюється важливість їх високого коефіцієнта корисної дії, мінімізації втрат потужності та відповідності стандартам електромагнітної сумісності [2]. Проте навіть за умови технічної досконалості окремих станцій, ключовим викликом у міському середовищі залишається правильне розташування зарядної інфраструктури. Саме від нього залежить безперебійний рух електробусів, енергетична оптимізація міських мереж та економічна ефективність проєктів [3]. Оптимізація місць для встановлення зарядних станцій передбачає врахування щільності населення, маршрутів пасажирського транспорту, можливостей локальної електричної інфраструктури та перспектив розвитку міста [4]. У сучасних дослідженнях застосовують різні інструменти: від геоінформаційних систем (ГІС) для просторового аналізу [5] до стохастичних та машинно-навчальних моделей, що дозволяють прогнозувати навантаження та адаптувати графіки зарядки в умовах невизначеності [6]. Також все більшого значення набуває інтеграція з відновлюваними джерелами енергії та системами накопичення, що підвищує стійкість міських транспортних систем [7].

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до вибору місць для розташування зарядної інфраструктури електробусів у міському середовищі та визначення критеріїв, що забезпечують її енергетичну оптимізацію й економічну доцільність.

Результати дослідження. Сучасні підходи до планування зарядної інфраструктури зосереджені на забезпеченні її ефективності, доступності та інтеграції з міськими енергетичними системами. У наукових працях виділяють кілька ключових напрямів, що формують комплексне бачення розвитку цієї сфери.

Одним із способів планування є використання системної динаміки. Такий підхід дозволяє враховувати взаємозв'язки між попитом на зарядку, розвитком електромережі, розподілом енергетичних ресурсів та поведінкою користувачів. Моделі системної динаміки застосовуються для прогнозування майбутніх потреб у зарядній інфраструктурі, оцінки впливу збільшення кількості електробусів та визначення оптимального розміщення станцій. Важливо, що вони дозволяють виявити потенційні «вузькі місця» енергосистеми й мінімізувати пікові навантаження [8], [9].

Іншим напрямом розвитку є інтеграція зарядних станцій із відновлюваними джерелами енергії. Використання сонячних та вітрових установок у поєднанні з накопичувачами енергії дозволяє зменшити залежність від центральної мережі, підвищити гнучкість системи та сприяти скороченню викидів CO₂. У ряді міст вже впроваджуються рішення, коли зарядні пункти забезпечуються енергією локальних мікромереж, що робить роботу транспорту більш екологічною й енергонезалежною [8].

Перспективним є й використання технологій інтелектуального заряджання (smart charging). Завдяки динамічному управлінню зарядним процесом можна балансувати попит і пропозицію енергії в режимі реального часу. Це дозволяє мінімізувати витрати перевізників шляхом використання

нічних тарифів та уникати перевантаження електромережі у пікові години. Більш того, інтелектуальне заряджання зменшує потребу у дорогому розширенні енергетичної інфраструктури та підвищує термін служби акумуляторів [10].

Важливим напрямом досліджень є також оптимізація розташування зарядних станцій. Аналіз транспортних потоків і пасажиропотоків допомагає визначити стратегічно найвигідніші локації для їхнього встановлення. Наприклад, у ЄС діє регуляція AFIR, яка передбачає розміщення швидкісних зарядок кожні 60 км на ключових транспортних коридорах. У Китаї, навпаки, зроблено акцент на створення густої мережі, яка охоплює як мегаполіси, так і менш урбанізовані території [11]. Такі приклади демонструють, що правильний вибір місць є основою ефективності всієї системи.

Суттєве значення має і підтримка на регуляторному рівні. Уряди багатьох країн спрощують дозвільні процедури, запроваджують фінансові стимули для операторів та стандарти інтероперабельності зарядних систем, що забезпечує їхню зручність для користувачів і сприяє швидкому розгортанню інфраструктури [11], [8].

Не менш важливим є питання моніторингу та технічного обслуговування зарядних станцій. Дослідження доводять, що надійність роботи інфраструктури залежить від здатності операторів підтримувати високий рівень працездатності (uptime). У деяких містах уже введено нормативи, які зобов'язують забезпечувати стабільність роботи зарядних пунктів, що напряму впливає на якість транспортних послуг [12].

Поряд із інфраструктурними рішеннями все більше уваги приділяється енергетичним моделям для оптимізації зарядки електробусів. Сучасні моделі враховують обмеження мережі, змінність попиту та можливості локального виробництва енергії. Машинне навчання дедалі активніше застосовується для прогнозування навантаження: використання глибоких нейронних мереж дозволяє враховувати погодні умови, стан батареї і дорожню ситуацію, підвищуючи точність прогнозів і забезпечуючи баланс між навантаженням і комфортом пасажирів [13].

Окрему увагу приділяють інтеграції зарядної інфраструктури з відновлюваними джерелами у складі мікромереж. Такий підхід дозволяє гнучко розподіляти енергію між джерелами та накопичувачами, зменшуючи залежність від централізованих мереж і підвищуючи екологічність транспорту [14].

Важливою тенденцією є розвиток стохастичних і гібридних моделей, що враховують невизначеність у поведінці користувачів і транспортних потоках. Такі моделі дозволяють створювати адаптивні стратегії зарядки, які враховують випадкові зміни часу прибуття автобусів чи стану їхньої батареї [15].

Нарешті, моделі, орієнтовані на тарифну політику, дають можливість оптимізувати зарядку відповідно до змінних тарифів на електроенергію. Це забезпечує зменшення експлуатаційних витрат і допомагає уникати перевантаження системи у години пікових навантажень [16].

Отже, аналіз сучасних підходів показує, що розвиток зарядної інфраструктури електробусів потребує комплексного врахування технічних, енергетичних і соціально-економічних чинників. Водночас саме оптимізація розташування станцій є ключовим напрямом, адже вона безпосередньо визначає ефективність роботи всієї системи: від стабільності графіків перевезень до навантаження на електромережу та економічної доцільності проєктів. На відміну від технологій інтелектуального заряджання чи інтеграції відновлюваних джерел, які переважно впливають на енергетичну складову, просторово-логістичний аспект формує базу для функціонування транспортної інфраструктури в цілому.

Розгляд методів оптимізації розташування зарядних станцій є доцільним, оскільки саме вони дозволяють поєднати транспортну логістику, енергетичні можливості та потреби населення в єдину систему. Це робить їх найбільш релевантним інструментом для вирішення завдання енергетичної оптимізації міського електробусного транспорту.

Оптимізація розміщення зарядних станцій. Ефективне розміщення зарядних станцій для електробусів у міському середовищі визначається низкою факторів. По-перше, щільність населення та пасажиропотоку безпосередньо впливають на потребу в зарядній інфраструктурі: у районах з високим попитом на громадський транспорт кількість електробусів зростає, що потребує більшої кількості зарядних станцій [17]. По-друге, важливим є технічний стан електричної інфраструктури: станції мають розташовуватись там, де є можливість підключення до мереж із достатньою пропускну здатністю та резервною ємністю трансформаторних підстанцій [18]. Транспортна

логістика є ще одним критерієм: доцільно планувати розташування станцій у місцях кінцевих зупинок або депо, що дозволяє заряджати електробуси під час перерви без шкоди для графіка руху. За даними Li et al. (2015), «інтеграція зарядних точок у ключові вузли транспортної мережі мінімізує простої та покращує ефективність використання парку електробусів» [19]. Важливо також враховувати плани міського розвитку та зонування, щоб уникнути конфліктів із житловими чи рекреаційними зонами [20].

Геоінформаційні системи (ГІС) є одним з найефективніших інструментів для оптимізації розташування зарядних станцій. Вони дозволяють інтегрувати просторові дані — щільність населення, пасажиропотоки, доступність електромереж — і моделювати різні сценарії розвитку інфраструктури. Як зазначають Ghasri et al. (2023), «ГІС-аналіз забезпечує комплексне уявлення про взаємозв'язки між транспортними потоками та енергетичними ресурсами, що підвищує точність вибору місць для станцій» [21]. За допомогою ГІС можливо оцінювати вплив розміщення станцій на навантаження мережі, а також візуалізувати результати для ухвалення рішень інвесторами та муніципалітетами [22]. Це робить ГІС не лише інструментом аналізу, а й ефективним засобом комунікації між різними зацікавленими сторонами.

ГІС вже активно використовується у Китаї для побудови національної мережі зарядок, що поєднує міські й сільські регіони. У США ГІС застосовують для оцінки впливу зарядних станцій на локальні електромережі (наприклад, у Нью-Йорку). В ЄС використовується інтеграція ГІС з планами міського зонування, що дозволяє уникати конфліктів у забудові [25].

Для визначення оптимальної кількості та розташування станцій широко використовуються математичні моделі. Найчастіше застосовуються: лінійне та цілочисельне програмування — для пошуку рішень у рамках заданих бюджетних обмежень; стохастичні моделі, що враховують невизначеність у графіках руху та рівні заряду батареї. Wang & Liu (2022) показали, що стохастична оптимізація зарядки дозволяє зменшити пікове навантаження на мережу на 30 % порівняно з традиційними підходами [23]. Це підтверджує ефективність комбінування методів оптимізації з енергетичними моделями.

Оптимізація розташування зарядних станцій не може відбуватись ізольовано від транспортної системи. У сучасних підходах поєднують планування інфраструктури з моделями руху автобусів, що базуються на GPS-даних. Така інтеграція дозволяє прогнозувати затримки, простої та споживання енергії на маршрутах. Дослідження Li et al. (2015) показали, що розташування станцій у пересадкових вузлах підвищує ефективність роботи мережі на 12–18 %, оскільки зарядка поєднується з природними зупинками транспорту [19]. Таким чином, транспортно-енергетичний підхід забезпечує більш реалістичну оцінку ефективності інфраструктури.

Ще одним напрямом оптимізації є поєднання розташування станцій із локальними відновлюваними джерелами енергії (сонячні панелі, вітрові турбіни) та системами зберігання енергії. Lee & Kim (2022) підкреслюють, що «інтеграція зарядних систем у мікромережі знижує залежність від централізованих мереж і скорочує витрати на електроенергію на 22 %» [24].

Цей підхід дозволяє створювати більш стійкі міські енергосистеми, знижувати вуглецевий слід та забезпечувати резервне живлення у пікові години.

Оптимізація розташування зарядних станцій має враховувати не лише технічні, а й соціальні чинники. Це стосується доступності станцій для пасажирів, часу очікування, а також впливу на довкілля. У звіті IEA (2024) зазначається, що «розташування станцій у стратегічних транспортних вузлах сприяє зниженню часу поїздок і підвищує привабливість громадського транспорту для мешканців міст» [25].

Таким чином, поєднання технічних, енергетичних, транспортних та соціально-екологічних факторів формує комплексний підхід до оптимізації розташування зарядної інфраструктури для електробусів.

Економічна доцільність як наслідок оптимізації. Оптимальне розташування зарядних станцій безпосередньо впливає на економічну ефективність електробусного транспорту. По-перше, воно зменшує витрати на інфраструктуру. Як зазначає BloombergNEF (2022), «правильне планування мережі станцій дозволяє уникати дублювання інвестицій і скорочує середню вартість проєкту на десятки відсотків завдяки кращому використанню існуючих енергомереж» [26]. Це особливо важливо для міст із обмеженим бюджетом, де інфраструктурні проєкти потребують максимальної віддачі від вкладених коштів.

По-друге, оптимізація знижує експлуатаційні витрати транспортних операторів. Розташування станцій у стратегічних вузлах маршруту мінімізує простої автобусів і скорочує час у дорозі. Дослідження Volvo Group і KPMG показало, що середнє європейське місто з населенням 500 000 осіб може заощаджувати до 100 млн шведських крон щороку за рахунок переходу на електробуси, причому «ключовим фактором економії є інтеграція зарядної інфраструктури в транспортну логістику» [27].

По-третє, ефективне розміщення станцій сприяє зниженню вартості електроенергії завдяки можливості використовувати нічні тарифи та інтегрувати відновлювані джерела. Liu et al. (2022) довели, що врахування тарифної політики під час планування зарядки дозволяє зменшити витрати на електроенергію на 19–29 % [28]. У поєднанні з довшим строком служби батареї, який забезпечує рівномірне навантаження на мережу, це формує додатковий фінансовий ефект для перевізників.

Нарешті, правильне планування інфраструктури має непрямі економічні переваги. Зменшення викидів CO₂ та шумового забруднення знижує соціальні витрати на охорону здоров'я та покращує якість життя мешканців. За даними IndiaSpend (2023), електробуси «забезпечують на 82 % більший щоденний прибуток порівняно з дизельними», причому цей ефект значною мірою досягається завдяки зменшенню витрат на паливо й обслуговування у правильно організованій інфраструктурі [29].

Економічна доцільність є безпосереднім наслідком оптимізації розташування зарядних станцій: зниження інвестиційних і експлуатаційних витрат поєднується з довгостроковими вигодами від підвищення ефективності транспортної системи та покращення екологічної ситуації в місті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] R. V. Bagach, «Підвищення електромагнітної сумісності та енергоефективності зарядних станцій електромобілів на основі активних випрямлячів,» дис. канд. техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, 2024, 179 с.
- [2] A. A. Plakhtiy, V. P. Nerubatskyi, V. E. Kavun, and A. V. Mashura, «Компенсация высших гармоник входных токов в системах с параллельным включением автономных инверторов,» *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, vol. 27, no. 103, pp. 65–74, 2018. <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>
- [3] C. Liu, et al., «Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [4] X. Li, et al., «Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems,» *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [5] M. Ghasri, et al., «GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, pp. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>
- [6] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [7] J. Zhang, et al., «Renewable Energy Integration for Electric Bus Charging Using GIS,» *eTransportation*, vol. 20, pp. 100210, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100210>
- [8] IEEE Xplore, «Dynamic modeling and system-level approaches for EV charging infrastructure planning,» 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10045673>
- [9] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [10] EV Magazine, «Global EV Outlook 2024: Trends in EV Charging,» 2024. [Online]. Available: <https://evmagazine.com/articles/global-ev-outlook-2024-trends-in-ev-charging>
- [11] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging,» 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [12] Salata Institute, Harvard University, «Urban EV Charging for All,» 2024. [Online]. Available: https://salatainstitute.harvard.edu/wp-content/uploads/2024/06/FINALFINAL_Urban-EV-Charging-For-All.pdf

- [13] B. Peng, Z. Zhang, and Y. Xu, «Deep Learning Based Load Forecasting for EV Charging Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 4, pp. 3298–3308, Jul. 2024. <https://doi.org/10.1109/TSG.2024.10643227>
- [14] D. Lee and H. Kim, «Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, pp. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [15] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [16] Z. Zhou, D. Wang, and Y. Huang, «Real-Time Pricing-Based Energy Scheduling for Electric Vehicle Fleets in Smart Grids,» *Energy*, vol. 281, pp. 127290, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127290>
- [17] X. Liu, H. Yang, M. Wang, and Y. Wang, «A Review of Energy Management Strategies for Electric Bus Charging Infrastructure,» *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54321–54340, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10578078>
- [18] C. Liu, et al., «Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [19] X. Li, et al., «Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems,» *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [20] Y. Li, et al., «Urban Planning Integration for EV Charging Deployment,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, pp. 105032, May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105032>
- [21] M. Ghasri, et al., «GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, pp. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>
- [22] H. Nakanishi, et al., «GIS and Decision Support for Charging Infrastructure,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 10, pp. 6005, May 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20106005>
- [23] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [24] D. Lee and H. Kim, «Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, pp. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [25] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging,» 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [26] Bloomberg New Energy Finance, «Electric Vehicle Outlook: Urban Bus Economics,» 2022. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>
- [27] OEM Off-Highway, «Study Finds Cities Running Electric Buses Provides Financial as Well as Environmental Benefits,» 2015. [Online]. Available: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/trends/press-release/12119230/study-finds-cities-running-electric-buses-provides-financial-as-well-as-environmental-benefits>
- [28] Y. Liu, L. Wang, Z. Zeng, and Y. Bie, «Optimal charging plan for electric bus considering time-of-day electricity tariff,» *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 123–137, 2022. <https://doi.org/10.1108/JICV-04-2022-0008>
- [29] IndiaSpend, «Electric Buses Earn 82% More Profit Than Diesel Daily,» 2023. [Online]. Available: <https://www.indiaspend.com/electric-buses-earn-82-more-profit-than-diesel-daily-85587>

REFERENCES

- [1] R. V. Bagach, «Improving the Electromagnetic Compatibility and Energy Efficiency of Electric Vehicle Charging Stations Based on Active Rectifiers,» Ph.D. dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, 2024, 179 p.

- [2] A. A. Plakhtiy, V. P. Nerubatskyi, V. E. Kavun, and A. V. Mashura, "Compensation of Higher Harmonics of Input Currents in Systems with Parallel Connection of Autonomous Inverters," *Electrical and Computer Systems*, vol. 27, no. 103, pp. 65–74, 2018. <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>
- [3] C. Liu, et al., "Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [4] X. Li, et al., "Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [5] M. Ghasri, et al., "GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>
- [6] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [7] J. Zhang, et al., "Renewable Energy Integration for Electric Bus Charging Using GIS," *eTransportation*, vol. 20, p. 100210, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100210>
- [8] IEEE Xplore, "Dynamic Modeling and System-Level Approaches for EV Charging Infrastructure Planning," 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10045673>
- [9] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [10] EV Magazine, "Global EV Outlook 2024: Trends in EV Charging," 2024. [Online]. Available: <https://evmagazine.com/articles/global-ev-outlook-2024-trends-in-ev-charging>
- [11] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging," 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [12] Salata Institute, Harvard University, "Urban EV Charging for All," 2024. [Online]. Available: https://salatainstitute.harvard.edu/wp-content/uploads/2024/06/FINALFINAL_Urban-EV-Charging-For-All.pdf
- [13] B. Peng, Z. Zhang, and Y. Xu, "Deep Learning-Based Load Forecasting for EV Charging Networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 4, pp. 3298–3308, Jul. 2024. <https://doi.org/10.1109/TSG.2024.10643227>
- [14] D. Lee and H. Kim, "Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems," *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, p. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [15] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [16] Z. Zhou, D. Wang, and Y. Huang, "Real-Time Pricing-Based Energy Scheduling for Electric Vehicle Fleets in Smart Grids," *Energy*, vol. 281, p. 127290, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127290>
- [17] X. Liu, H. Yang, M. Wang, and Y. Wang, "A Review of Energy Management Strategies for Electric Bus Charging Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54321–54340, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10578078>
- [18] C. Liu, et al., "Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [19] X. Li, et al., "Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [20] Y. Li, et al., "Urban Planning Integration for EV Charging Deployment," *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, p. 105032, May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105032>
- [21] M. Ghasri, et al., "GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>

- [22] H. Nakanishi, et al., "GIS and Decision Support for Charging Infrastructure," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 10, p. 6005, May 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20106005>
- [23] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [24] D. Lee and H. Kim, "Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems," *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, p. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [25] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging," 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [26] Bloomberg New Energy Finance, "Electric Vehicle Outlook: Urban Bus Economics," 2022. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>
- [27] OEM Off-Highway, "Study Finds Cities Running Electric Buses Provides Financial as Well as Environmental Benefits," 2015. [Online]. Available: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/trends/press-release/12119230/study-finds-cities-running-electric-buses-provides-financial-as-well-as-environmental-benefits>
- [28] Y. Liu, L. Wang, Z. Zeng, and Y. Bie, "Optimal Charging Plan for Electric Bus Considering Time-of-Day Electricity Tariff," *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 123–137, 2022. <https://doi.org/10.1108/JICV-04-2022-0008>
- [29] IndiaSpend, "Electric Buses Earn 82% More Profit Than Diesel Daily," 2023. [Online]. Available: <https://www.indiaspend.com/electric-buses-earn-82-more-profit-than-diesel-daily-85587>

РЕФЕРАТ

Шепуров К.О. Енергетична оптимізація зарядки електробусів через правильний вибір місць для станцій у міському середовищі / К.О. Шепуров // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті розглянуто проблему оптимізації розташування зарядних станцій для електробусів у міському середовищі. Зростання кількості електробусів у громадському транспорті створює потребу не лише в енергоефективних зарядних пристроях, але й у стратегічному плануванні їхньої інфраструктури. Визначено, що саме вибір місць для розташування зарядних станцій є ключовим чинником, який впливає на енергетичну оптимізацію, надійність перевезень, економічну доцільність та екологічний ефект від переходу на електротранспорт. У роботі здійснено огляд сучасних методів планування зарядної інфраструктури: системної динаміки, інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, технологій інтелектуального заряджання та багатокритеріального аналізу. Особливу увагу приділено застосуванню геоінформаційних систем (ГІС), які дозволяють комплексно враховувати щільність населення, транспортні потоки, можливості електромереж і плани розвитку міста. Окремо розглянуто алгоритмічні та математичні підходи до оптимізації (лінійне та стохастичне програмування, евристичні методи), що забезпечують більш точне прогнозування потреб і адаптацію системи до змінних умов. Показано, що оптимальне розташування зарядних станцій безпосередньо впливає на економічну ефективність впровадження електробусів. Це проявляється у зниженні інвестиційних витрат на інфраструктуру, скороченні витрат на електроенергію й обслуговування, підвищенні прибутковості перевізників та прискоренні окупності проєктів. Додатково оптимізація сприяє екологічним перевагам: скороченню викидів CO₂, зменшенню шумового забруднення та покращенню якості життя у містах. Результати роботи підкреслюють, що проблема ефективного розташування зарядної інфраструктури має міждисциплінарний характер і є надзвичайно актуальною для сучасного міського транспорту. Рекомендовано інтегрувати підходи ГІС-аналізу, енергетичного моделювання та економічної оцінки у практику міського планування для досягнення сталого розвитку транспортних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОБУС, ЗАРЯДНА ІНФРАСТРУКТУРА, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, МІСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Shepurov K.O. Energy optimization of electric bus charging through the proper selection of station locations in the urban environment. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article addresses the problem of optimizing the location of charging stations for electric buses in urban environments. The growing number of electric buses in public transport requires not only energy-efficient charging devices but also strategic infrastructure planning. It is identified that the placement of charging stations is the key factor affecting energy optimization, service reliability, economic feasibility, and the environmental benefits of transitioning to electric transport. The study provides an overview of modern planning methods for charging infrastructure, including system dynamics, integration with renewable energy sources, smart charging technologies, and multi-criteria analysis. Particular attention is given to the application of Geographic Information Systems (GIS), which allow a comprehensive assessment of population density, passenger flows, grid capacity, and urban development plans. Algorithmic and mathematical approaches (linear and stochastic programming, heuristic methods) are also discussed as tools for more accurate demand forecasting and system adaptation to changing conditions. It is demonstrated that optimal station placement directly impacts the economic efficiency of electric bus deployment. Benefits include reduced infrastructure investment, lower electricity and maintenance costs, higher profitability for operators, and faster project payback. Furthermore, optimization contributes to environmental advantages such as CO₂ emission reduction, noise decrease, and improved urban quality of life. The results highlight that the problem of charging infrastructure placement is interdisciplinary and highly relevant to modern urban transport. It is recommended to integrate GIS analysis, energy modeling, and economic evaluation into urban planning practices to ensure sustainable transport system development.

KEYWORDS: ELECTRIC BUS, CHARGING INFRASTRUCTURE, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, URBAN TRANSPORT, ENERGY EFFICIENCY.

АВТОР:

Шепуров Кирило Олександрович, аспірант кафедри технічного обслуговування та експлуатації автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: crashday654@gmail.com, тел. +38 098-487-07-18, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, orcid.org/0009-0001-3471-4146

AUTHORS:

Shepurov Kiril, PhD student, Department of Vehicle Maintenance and Operation, crashday654@gmail.com, National Transport University, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, e-mail: crashday654@gmail.com, tel. +38 098-487-07-18, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0009-0001-3471-4146

РЕЦЕНЗЕНТИ:

REVIEWERS: