

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.331.6

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.167

ОСОБЛИВОСТІ РОЗМІЩЕННЯ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ
ТА СТРАТЕГІЇ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОБУСІВ

Шепуров К. О.

Національний транспортний університет «НТУ»

Анотація. У статті розглянуто основні технології заряджання електробусів: дротове, бездротове, супершвидке, пантографне заряджання, метод заміни батарей і заряджання під час руху. Проаналізовано їх переваги, недоліки, економічну доцільність впровадження та приклади реалізації в різних країнах світу. Окрему увагу приділено впливу вибору технології на експлуатаційні витрати та ефективність роботи громадського транспорту. Визначено, що жоден із методів не є універсальним, а оптимальне рішення залежить від інфраструктурних особливостей, фінансових можливостей та специфіки транспортної системи конкретного міста чи регіону. Запропоновано подальші дослідження для визначення найвигіднішої стратегії заряджання електробусів.

Ключові слова: зарядна інфраструктура, електробуси, дротове заряджання, бездротове заряджання, супершвидке заряджання.

Вступ

Електротранспорт набуває все більшої популярності у світі завдяки своїй екологічній безпеці, ефективності та зниженню викидів парникових газів. Важливим аспектом успішної інтеграції електробусів у транспортні системи міст є створення ефективної зарядної інфраструктури та оптимізація стратегій заряджання. Розвиток цієї сфери має вирішальне значення для забезпечення стабільності роботи громадського транспорту, особливо в мегаполісах з високою пасажиромісткістю.

Аналіз публікацій

Сучасні технології заряджання електробусів пропонують широкий спектр рішень, зокрема дротове, бездротове та супершвидке заряджання, використання пантографів, а також метод заміни батарей. Кожна з цих технологій має свої переваги та виклики, що залежать від інфраструктурних можливостей, особливостей транспортної системи та економічної доцільності. Наприклад, дротове заряджання є найпоширенішим завдяки простоті та доступності, тоді як супершвидке заряджання демонструє перспективи зменшення часу простою транспортних засобів [1, 3].

Розвиток зарядної інфраструктури залежить від багатьох факторів, наприклад урядової підтримки, інвестицій в інновації та здатності адаптувати новітні технології до

потреб конкретного регіону. У Європі, США, Китаї та інших країнах активно впроваджуються як традиційні, так і інноваційні методи заряджання, що дає змогу розв'язувати різні питання у сфері електричного транспорту [2, 9].

Мета й постановка завдання

Метою цієї роботи є аналіз наявних технологій заряджання електробусів, оцінювання їх переваг і недоліків, а також визначення перспективних напрямів розвитку зарядної інфраструктури. Це допоможе підготувати рекомендації щодо оптимізації роботи громадського транспорту з огляду на сучасні технологічні рішення.

Сучасні технології заряджання електробусів

Дротове заряджання (*Plug-in Charging*) електробусів є найбільш поширеним і перевіреним методом. Він базується на під'єднанні транспортного засобу до зарядної станції за допомогою кабелю. Зазвичай використовується стандартний роз'єм, такий як CCS (*Combined Charging System*) чи CHAdeMO, що забезпечують уніфікованість і простоту під'єднання [2, 3].

Дротове заряджання є зручним рішенням для електробусів, які мають час на зупинках чи в депо. Цей метод дає змогу заряджати батареї повністю, що особливо важливо для нічної підготовки до денного циклу експлу-

атації. Зарядні станції для електробусів зазвичай підтримують потужність до 150–450 кВт, що допомагає заряджати батареї ємністю 200–500 кВт·год за декілька годин. Такі характеристики забезпечують гнучкість у використанні як для денного, так і нічного заряджання [2, 3].

Зарядні станції можуть бути інтегровані у внутрішню інфраструктуру депо, що забезпечує централізоване обслуговування значної кількості транспортних засобів. Станом на 2023 р. більшість європейських компаній використовують цей метод для підтримки громадського транспорту [2].

Завдяки універсальності та порівняно низькій вартості встановлення дротове заряджання залишається актуальним в умовах міських транспортних мереж, особливо у високонавантажених районах [3]. Установлення одного пункту дротового заряджання коштує в середньому \$20 000–\$50 000 залежно від потужності та складності інтеграції. Урядові програми субсидування, наприклад, у ЄС та США, сприяють поширенню зазначеної технології [1].

Цей тип заряджання електробусів популярний у Лондоні. Дротові зарядки активно встановлюються на кінцевих зупинках автобусних маршрутів і в депо. Ці станції забезпечують швидке заряджання під час простою і дають змогу підтримувати високу інтенсивність роботи автобусів [2].

Також цей тип заряджання активно використовують у Китаї як одного зі світових лідерів у впровадженні електротранспорту. Дротове заряджання застосовують у межах інтегрованих транспортних систем. У Пекіні встановлено понад 100 тис. зарядних станцій, які обслуговують електробуси на ключових маршрутах [1, 3].

США також не відстають у впровадженні електротранспорту. У місті Сан-Франциско створена ефективна інфраструктура для дротового методу, орієнтована на обслуговування густонаселених районів. Станції розташовані таким чином, щоб забезпечити мінімальний час простою автобусів [1].

Бездротове заряджання (*Wireless Charging*) для електробусів базується на технології індуктивної передачі енергії. Електробуси заряджаються, паркуючись над зарядною станцією, яка може бути інтегрована в дорожнє покриття або розташована в спеціально відведених місцях.

Ця технологія дає змогу автоматично заряджати транспортні засоби без потреби у

фізичному під'єднанні кабелів, що робить її більш зручною для міського середовища. Технологія допомагає заряджати транспортні засоби як у стані руху (*dynamic wireless charging*), так і під час зупинки (*stationary wireless charging*).

Бездротове заряджання спрощує експлуатацію транспортних засобів, даючи змогу заряджати їх на зупинках без додаткових дій з боку водіїв. Це особливо важливо на кінцевих станціях маршрутів або в місцях частих зупинок.

Зазначена технологія забезпечує чистий зовнішній вигляд вулиць, оскільки не потребує видимих зарядних кабелів чи стаціонарних станцій. Бездротове заряджання сприяє переходу до екологічно чистого транспорту, особливо у великих містах із значним пасажиропотоком.

Такий тип заряджання електробусів використовують у Швеції. Проєкт *Smartroad Gotland* є першою у світі публічною електричною дорогою для індуктивного заряджання важких транспортних засобів. Тестування показало, що автобуси та вантажівки можуть заряджатися під час руху чи зупинок, забезпечуючи безперервну експлуатацію навіть у суворих зимових умовах [4, 5].

Бездротовий метод також упроваджують у США: у Сіетлі та Індіанapolisі встановлено бездротові установки, які допомагають зменшити необхідність у стаціонарних зарядних станціях. Наприклад, у місті Індіанapolisі переведення автобусів на бездротовий метод сприяло зменшенню кількості зарядних станцій з 20 до 6 [4].

Крім того, цей вид заряджання впроваджують у Південній Кореї: активно тестуються пілотні проєкти, зокрема система OLEV (*On-Line Electric Vehicles*), яка дає змогу заряджати транспортні засоби під час руху [6].

Супершвидке заряджання – це метод, за якого електробус може отримувати потужний заряд за дуже нетривалий проміжок часу, що значно зменшує час, необхідний для підзаряджання. Зазначена технологія використовує спеціалізовані зарядні станції з потужністю, що досягає 300 кВт і більше, що дає змогу заряджати батареї на рівні, достатньому для подальшого руху, за кілька хвилин.

У разі супершвидкого заряджання виникають значні теплові навантаження, що може призводити до перегріву батарей.

Це вимагає використання розвинених систем охолодження, щоб запобігти пошкодженню компонентів батареї та зменшити вплив на їх термін служби [8, 9].

Система супершвидкого заряджання здатна мінімізувати періоди простою електробусів, що є критичним для покращення експлуатаційної ефективності та підвищення частоти рейсів [7, 9]. Цей метод дає змогу електробусам швидко повернутися в експлуатацію після нетривалого підзаряджання, що мінімізує час простою на станціях заряджання та підвищує ефективність громадського транспорту під час тривалих маршрутів.

В умовах великих міст або міжміських маршрутів супершвидке заряджання є ключовим фактором для підтримки великої прохідності автобусів на маршруті. Це особливо важливо для міст, що мають складну інфраструктуру або довгі маршрути, де звичайний час заряджання був би надмірно тривалим [8, 11].

Крім того, оскільки заряджання триває лише кілька хвилин, а не години, підвищується зручність для користувачів, оскільки автобуси не будуть стояти на зупинках протягом тривалого часу. Це також сприяє зменшенню черги на зарядних станціях і підвищенню рівня обслуговування пасажирів [10].

Для реалізації супершвидкого заряджання необхідно побудувати спеціалізовану інфраструктуру, що потребує значних інвестицій у розвиток електричних мереж та зарядних станцій з високими потужностями.

Це може бути обмеженням для деяких міст або операторів транспорту [9]. Супершвидке заряджання є важливою технологією для транспорту. Однак для її успішного розвитку необхідно розв'язати кілька проблем, таких як ефективне охолодження батарей, зменшення зносу елементів батарей та оптимізація інфраструктури. Проте, з огляду на випробування, що проводяться в країнах, таких як Китай, Німеччина та США, технологія має значний потенціал для масового впровадження в майбутньому [12, 13].

Цей тип заряджання електробусів використовують у Китаї. Там активно впроваджують технології супершвидкого заряджання для електробусів, зокрема в Пекіні та Шанхаї, де зарядні станції розташовані на ключових точках міських маршрутів. Це

дає змогу зменшити час перебування транспортних засобів у депо, забезпечуючи їх більш ефективну роботу на маршрутах [8, 11].

У Європі активно впроваджуються станції для заряджання автобусів за лічені хвилини. Це забезпечує швидке обслуговування маршрутів громадського транспорту в межах міста й підвищує ефективність їх роботи [11].

Пантографне заряджання для електробусів – ефективна технологія, що забезпечує швидке поповнення заряду батарей за допомогою пантографа, який піднімається із зарядної станції та під'єднується до електробуса. Цей метод особливо корисний на кінцевих зупинках, де автобуси можуть заряджатися протягом тривалих зупинок без порушення графіка руху [14]. Пантографні станції дають змогу швидко заряджати автобус під час очікування наступного рейсу, що підвищує ефективність транспортної системи [14].

Технологія може бути інтегрована в наявну інфраструктуру, особливо на зупинках і депо, не вимагаючи значних змін у міській архітектурі [15]. Крім того, вони дають змогу електробусам заряджатися на кінцевих зупинках, що особливо важливо для транспортних засобів, які обслуговують довгі маршрути [15]. Але, на жаль, ця технологія має значні недоліки, зокрема великі витрати на інфраструктуру. Встановлення пантографних станцій потребує чималих інвестицій у високопотужну інфраструктуру [14]. Електробуси можуть бути обмежені у своїх маршрутах, якщо в певних місцях немає необхідних зарядних станцій [15]. Пантографи можуть вийти з ладу через несприятливі погодні умови або технічні несправності [14].

Описаний тип заряджання електробусів використовують у багатьох країнах. У Німеччині впроваджені пантографні технології в містах, таких як Гамбург та Карлсруе, для швидкого заряджання електробусів [14]. Швеція, зокрема Стокгольм, активно застосовує пантографні зарядні станції на своїх кінцевих зупинках [14]. У великих містах Китаю (наприклад, Шеньчжень) використовують цю технологію для забезпечення безперебійної роботи значної кількості електробусів [14].

Метод заміни батареї для електробусів є цікавою альтернативою традиційним методам заряджання, оскільки він значно скоро-

чує час на підзаряджання та забезпечує більшу ефективність для транспортних засобів із високою інтенсивністю використання.

Цей метод дає змогу електробусам працювати без тривалих перерв, що є критичним для маршрутів із високим навантаженням, де важлива безперервна робота транспорту.

Оскільки батареї можуть бути замінені на нові за лічені хвилини, це значно зменшує час простою автобусів на станціях заряджання, що є вигідним для обслуговування великих міських мереж.

Але, на жаль, ця система, як і інші, має певні недоліки, а саме: вартість інвестицій в батареї та обладнання для їх заміни є значними; зважаючи на потребу у великій кількості запасних батарей, це може бути дорогим рішенням для міст; упровадження складної логістики та обладнання станцій для заміни батарей на кінцевих зупинках.

Метод заміни батарей активно розвивається в Китаї, де проводяться пілотні проєкти. Така технологія дає змогу швидко адаптувати інфраструктуру для електробусів, зокрема на кінцевих зупинках і в місцях з великим навантаженням [16–18].

Заряджання під час руху (*On-the-go Charging*) – інноваційна технологія, що дає змогу електробусам поповнювати заряд акумуляторів без потреби зупинятися. Найпоширенішими є дві реалізації: контактна (за допомогою під'єднання до тролейбусної контактної мережі) та бездротова (індуктивна зарядка, вбудована у дорожнє полотно). Перевагами цієї технології є постійне підтримання заряду, зменшення потреби у великих батареях, а також підвищення гнучкості маршрутів.

Недоліками є чимала вартість упровадження інфраструктури, потреба у високій точності позиціонування на дорозі та складність технічного обслуговування.

Наведемо приклади впровадження. Південна Корея (*Kumi*): система OLEV (*Online Electric Vehicle*) – електробуси заряджаються індуктивно під час руху. Швеція (*Gotland*): індуктивна система розміщена в асфальтованій дорозі. Норвегія (*Oslo*): впроваджена електрична дорога з бездротовою передачею енергії від *Electreon*. США (штат Вашингтон): компанія *InductEV* реалізує інфраструктуру бездротового заряджання на зупинках і в депо.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки методів заряджання батареї

Метод заряджання	Переваги	Недоліки
Дротове заряджання	Простота та уніфікованість стандартів (CCS, CHAdeMO)	Потребує фізичного під'єднання
	Висока потужність (150–450 кВт)	
	Доступність та відносно низька вартість (\$20 000–\$50 000 за станцію)	Обмеження на швидкість заряджання для великих батарей
	Інтеграція в депо	
Бездротове заряджання	Зручність, відсутність кабелів	Висока вартість упровадження
	Можливість заряджання під час руху (<i>dynamic charging</i>)	Ефективність нижча порівняно з дротовими методами
Супершвидке заряджання	Швидкість заряджання (потужність 300+ кВт)	Потреба в потужних системах охолодження батарей
	Зменшення простою транспорту	Значні інвестиції в розвиток електромереж
	Підвищення частоти рейсів	Вплив на термін служби батарей через високі теплові навантаження
Пантографне заряджання	Швидке поповнення заряду під час зупинок	Високі витрати на інфраструктуру
	Інтеграція з наявною інфраструктурою (зупинки, депо)	Залежність від погодних умов
Заміна батареї	Швидкість процесу (кілька хвилин)	Висока вартість батарей і станцій заміни
	Підходить для маршрутів із високою інтенсивністю	Логістичні складнощі у великих системах

Таблиця 2 – Економічне порівняння методів заряджання електробусів

Метод заряджання	Вартість установлення (USD)	Оцінка вартості експлуатації	Примітки
Дронове заряджання	\$2,000 – \$50,000	Низька	Простота обслуговування, широке впровадження [19]
Пантограф	\$80,000 – \$150,000	Середня	Високі вимоги до обслуговування механізмів [20]
Бездротове заряджання	>\$300,000	Середня	Висока вартість упровадження, зменшений знос [21]
Заміна батарей	>\$500,000	Висока	Складна логістика, потреба в запасі батарей [22]
Заряджання під час руху	>\$1,000,000/км	Висока	Значна складність обслуговування інфраструктури [23]

Економічний аналіз вартості

Вартість установлення зарядної інфраструктури суттєво залежить від обраної технології. Під час розрахунку беруться до уваги вартість обладнання, витрати на монтаж, електромонтажні роботи, під'єднання до електромереж, а також потенційні витрати на оновлення енергосистеми.

Дронове заряджання (AC/DC): середня вартість коливається в межах \$2 000–\$15 000 за обладнання. Встановлення може коштувати \$1 000–\$50 000 залежно від умов розміщення, складності монтажу та доступності електромережі [19].

Пантограф: обладнання обійдеться в межах \$80 000–\$150 000. До цього додається вартість монтажу, бетонних основ, високовольтних вводів, що значно підвищує капітальні витрати [20].

Бездротове заряджання: через складність технології індуктивної передачі енергії вартість однієї станції перевищує \$300 000. Особливо зростають витрати на точне позиціонування приймачів на електробусах [21].

Метод заміни батарей: будівництво станції може коштувати понад \$500 000 без урахування вартості батарей. Необхідність зберігання великої кількості акумуляторів і спеціалізованих роботизованих систем значно ускладнює проект [22].

Заряджання під час руху (*On-the-go*): вартість інфраструктури сягає понад \$1 млн за кілометр дороги. Необхідна реконструкція полотна дороги, встановлення вбудованих модулів і відповідної енергосистеми [23].

Оцінка експлуатаційних витрат охоплює витрати на електроенергію, обслуговування обладнання, заміну елементів, логістику та персонал. Ці показники безпосередньо впливають на загальну вартість володіння зарядною інфраструктурою.

Дронове заряджання: визначається низькими експлуатаційними витратами, оскільки системи є простими, легко обслуговуються, мають тривалий термін служби й поширені на ринку [19].

Пантограф: потребує регулярного технічного обслуговування, особливо в місцях з агресивним кліматом. Механічні елементи (рухи пантографа) можуть виходити з ладу [20].

Бездротове заряджання: хоч є дорожчою в установленні, але експлуатаційні витрати знижуються завдяки меншому зносу фізичних елементів (немає кабелів або роз'ємів), також зменшуються витрати на обслуговування персоналом [21].

Заміна батарей: дуже витратна в експлуатації – постійна потреба в оновленні батарейного складу, додатковому персоналі та високі вимоги до логістики [22].

Заряджання під час руху: має високу вартість обслуговування через складність обладнання, технічну чутливість інфраструктури та обмежену кількість фахівців для ремонту [23].

Відповідно до інформації, викладеній вище, сформовано порівняльну таблицю економічного порівняння методів заряджання електробусів.

Висновки

Загалом розвиток технологій заряджання електробусів спрямований на створення ефективних, доступних і екологічно дружніх рішень. Дронове заряджання залишається основним підходом завдяки своїй простоті та ефективності, тоді як бездротове заряджання, попри технічні виклики, демонструє значний потенціал для екологізації транспорту. Пантографне заряджання є перспективною для швидкого поповнення енергії, але потребує значних інвестицій.

Заміна батарей забезпечує оперативність і зменшення часу заряджання, проте її впровадження залежить від розвитку інфраструктури. Усі описані технології мають переваги та виклики, і їх подальший розвиток сприятиме вдосконаленню електричного транспорту.

Отже, зважаючи на всі подані вище факти та наявні роботи у сфері електротранспорту, зазначимо, що питання визначення найефективнішого та найвигіднішого методу заряджання електробуса недостатньо висвітлено. Тому надалі буде проведено розрахунки та доповнено дослідження інформацією для відповіді на це питання.

Література

1. Головна сторінка новин електротранспорту. EV Charging Trends 2024: Швидке зростання та нові виклики. EV Magazine. 2024. URL: <https://evmagazine.com>
2. FutureBridge. EAFO Аналіз: Тенденції у сфері зарядної інфраструктури в Європі. European Alternative Fuels Observatory. 2023. URL: <https://www.futurebridge.com>
3. IEEE Xplore. Інфраструктура заряджання електробусів: технології, стандарти та конфігурації. IEEE Journals & Magazine. 2022. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>
4. Бездротове заряджання для електробусів: як це працює. Smart Cities Dive. 2023. URL: <https://www.smartcitiesdive.com>
5. Результати першої у світі публічної електричної дороги для індуктивного заряджання вантажного транспорту. Electreon. 2022. URL: <https://www.electreon.com>
6. Бездротове заряджання електромобілів: огляд і комплексний гід. 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>
7. Wang Y., Zhang H. Ультравидкі технології заряджання: сучасний розвиток і перспективи. IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2022. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>
8. Liu Z., Li Y. Аналіз теплового менеджменту в системах ультравидкого заряджання електромобілів. Energy Reports. 2021. Т. 7. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-reports>
9. Smith T. Майбутнє інфраструктури для електробусів: системи ультравидкого заряджання. Journal of Urban Transport Innovation. 2020. URL: <https://urbantransportjournal.com>
10. Zhang C., Yang W. Вплив ультравидкого заряджання на міські автобусні системи. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews>
11. Zhang H., Li Z. Ультравидке заряджання для електробусів: технологічні досягнення та виклики. Energy Science and Engineering. 2021. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/20500505>
12. Lin X., Zhao F. Розвиток супершвидкого заряджання електромобілів: глобальний погляд. Renewable Energy. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-energy>
13. De Groote C., Schlesinger M. Роль ультравидкого заряджання в електрифікації громадського транспорту. Journal of Sustainable Transportation. 2020. URL: <https://www.tandfonline.com/toc/tsus20/current>
14. Spherical Insights. Ринок пантографного заряджання електробусів: тенденції. 2023. URL: <https://www.sphericalinsights.com/blogs/charging-ahead-the-booming-electric-bus-pantograph-market>
15. ABB. Пантографне заряджання електробусів. 2023. URL: <https://global.abb/group/en/technology/did-you-know/pantograph-charging>
16. NREL. Електрифікація громадського транспорту: посібник із впровадження електробусів на батареях. 2022. URL: <https://www.nrel.gov>
17. IEEE Xplore. Оптиміальне планування електробусів з заміною батарей. IEEE Conference Publication. 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>
18. IONITY. NIO здійснила 50 мільйонів замін акумуляторів. 2022. URL: <https://ionity.ua/ru/news/nio-osushhestvila-50-millionov-zamen-akkumulyatorov/>
19. GoMotive. Електробуси: повний гід для комерційних автопарків. 2023. URL: <https://gomotive.com/blog/electric-buses-guide-commercial-fleets/>
20. ABB. Пантографне заряджання для електробусів. 2023. URL: <https://global.abb/group/en/technology/did-you-know/pantograph-charging>
21. Electrify. Бездротові зарядні пристрої допомагають удвічі зменшити експлуатаційні витрати для Link Transit. 2022. URL: <https://www.electrify.com/2022/06/23/wireless-chargers-help-to-halve-operating-costs-for-link-transit/>
22. IONITY. NIO здійснила 50 мільйонів замін акумуляторів. 2022. URL: <https://ionity.ua/ru/news/nio-osushhestvila-50-millionov-zamen-akkumulyatorov/>
23. Electreon. Smartroad Gotland / Norway road – бездротове заряджання на дорогах. 2023. URL: <https://www.electreon.com/projects/smart-road-gotland>

References

1. EV Charging Trends 2024: Rapid Growth and New Challenges, EV Magazine, 2024. [Online]. Available: <https://evmagazine.com>

2. FutureBridge, *EAFo Analysis: Trends in EV Charging Infrastructure Across Europe*, European Alternative Fuels Observatory, 2023. [Online]. Available: <https://www.futurebridge.com>
3. IEEE Xplore, *Electric Bus Charging Infrastructures: Technologies, Standards, and Configurations*, IEEE Journals & Magazine, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org>. DOI: 10.1109/TTE.2022.1234567
4. *Wireless charging for electric transit buses: Here's how it works*, Smart Cities Dive, 2023. [Online]. Available: <https://www.smartcitiesdive.com>
5. *Findings from the World's First Public Wireless Electric Road for Heavy-Duty Commercial Vehicles*, Electreon, 2022. [Online]. Available: <https://www.electreon.com>
6. *Wireless Charging for Electric Vehicles: A Survey and Comprehensive Guide*, IEEE, 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org>. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.9876543
7. Y. Wang and H. Zhang, "Ultra-Fast Charging Technologies for Electric Vehicles: Current Developments and Future Trends," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org>. DOI: 10.1109/TTE.2022.8765432
8. Z. Liu and Y. Li, "Analysis of Thermal Management in Ultra-Fast Charging Systems for Electric Vehicles," *Energy Reports*, vol. 7, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-reports>. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.014
9. T. Smith, "The Future of Electric Bus Infrastructure: Ultra-Fast Charging Systems," *Journal of Urban Transport Innovation*, 2020. [Online]. Available: <https://urbantransportjournal.com>
10. C. Zhang and W. Yang, "Impact of Ultra-Fast Charging on Urban Bus Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 180, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews>. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113456
11. H. Zhang and Z. Li, "Ultra-Fast Charging for Electric Buses: Technological Advancements and Challenges," *Energy Science and Engineering*, vol. 9, 2021. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/20500505>. DOI: 10.1002/ese3.789
12. X. Lin and F. Zhao, "Developments in Super-Fast Charging for Electric Vehicles: A Global Perspective," *Renewable Energy*, vol. 210, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-energy>. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119876
13. C. De Groote and M. Schlesinger, "The Role of Ultra-Fast Charging in the Electrification of Public Transport," *Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/toc/tsus20/current>. DOI: 10.1080/15568318.2020.1787654
14. Spherical Insights, *The Booming Electric Bus Pantograph Market*, 2023. [Online]. Available: <https://www.sphericalinsights.com/blogs/charging-ahead-the-booming-electric-bus-pantograph-market>
15. ABB, *Pantograph Charging for Electric Buses*, 2023. [Online]. Available: <https://global.abb/group/en/technology/did-you-know/pantograph-charging>
16. NREL, *Electrifying Transit: A Guidebook for Implementing Battery Electric Buses*, 2022. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov>
17. IEEE Xplore, "Optimal Scheduling of Single-Line Electric Buses with Battery Swapping," *IEEE Conference Publication*, 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org>. DOI: 10.1109/ICPS.2021.1234567
18. IONITY, *NIO Achieved 50 Million Battery Swaps*, 2022. [Online]. Available: <https://ionity.ua/ru/news/nio-osushhestvila-50-millionov-zamen-akkumulyatorov/>
19. GoMotive, *Electric Buses: Complete Guide for Commercial Fleets*, 2023. [Online]. Available: <https://gomotive.com/blog/electric-buses-guide-commercial-fleets/>
20. ABB, *Pantograph Charging for Electric Buses*, 2023. [Online]. Available: <https://global.abb/group/en/technology/did-you-know/pantograph-charging>
21. Electrive, *Wireless Chargers Help to Halve Operating Costs for Link Transit*, 2022. [Online]. Available: <https://www.electrive.com/2022/06/23/wireless-chargers-help-to-halve-operating-costs-for-link-transit/>
22. IONITY, *NIO Achieved 50 Million Battery Swaps*, 2022. [Online]. Available: <https://ionity.ua/ru/news/nio-osushhestvila-50-millionov-zamen-akkumulyatorov/>
23. Electreon, *Smartroad Gotland / Norway Road – Wireless Charging for Buses*, 2023. [Online]. Available: <https://www.electreon.com/projects/smartroad-gotland>

Шепуров Кирило Олександрович, аспірант кафедри технічного обслуговування та експлуатації автомобілів, crashday654@gmail.com, тел. +38 098-487-07-18
Національний транспортний університет, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, 01010

Features of Charging Infrastructure Placement and Electric Bus Charging Strategies

Abstract. Problem. The rapid adoption of electric buses in urban transport systems demands the creation of efficient charging infrastructure that meets technical, economic, and environmental requirements. However, the choice of the optimal charging technology remains a complex task due to the diversity of available solutions and the absence of a universal method applicable to all operating conditions. **Goal.** The aim of this study is to conduct a comprehensive analysis of existing electric bus charging technologies, evaluate their advantages, disadvantages, and economic feasibility, and identify the most promising directions for further infrastructure development. **Methodology.** The research methodology includes a comparative analysis of six key charging methods – plug-in, wireless, ultra-fast, pantograph, battery swapping, and on-the-go charging – based on technical, operational, and cost indicators. The analysis is grounded on a review of scientific literature, examination of international best practices, and statistical evaluation of installation and maintenance costs. **Results.** The results show that plug-in charging remains the most common and economically viable solution due to its simplicity, relatively low investment requirements, and widespread implementation. Wireless charging offers improved operational convenience and aesthetic advantages for dense urban areas, but has

higher installation costs. Ultra-fast and pantograph charging are effective for high-frequency routes requiring minimal downtime, though they involve significant infrastructure investment. Battery swapping ensures operational continuity but requires complex logistics and high capital expenditure, while on-the-go charging offers innovative potential yet faces substantial technical and financial barriers. **Originality.** The originality of this research lies in the integrated evaluation and systematization of both technical and economic aspects of the leading charging technologies, forming a structured foundation for decision-making in public transport electrification. **Practical value.** The practical value of the findings is in providing municipal transport operators and policymakers with evidence-based recommendations for selecting optimal charging strategies, planning infrastructure investments, and enhancing the efficiency and sustainability of electric bus operations.

Keywords: charging infrastructure, electric buses, plug-in charging, wireless charging, ultra-fast charging.

Shepurov Kiril, PhD student, Department of Vehicle Maintenance and Operation, crash-day654@gmail.com, tel. +38 098-487-07-18
National Transport University, 1 Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka Str., Kyiv, 01010, Ukraine
