

Просторове планування мережі зарядних хабів для важких електричних вантажівок та перспективи її використання в логістиці Збройних Сил України

Spatial Planning of a Charging Hub Network for Heavy Electric Trucks and Prospects for Its Use in the Logistics of the Armed Forces of Ukraine

Олександр Горошко

Corresponding author: ад'юнкт науково-організаційного відділу, e-mail: goroshko22222@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5695-5311>

Володимир Завальнюк

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фундаментальних наук, e-mail: vzavalnyuk@onu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5695-5311>

Oleksandr Goroshko

Corresponding author: associate of the scientific and organizational department, e-mail: goroshko22222@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5695-5311>

Volodymyr Zavalniuk

PhD in Physics and Mathematics, e-mail: vzavalnyuk@onu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3193-9569>

Військова академія, м. Одеса, Україна

Military Academy, Odesa, Ukraine

Received: June 9, 2026 | Revised: June 21, 2026 | Accepted: June 30, 2026

УДК 629.331, 355.41, 621.331

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.22>

Мета роботи. Розроблення науково обґрунтованих підходів до просторового планування мережі зарядних хабів для важких електричних вантажівок в Україні на основі математичного моделювання транспортної мережі та визначення перспектив їх використання в логістиці Збройних Сил України.

Метод дослідження. Використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів: системний аналіз, аналіз і синтез, контент-аналіз, порівняльний аналіз, математичне моделювання, методи теорії графів, оптимізаційне моделювання, лінійне програмування та розрахунково-аналітичні методи. Для оптимізації розміщення зарядних хабів застосовано графову модель транспортної мережі України та програмну бібліотеку PuLP.

Результати дослідження. Побудовано граф основних транспортних шляхів України, визначено вузлові логістичні центри, сформовано модель оптимального розміщення зарядних хабів з урахуванням запасу ходу важких електричних вантажівок, характеристик зарядних систем CCS2 і MCS та нормативних вимог щодо режимів праці й відпочинку водіїв. Обґрунтовано перспективи інтеграції електричних вантажівок у систему тилового забезпечення Збройних Сил України.

Практична цінність дослідження. Запропоновані підходи можуть бути використані під час планування національної мережі зарядної інфраструктури, розвитку транспортної логістики та модернізації системи логістичного забезпечення Збройних Сил України.

Цінність дослідження. Розроблено адаптований до умов України науково-методичний підхід до просторового планування зарядної інфраструктури для важких електричних вантажівок, який поєднує транспортне моделювання, оптимізаційні методи та потреби військової логістики.

Тип статті. Емпірична.

Purpose. To develop scientifically grounded approaches to the spatial planning of a network of charging hubs for heavy-duty electric trucks in Ukraine based on mathematical modelling of the transport network and to determine the prospects for their application in the logistics support system of the Armed Forces of Ukraine.

Method. The study employed a combination of general scientific and specialized methods, including systems analysis, analysis and synthesis, content analysis, comparative analysis, mathematical modelling, graph theory methods, optimization modelling, linear programming, and computational-analytical methods. A graph-based model of Ukraine's transport network and the PuLP software library were used to optimize the placement of charging hubs.

Findings. A graph of Ukraine's main transport corridors was constructed, key logistics hubs were identified, and a model for the optimal placement of charging hubs was developed, taking into account the driving range of heavy-duty electric trucks, the technical characteristics of CCS2 and Megawatt Charging System (MCS) charging technologies, and regulatory requirements governing drivers' working and rest periods. The study substantiates the prospects for integrating heavy-duty electric trucks into the logistics support system of the Armed Forces of Ukraine.

Practical implications. The proposed approaches can be applied to the planning of a national charging infrastructure network, the development of transport logistics, and the modernization of the logistics support system of the Armed Forces of Ukraine.

Value. The study develops a scientific and methodological approach, adapted to the conditions of Ukraine, for the spatial planning of charging infrastructure for heavy-duty electric trucks by integrating transport modelling, optimization methods, and the requirements of military logistics.

Paper type. Empirical research article.

Ключові слова. електрична вантажівка, зарядна інфраструктура, BEV, MCS, CCS2, Li-ion батареї, ЗСУ, логістика, граф транспортної мережі.

Key words. Electric Truck, Charging Infrastructure, BEV, MCS, CCS2, Li-ion Batteries, Armed Forces of Ukraine, Logistics, Transport Network Graph.

Вступ

Автомобільний транспорт є ключовою складовою сучасних логістичних систем, забезпечуючи функціонування національної економіки, міжнародної торгівлі та систем матеріально-технічного забезпечення сектору безпеки й оборони. Водночас саме транспортний сектор залишається одним із найбільших споживачів енергетичних ресурсів і джерел викидів парникових газів, що зумовлює необхідність його технологічної трансформації відповідно до сучасних вимог декарбонізації економіки та енергетичної безпеки [1]. Особливе місце у структурі автомобільних перевезень посідають важкі вантажні автомобілі, які, незважаючи на відносно невелику частку у загальному парку транспортних засобів, характеризуються високим рівнем споживання пального та значними середньорічними пробігами. За даними європейської статистики, станом на 2024 рік у країнах Європейського Союзу експлуатувалося близько 6,2 млн вантажних автомобілів, серед яких понад 2,2 млн становили магістральні тягачі 7–8 класу, що формують основний обсяг міжнародних вантажних перевезень [2]. За інформацією Департаменту енергетики США, річне споживання пального вантажівкою 8-го класу приблизно у двадцять разів перевищує відповідний показник легкового автомобіля [3].

Останніми роками світова транспортна галузь перебуває під впливом двох взаємопов'язаних тенденцій. З одного боку, реалізуються міжнародні програми скорочення викидів парникових газів та досягнення кліматичної нейтральності, що стимулює прискорену електрифікацію автомобільного транспорту. З іншого боку, загострення безпекової ситуації у світі, посилення геополітичної конкуренції та зростання вимог до стійкості логістичних систем обумовлюють необхідність пошуку альтернативних джерел енергозабезпечення транспортної інфраструктури. У цих умовах провідні світові виробники активно розробляють важкі електричні вантажівки нового покоління, технічні характеристики яких дедалі більше наближаються до параметрів традиційних дизельних транспортних засобів [4, 5].

Для України зазначені процеси набувають особливої актуальності внаслідок повномасштабної російської агресії, систематичних атак на паливно-енергетичну інфраструктуру, порушення традиційних логістичних ланцюгів та стрімкого зростання вартості дизельного пального. Введення поетапного підвищення ставок акцизного податку відповідно до вимог законодавства Європейського Союзу також об'єктивно сприятиме подальшому збільшенню вартості традиційних видів моторного пального [20, 21]. За таких умов електрифікація важкого автомобільного транспорту поступово переходить із площини екологічної політики до сфери економічної доцільності та стратегічного планування розвитку державної логістики.

Окремого значення ця проблема набуває для логістичного забезпечення Збройних Сил України. Хоча застосування електричного приводу для бойових машин у найближчій перспективі залишається обмеженим через вимоги автономності, прохідності та бойової живучості, використання важких електричних вантажівок у системі тилового забезпечення, міжбазових перевезень, транспортування матеріально-технічних засобів і забезпечення функціонування військової інфраструктури вже сьогодні розглядається як перспективний напрям підвищення енергетичної незалежності військової логістики [6]. Додатковою перевагою є можливість використання таких транспортних засобів як мобільних накопичувачів електричної енергії для живлення критично важливих об'єктів у районах оперативного тилу.

Водночас широкомасштабне впровадження важких електричних вантажівок безпосередньо залежить від рівня розвитку зарядної інфраструктури. На відміну від легкових електромобілів, вантажний транспорт потребує зарядних комплексів мегаватного класу, здатних забезпечити відновлення значної частини запасу ходу протягом нормативної 45-хвилинної перерви водія. Саме тому одним із найважливіших завдань є науково обґрунтоване просторове планування мережі зарядних хабів із урахуванням конфігурації транспортної

мережі, інтенсивності вантажних потоків, технічних характеристик електричних вантажівок та вимог чинного законодавства щодо режимів праці й відпочинку водіїв [27].

Незважаючи на значну кількість сучасних досліджень, присвячених розвитку електричного транспорту та зарядної інфраструктури, більшість із них орієнтована на цивільний сектор економіки розвинених держав і практично не враховує специфіку транспортної системи України, особливості її просторової структури, воєнні ризики та перспективи використання важких електричних вантажівок у логістиці сектору безпеки й оборони. Це визначає актуальність проведення комплексного дослідження, спрямованого на оптимізацію просторового розміщення зарядних хабів для важких електричних вантажівок та оцінювання можливостей їх інтеграції у систему логістичного забезпечення Збройних Сил України.

Мета дослідження. Розробити науково обґрунтовані підходи до просторового планування мережі зарядних хабів для важких електричних вантажівок в Україні на основі математичного моделювання транспортної мережі, оцінити ефективність використання зарядної інфраструктури стандартів CCS2 та Megawatt Charging System (MCS), а також визначити перспективи інтеграції важких електричних вантажівок у систему логістичного забезпечення Збройних Сил України з урахуванням сучасних технічних, економічних та нормативних умов.

Огляд літератури

Проблематика електрифікації важкого автомобільного транспорту останніми роками стала одним із найдинамічніших напрямів досліджень у сфері транспортної логістики, енергетики та сталого розвитку. Аналіз сучасних наукових праць свідчить, що основна увага дослідників зосереджується на чотирьох взаємопов'язаних напрямках: оцінюванні екологічної та економічної ефективності електричних вантажних транспортних засобів; дослідженні процесів розвитку зарядної інфраструктури; удосконаленні математичних моделей просторового розміщення зарядних станцій; а також визначенні перспектив використання електричних вантажівок у транспортно-логістичних системах різного призначення.

Перший напрям охоплює дослідження, присвячені оцінюванню ролі електричного транспорту у процесах декарбонізації економіки. У роботі [1] здійснено комплексний аналіз розвитку електромобільності у світі та в Україні, визначено екологічні й економічні переваги електричних транспортних засобів, а також оцінено їхній вуглецевий слід протягом життєвого циклу. Автори обґрунтовують, що досягнення очікуваного екологічного ефекту можливе лише за умови комплексного розвитку відновлюваної енергетики, зарядної інфраструктури та узгодженої державної політики підтримки електромобільності. Таким чином, електрифікація транспорту розглядається як складова ширших процесів енергетичної трансформації, а не як ізольований технологічний проєкт.

Другий напрям досліджень стосується економічної ефективності використання важких електричних вантажівок. У роботі [7] на основі метапрогнозування понад двохсот наукових джерел встановлено, що швидке зниження вартості акумуляторних технологій та розвиток паливних елементів поступово забезпечують конкурентоспроможність транспортних засобів із нульовими викидами порівняно з традиційними дизельними автомобілями. Автори прогнозують, що після 2035 року економічні переваги електричних вантажівок суттєво посиляться, що створить передумови для їх масового впровадження у сфері магістральних вантажних перевезень. Отже, сучасні дослідження дедалі більше підтверджують, що головним бар'єром розвитку електричного вантажного транспорту стає не стільки вартість самих транспортних засобів, скільки недостатній рівень розвитку зарядної інфраструктури.

Окремий блок досліджень присвячено розвитку зарядної інфраструктури. У працях [8, 9] доведено, що економічна ефективність експлуатації електричних вантажівок визначається не лише характеристиками транспортних засобів, а й параметрами зарядної мережі,

режимами заряджання та просторовою структурою транспортних потоків. Автори показують, що оптимальне поєднання зарядних станцій у депо та публічних швидкісних зарядних комплексів дозволяє знизити загальні експлуатаційні витрати логістичних компаній навіть за умови значних початкових капіталовкладень. Особливу увагу приділено необхідності комплексного планування розвитку зарядної інфраструктури одночасно із процесами оновлення автопарку.

Суттєвий внесок у розвиток теоретичних засад просторового планування зарядних мереж зроблено в роботах [10–12]. У дослідженні [10] розвиток зарядної інфраструктури розглядається як динамічна система зі зворотними зв'язками між темпами поширення електромобілів та інвестиціями у створення зарядних станцій. Автори відзначають поступовий перехід від статичних моделей розміщення зарядних станцій до адаптивних моделей, які враховують часову зміну попиту, поведінку користувачів та розвиток транспортної системи. Аналогічної позиції дотримуються автори роботи [11], які обґрунтовують необхідність інтегрованого планування місць розташування станцій, їхньої потужності та поетапного розширення зарядної мережі відповідно до темпів електрифікації транспортного сектору. Водночас результати узагальнюючого огляду [12] підтверджують, що визначальними чинниками ефективності зарядної інфраструктури є не лише кількість зарядних станцій, а насамперед оптимальність їх просторового розміщення, характеристики транспортних потоків та рівень розвитку швидкісного заряджання.

Практичні аспекти інтеграції зарядної інфраструктури до логістичних систем досліджено у роботі [13], де запропоновано кластерний підхід до одночасної оптимізації транспортної та зарядної мереж. На прикладі транспортної системи Непалу автори показали можливість скорочення логістичних витрат більш ніж на третину та істотного зменшення транспортних викидів завдяки раціональному просторовому розміщенню зарядних комплексів. Отримані результати підтверджують доцільність застосування математичних методів оптимізації під час проектування зарядної інфраструктури для важкого електричного транспорту.

Певну увагу дослідники приділяють і перспективам використання електричних вантажівок у секторі безпеки й оборони. Зокрема, у роботі [6] обґрунтовано можливість застосування електричних вантажних автомобілів у процесі підготовки водіїв для військових потреб та визначено їх переваги щодо зниження експлуатаційних витрат, відповідності екологічним вимогам і перспектив інтеграції до євроатлантичних стандартів розвитку оборонного сектору. Разом із тим зазначене дослідження зосереджується переважно на питаннях професійної підготовки персоналу й практично не розглядає проблематику формування просторової мережі зарядної інфраструктури для забезпечення військової логістики.

Проведений аналіз літератури свідчить, що сучасні дослідження достатньо ґрунтовно висвітлюють технічні характеристики важких електричних вантажівок, економічні аспекти їх експлуатації та загальні принципи розвитку зарядної інфраструктури. Водночас практично відсутні роботи, у яких просторове планування мережі зарядних хабів здійснюється з одночасним урахуванням конфігурації транспортної мережі України, нормативних обмежень щодо режимів праці та відпочинку водіїв, характеристик сучасних мегаватних зарядних систем (MCS) і перспектив використання важких електричних вантажівок у логістиці Збройних Сил України. Недостатньо дослідженими залишаються також питання визначення оптимальної кількості зарядних хабів, їхнього географічного розташування та оцінювання можливостей інтеграції цивільної й військової логістичної інфраструктури. Саме усунення зазначених наукових прогалин визначає зміст і логіку цього дослідження.

Методологія дослідження

Методологічну основу дослідження становить комплекс взаємопов'язаних загальнонаукових і спеціальних методів, що забезпечують системний аналіз можливостей впровадження важких

електричних вантажівок у міжміські вантажні перевезення України та логістичне забезпечення Збройних Сил України. Побудова методології ґрунтується на поєднанні системного підходу, математичного моделювання, методів теорії графів, оптимізаційного моделювання та порівняльного аналізу технічних характеристик сучасних транспортних засобів. Такий комплексний підхід дозволив врахувати одночасно технічні, економічні, просторові та нормативні чинники розвитку зарядної інфраструктури.

На першому етапі дослідження застосовано аналіз, синтез та контент-аналіз наукової літератури, нормативно-правових актів і технічної документації виробників електричних вантажівок. Це дозволило узагальнити сучасні тенденції розвитку електрифікації вантажного транспорту, визначити ключові фактори, що впливають на ефективність експлуатації важких електричних транспортних засобів, а також сформувати інформаційну базу дослідження. Для порівняльного аналізу були використані технічні характеристики серійних моделей Scania Battery Electric Truck, Volvo FH Aero Electric (Extended Range) та Mercedes-Benz eActros 600, які представляють сучасний рівень розвитку важкого електричного транспорту та відрізняються конструкцією акумуляторних систем, запасом ходу й підтримуваними стандартами заряджання [22–24].

Другий етап передбачав розрахунково-аналітичне моделювання енергоспоживання важких електричних вантажівок під час міжміських перевезень. Базове споживання електроенергії визначалося як добуток довжини маршруту на питомі витрати електроенергії транспортного засобу. Для наближення результатів до реальних умов експлуатації запропоновано використовувати коефіцієнт експлуатаційного резерву, який узагальнює вплив кліматичних умов, профілю дороги, роботи допоміжних систем, деградації акумуляторної батареї та інших експлуатаційних факторів. Додатково враховано допустиме SOC-вікно використання акумуляторної батареї залежно від її хімічного складу, що дозволило визначити ефективний запас ходу транспортного засобу та максимальну відстань між двома послідовними зарядними пунктами.

На третьому етапі застосовано методи теорії графів для моделювання транспортної мережі України. Вершинами графа визначено основні логістичні центри та великі міста, а ребрами — міжнародні й регіональні автомобільні дороги, що забезпечують основні вантажні потоки. На основі карти транспортних шляхів сформовано матрицю найкоротших відстаней між усіма вузлами мережі, що стала основою подальших оптимізаційних розрахунків. Використання графового представлення транспортної системи дозволило визначити вузлові міста з найбільшою кількістю транспортних зв'язків, які потенційно можуть виконувати функції зарядних логістичних хабів.

Четвертий етап дослідження базувався на застосуванні методів математичної оптимізації та лінійного програмування. Цільову функцію сформовано як задачу мінімізації кількості зарядних хабів за умови забезпечення можливості проходження будь-якого маршруту між вузлами транспортної мережі із використанням лише нормативних зупинок водія для заряджання транспортного засобу. Як обмеження моделі використовувалися ефективний запас ходу електричних вантажівок, характеристики зарядних станцій стандартів CCS2 і Megawatt Charging System (MCS), а також вимоги Положення про робочий час і час відпочинку водіїв, затвердженого наказом Міністерства транспорту та зв'язку України № 340, гармонізованого з європейським законодавством [27]. Для чисельного розв'язання задачі оптимізації використано програмну бібліотеку PuLP мовою Python.

На п'ятому етапі проведено порівняльний аналіз двох варіантів розвитку зарядної інфраструктури: використання зарядних станцій стандарту CCS2 потужністю до 350 кВт та зарядних комплексів мегаватного класу MCS потужністю 750 кВт і більше. Для кожного сценарію визначалися можливий ефективний запас ходу після нормативної перерви водія, необхідна кількість зарядних хабів та їх просторове розташування на території України.

Отримані результати дозволили оцінити вплив потужності зарядної інфраструктури на ефективність функціонування міжміських логістичних маршрутів та перспективи використання важких електричних вантажівок у довгостроковій перспективі.

На завершальному етапі виконано системну інтерпретацію отриманих результатів з позицій цивільної та військової логістики. Оцінювання здійснювалося з урахуванням сучасних викликів функціонування транспортної системи України в умовах воєнного стану, тенденцій розвитку міжнародної транспортної інфраструктури та перспектив інтеграції важких електричних вантажівок до логістичної системи Збройних Сил України. Особливу увагу приділено можливостям поетапного переходу від використання електричного транспорту у тилових міжбазових перевезеннях до його застосування як мобільних накопичувачів електроенергії для підтримки функціонування критичної інфраструктури в оперативному тилу.

Запропонована методологія забезпечує комплексне врахування технічних характеристик сучасних важких електричних вантажівок, параметрів транспортної мережі України, нормативних вимог щодо організації вантажних перевезень і можливостей сучасних зарядних технологій. Це створює науково обґрунтовану основу для визначення оптимальної просторової структури мережі зарядних хабів та оцінювання перспектив їх використання у цивільній і військовій логістиці.

Результати дослідження

Електрифікація автопарку логістичних компаній

В останні роки провідні міжнародні логістичні компанії активно впроваджують електричний транспорт у свої операційні процеси, розглядаючи його як один із ключових інструментів досягнення цілей декарбонізації і зменшення собівартості перевезень. Наразі основними стимулами модернізації транспортних парків були переважно екологічні вимоги та корпоративні зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів, але розвиток технологій акумуляторних систем вже призвів і до суто економічної переваги електричних вантажних автомобілів над їхніми дизельними аналогами.

Серед лідерів цього процесу знаходиться компанія Amazon, одна з найбільших платформ електронної комерції, яка реалізує програму переходу до низьковуглецевої логістики та інвестує у великі парки електричних транспортних засобів для доставки товарів як на маршрутах “останньої милі”, так і на далекомагістральних маршрутах (наприклад, придбання понад 200 Mercedes-Benz eActros 600 для дальніх перевезень у Великобританії та Німеччині [14]).

Європейська логістична компанія DFDS, яка вже мала 125 одиниць Volvo Zero Emission, також нещодавно придбала додаткових 100 електричних вантажівок Volvo. Компанія володіє найбільшим парком електричних вантажівок у галузі, а до 2030 року планує електрифікувати 25% свого парку [15].

Один із провідних операторів у галузі наземних перевезень Європи компанія DB Schenker на початку 2025 року отримала перші десять електричних вантажівок MAN eTGX, плануючи до кінця 2026 року розширити парк електричних вантажівок до 100 одиниць [16].

92 електричні тягачі Freightliner eCascadia транспортної компанії Schneider National (США) подолали біля 5 млн миль лише за 2024 рік, вже тоді продемонструвавши свою економічну доцільність [17].

ASKO, найбільший норвезький постачальник продуктів харчування, замовила 75 вантажних електромобілів Scania після їхньої попередньої практичної оцінки у своєму парку і планує до кінця 2026 року досягти нульового рівня викидів, що вимагатиме електрифікації всього її транспортного парку [18].

Один із найбільших світових морських перевізників, датська логістична компанія Maersk, також прагне до 2030 року скоротити викиди парникових газів усіма видами

транспорту та своїми логістичними центрами, а до 2040 року досягти нульового рівня викидів парникових газів [19].

Динаміка змін цін на дизельне паливо протягом останніх п'яти років

Проаналізуємо тенденції підвищення вартості дизельного пального протягом останніх п'яти років, що були спричинені як макроекономічними чинниками, так і впливом повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну. В кінці 2021 року середня ціна дизельного палива становила 29 грн/л, а з початком повномасштабного вторгнення в 2022 року підвищилась до 37 грн/л [20]. Протягом першої половини 2023 року ціна трохи впала, але пізніше підскочила до 46 грн/л, у 2024 році середня ціна була на рівні 52 грн/л. Початок 2025 приніс подорожчання дизельного палива до 54 грн/л, а наприкінці року ціна виросла до 58 грн. Станом на початок 2026 року ціна піднялася до 62 грн/л. Протягом весни 2026 року ціна підскочила до приблизно 92 грн за літр.

З 01 вересня 2024 року набув чинності Закон України №3878-IX “Про внесення змін до Податкового кодексу України щодо імплементації положень актів права ЄС стосовно акцизного податку” [21]. Документ передбачає поетапне підвищення ставок акцизного податку на пальне у період з 01.09.2024 р. до 31.12.2027 р. з метою їх гармонізації з мінімальними вимогами Європейського Союзу. У зв'язку з цим незалежно від усіх інших факторів ціноутворення почалося поступове зростання вартості пального, зокрема дизельного, внаслідок підвищення акцизної складової. Враховуючи, що підвищення ставки акцизного збору відбуватиметься до кінця 2027 року, ціна на дизельне паливо однозначно продовжить зростати.

Характеристики електричних вантажівок

На сьогоднішній день провідні автовиробники вже пропонують доволі широкі лінійки електричних вантажівок різних класів, а їхні технічні характеристики постійно вдосконалюються. Завдяки розвитку батарейних технологій і вдосконаленню зарядних систем ці автомобілі здатні виконувати тривалі рейси з мінімальними простоями на заряджання, що робить їх ефективною альтернативою дизельним вантажівкам навіть у сегменті міжміських і міжнародних перевезень.

У даній роботі ми орієнтуватимемося на три популярні вантажівки від передових європейських виробників, які на даний момент доступні на комерційному ринку і знаходяться серед лідерів у своєму класі. Вони представляють різні підходи до енергетичної ефективності, потужності та дальності ходу, дозволяючи комплексно оцінити можливості сучасних важких електровантажівок та їхню придатність для логістики в масштабах України.

Таблиця 1: Ключові характеристики деяких BEV вантажівок 8-го класу з великим запасом ходу

Ключові характеристики BEV вантажівок	Scania Battery Electric Truck [22]	Volvo FH Aero Electric (extended range) [23]	Mercedes-Benz eActros 600 [24]
Повна маса спорядженого ТЗ, тонн	42	44	44
Заявлений запас ходу (для 40 тонн), км	до 500	до 700	до 500
Ємність акумулятора, кВт·год	560	780	621
Тип акумулятора	Li-NMC	Li-NMC/Li-NCA	LFP

Джерело: розховано автором.

Зарядна інфраструктура

Розвиток потужної зарядної інфраструктури, необхідної для електричних вантажівок, в Україні відбувається повільніше, ніж у багатьох країнах Європейського Союзу та країнах Північної Америки і Східної Азії, що зумовлено сукупністю економічних, технічних і соціально-політичних факторів.

Важливим стримувальним чинником є висока капіталомісткість будівництва зарядних станцій великої потужності (від 350 кВт до 1 МВт і більше), необхідних для обслуговування електричних вантажівок. Вартість таких станцій значно перевищує витрати на встановлення малопотужних зарядних станцій для легкових електромобілів не лише через вищу вартість обладнання, але й через необхідність додаткових інвестицій у модернізацію електромереж, трансформаторних підстанцій та систем енергозабезпечення (при проектуванні яких високі та нерівномірні навантаження, характерні для мереж швидкісного заряджання вантажного транспорту, не враховувалися).

Додатковим фактором є обмежений попит на електричні вантажівки як через їхню високу стартову вартість, так і через відсутність власне зарядної інфраструктури та державних програм субсидування. Отже невелика кількість BEV вантажівок не створює економічного стимулу для приватних інвесторів інвестувати у розбудову широкої мережі спеціалізованої зарядної інфраструктури.

Окремо слід відзначити наслідки вторгнення російської федерації (яке збіглося в часі з початком активного впровадження BEV вантажівок у розвинутих економіках світу), включно з регулярними ударами по електроенергетичній інфраструктурі, та пов'язані з ними ризики. Цілком не є дивним, що такі умови виявилися вкрай несприятливими для масштабних приватних інвестиційних проектів у сфері електричної мобільності.

Заряджання важких електричних вантажівок навіть на потужних зарядних станціях для легкових BEV чи вантажівок малої тоннажності часто є теоретично можливим, проте є цілком непрактичним: тривалість повного заряджання типової батареї ємністю 560 кВт·год на зарядній станції потужністю 60 кВт (верхні значення потужності для наявних зарядних станцій) триватиме 10–12 год навіть за оптимальних умов. Крім того, більшість таких зарядних станцій взагалі не розраховані на підтримку вантажних автомобілів, включно з усіма зарядними станціям змінного струму.

Компанія Renault Trucks створила і підтримує інтерактивну карту мережі громадських зарядних станцій для електричних вантажівок у Європі [25], яка спрощує планування довгих логістичних маршрутів (зазначається, що даний проект не охоплює всі зарядні станції Європи, покладаючись лише на наявні у мережі Інтернет сайти власників зарядних станцій). Станом на 1 червня 2026 року на карті відображені 280 зарядних хабів, призначених саме для вантажних автомобілів (з них 11 мегаватного класу, 6 з яких розташовані у Німеччині), а також 180 зарядних станцій, сумісних із ними (а також ще більше 200 знаходяться на етапі будівництва, 13 з них мегаватного класу). Деякі із запланованих зарядних хабів пропонують більше 100 зарядних слотів із загальною потужністю у 10 МВт і вище (наприклад, Magna Park і Aral Pulse – Ashford, UK). Даний проект є наочним доказом того, що відставання України від країн Європи, логістика яких також у значній мірі покладається на автомобільний транспорт, наразі не є критичним. А враховуючи розміри України (найдовші маршрути у якій у півтора рази довші за найдовші маршрути у Німеччині чи Франції), відсутність широкої мережі внутрішніх водних шляхів і порівняно низькі ціни на електроенергію (завдяки високій долі АЕС у загальній генерації) важливість розвиненої мережі потужних зарядних станцій у майбутньому виявиться ще більшою, ніж у ЄС.

Ще одним перспективним напрямком, про який варто згадати, хоча він і все ще дуже далекий від широкого впровадження, є технологія динамічної бездротової зарядки (DWC) – безконтактний спосіб заряджання електричних вантажівок протягом руху за допомогою зарядної інфраструктури, вбудованої у певні ділянки доріг [26]. Такий підхід дозволяє не лише скоротити час простою на заряджання, але й зменшити типову ємність тягових акумуляторів, а разом з нею і собівартість автомобіля і його власну масу.

Основні норми щодо робочого часу та відпочинку водіїв в Україні

Відповідно до Положення про робочий час і час відпочинку водіїв [27] колісних транспортних засобів (Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України №340), тривалість керування транспортним засобом чітко регламентується з метою забезпечення безпеки дорожнього руху та збереження працездатності водіїв. Зокрема, максимальний щоденний час керування не повинен перевищувати 9 годин (із можливістю збільшення до 10 годин не більше двох разів на тиждень), при цьому сумарний час керування протягом тижня обмежується 56 годинами, а за два послідовні тижні – 90 годинами. Після кожних 4,5 годин безперервного керування водій зобов'язаний зробити перерву тривалістю не менше 45 хвилин (допускається поділ на 15 і 30 хвилин). Щоденний відпочинок має становити щонайменше 11 годин поспіль (або 9 годин при роботі екіпажем із двох водіїв), а щотижневий безперервний відпочинок – не менше 45 годин. Дотримання цих параметрів є обов'язковим для перевізників і контролюється, зокрема, за допомогою тахографів.

Отже, навіть для далекомагістральних перевезень в Україні, правила швидкості та відпочинку водіїв означають, що ви ніколи не проїдете більше ніж 360 км за одну поїздки (4,5 години водіння з максимальною для вантажівок з причепом швидкістю у 80 км/год). Оптимальним часом для заряджання вантажівки, незалежно від її максимального запасу ходу, є період відпочинку водія.

Графічне моделювання транспортної мережі

Моделювання транспортної мережі України розпочнемо з виділення основних міжнародних і регіональних автомобільних доріг, а також ключових міст, які є основними точками відбуття чи прибуття вантажів і можуть грати роль головних зарядних хабів (рис. 1).

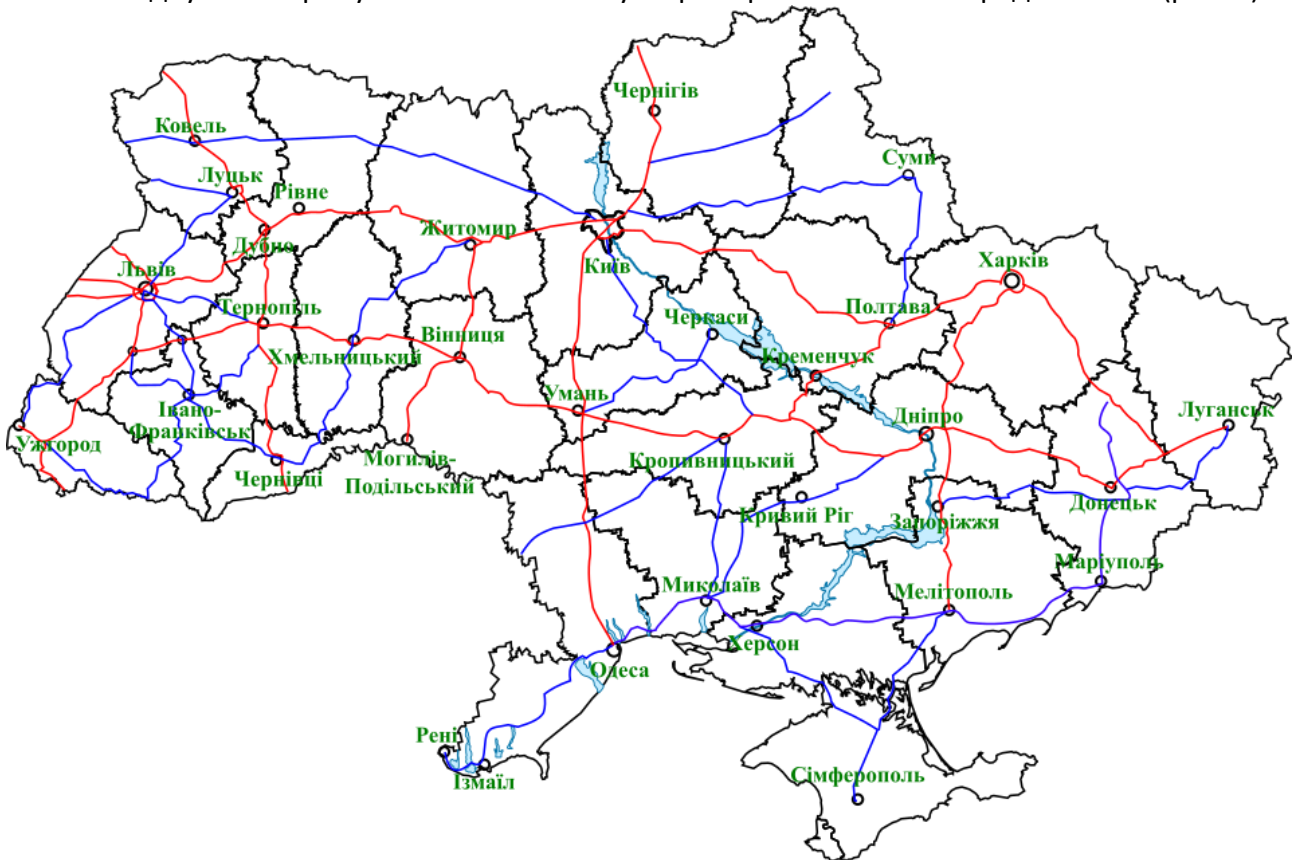


Рисунок 1: Карта основних міжнародних (червоний) і регіональних (синій) транспортних шляхів України

Далі будемо таблицю найкоротших відстаней між всіма обраними містами уздовж обраних транспортних шляхів (таблиця 2).

Таблиця 2: Відстані між деякими містами України

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	25	26
1	Вінниця	–	571	824	128	652	366	271	471	325	996	397	360	499	432	577	732	315	842	606	232	583	160	718	550	120	351
2	Дніпро	571	–	253	624	81	937	481	991	246	425	917	931	333	453	164	753	811	537	338	803	1154	411	213	384	691	291
3	Донецьк	824	253	–	877	227	1190	734	1244	499	172	1170	1184	586	706	417	1006	1064	634	504	1056	1407	664	314	571	944	544
4	Житомир	128	624	877	–	705	431	143	367	453	951	293	402	627	560	480	860	187	970	478	297	648	288	621	678	185	333
5	Запоріжжя	652	81	227	705	–	1018	562	1072	327	399	998	1012	414	534	245	834	892	456	419	884	1235	492	294	393	772	372
6	Ів.-Франківськ	366	937	1190	431	1018	–	574	361	691	1362	287	135	865	798	911	1098	293	1208	909	134	298	526	1052	916	246	717
7	Київ	271	481	734	143	562	574	–	510	319	808	436	545	493	487	337	787	330	836	335	440	791	215	478	544	328	190
8	Кропивницький	471	991	1244	367	1072	361	510	–	796	1318	74	226	970	903	847	1203	180	1313	845	239	474	631	988	1021	351	700
9	Луганськ	325	246	499	453	327	691	319	796	–	671	722	685	174	294	252	594	640	517	426	557	908	165	393	225	445	129
10	Луцьк	996	425	172	951	399	1362	808	1318	671	–	1244	1353	758	878	471	1178	1138	806	520	1228	1579	836	330	743	1116	716
11	Львів	397	917	1170	293	998	287	436	74	722	1244	–	152	896	829	773	1129	106	1239	771	165	400	557	914	947	277	626
12	Миколаїв	360	931	1184	402	1012	135	545	226	685	1353	152	–	859	792	882	1092	215	1202	880	128	248	520	1023	910	240	711
13	Одеса	499	333	586	627	414	865	493	970	174	758	896	859	–	120	426	420	814	343	600	731	1082	339	546	51	619	303
14	Полтава	432	453	706	560	534	798	487	903	294	878	829	792	120	–	546	300	747	463	720	664	1015	272	666	171	552	423
15	Рені	577	164	417	480	245	911	337	847	252	471	773	882	426	546	–	846	667	701	174	777	1128	417	141	477	665	245
16	Рівне	732	753	1006	860	834	1098	787	1203	594	1178	1129	1092	420	300	846	–	1047	763	1020	964	1315	572	966	471	852	723
17	Симферополь	315	811	1064	187	892	293	330	180	640	1138	106	215	814	747	667	1047	–	1157	665	159	463	475	808	865	271	520
18	Суми	842	537	634	970	456	1208	836	1313	517	806	1239	1202	343	463	701	763	1157	–	875	1074	1425	682	750	292	962	646
19	Тернопіль	606	338	504	478	419	909	335	845	426	520	771	880	600	720	174	1020	665	875	–	775	1126	550	190	651	663	419
20	Ужгород	232	803	1056	297	884	134	440	239	557	1228	165	128	731	664	777	964	159	1074	775	–	351	392	918	782	112	583
21	Харків	583	1154	1407	648	1235	298	791	474	908	1579	400	248	1082	1015	1128	1315	463	1425	1126	351	–	743	1269	1133	463	934
22	Херсон	160	411	664	288	492	526	215	631	165	836	557	520	339	272	417	572	475	682	550	392	743	–	558	390	280	191
23	Хмельницький	718	213	314	621	294	1052	478	988	393	330	914	1023	546	666	141	966	808	750	190	918	1269	558	–	597	806	386
24	Черкаси	550	384	571	678	393	916	544	1021	225	743	947	910	51	171	477	471	865	292	651	782	1133	390	597	–	670	354
25	Чернівці	120	691	944	185	772	246	328	351	445	1116	277	240	619	552	665	852	271	962	663	112	463	280	806	670	–	471
26	Чернігів	351	291	544	333	372	717	190	700	129	716	626	711	303	423	245	723	520	646	419	583	934	191	386	354	471	–

Джерело: розховано автором.

Тепер на основі отриманих карти доріг і таблиці відстаней будемо граф основних транспортних шляхів України (рис. 2), на якому далі буде математично розв'язуватися задача оптимізації розташування зарядних хабів. Зрозуміло, що наведений граф не є повним і не враховує всі наявні автомобільні дороги, однак у більшості випадків рух другорядними дорогами з менш якісним покриттям і більшим трафіком чи проїздом через велике число населених пунктів призводить до більших витрат часу й палива / електричної енергії, ніж рух із приблизно сталою швидкістю по дорозі для автомобілів чи автомагістралі (навіть якщо дальність ходу по ній виявиться вищою).

Вже з поверхневого аналізу отриманого графа видно, що деякі міста є вузловими точками, через які проходить декілька різних транспортних артерій (таблиця 3), тобто є кандидатами на розташування зарядних хабів. Окрім того, такі міста, як Ізмаїл, Ковель, Могилів-Подільський, Рені, Ужгород і Чернівці, є важливими хабами для міжнародного трафіку, хоча вони й не виглядають важливими про аналізі лише даного графа.

Також варто відмітити, що Україна є природно розділеною на дві частини річкою Дніпро, всі мости через яку сконцентровані поблизу 6 вузлових міст даного графа, що істотно впливає на характер графа.

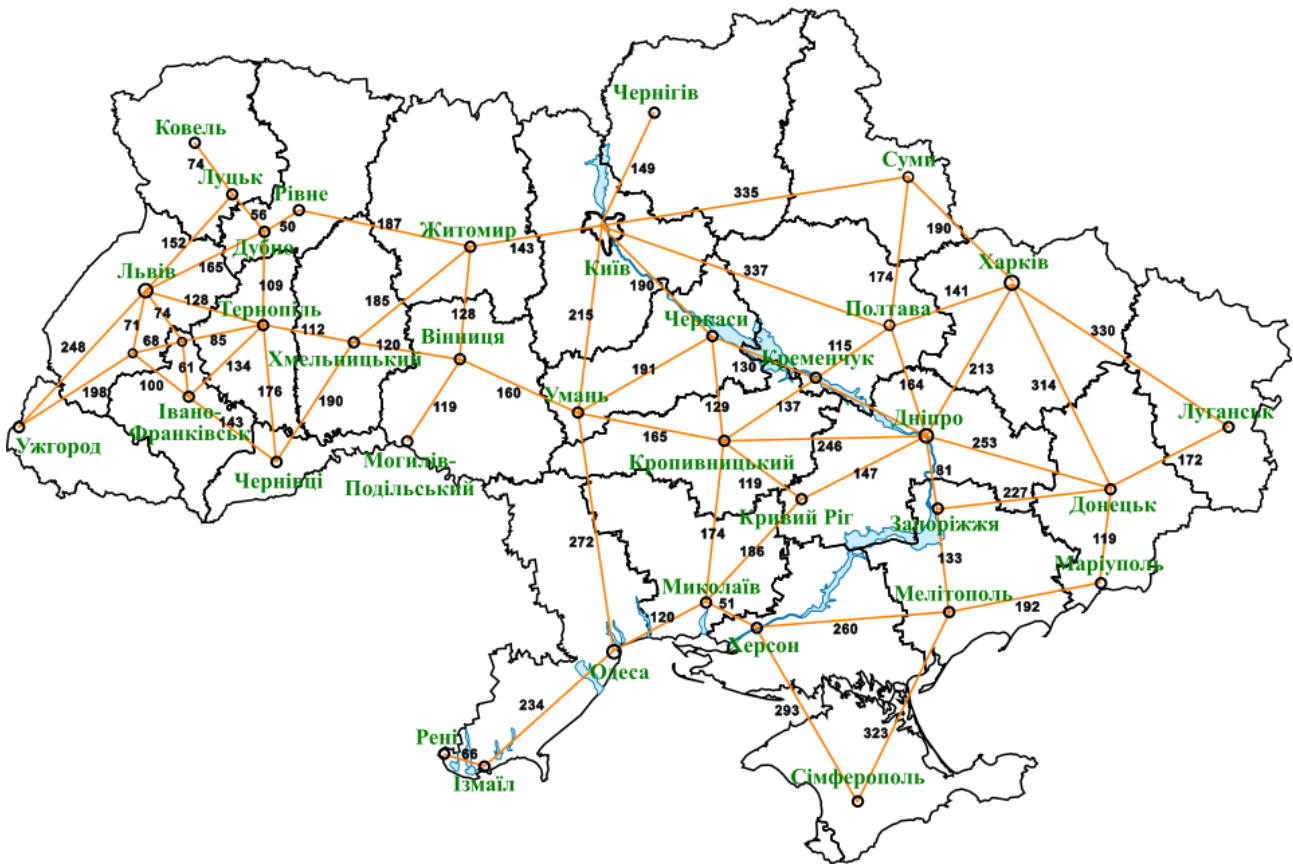


Рисунок 2: Граф основних транспортних шляхів України

Таблиця 3: Перелік вершин графа транспортних шляхів з найбільшими степенями

Степінь вершини (число доріг, що виходять з неї)	Міста
7	Дніпро, Київ
6	Кропивницький, Львів, Тернопіль
5	Донецьк, Полтава, Умань, Харків

Джерело: розховано автором.

Розрахунок енергоспоживання BEV для міжміських перевезень

Базове споживання електроенергії автомобілем із електричним приводом на окремій міжміській ділянці маршруту визначається за співвідношенням:

$$E = D \cdot \varepsilon,$$

де E – спожита електрична енергія, кВт·год;

D – довжина ділянки маршруту, км;

ε – питомі витрати енергії, кВт·год/км.

Питомі витрати енергії транспортного засобу залежать головним чином від швидкості його руху v і повної маси m .

Завдяки ефективній рекуперації енергії при гальмуванні чи русі вниз по схилу маса автомобіля значно менше впливає на питомі витрати енергії у випадку BEV, ніж у випадку

автомобілів з ДВЗ. Головним чином вона впливає лише на силу опору кочення, яка прямо пропорційна масі, але навіть для 40-тонного транспортного засобу на нормальній дорозі не перевищує 3–4 кН.

Швидкість руху транспортного засобу залишається важливою внаслідок дії аеродинамічного опору, який зростає пропорційно квадрату швидкості, стає більшим за силу опору кочення (для 40 т) вже при швидкостях біля 25 км/год і десятикратно перевищує її при швидкостях руху у 75–80 км/год (30–40 кН). Збільшення швидкості до 120 км/год призвело б до додаткового подвоєння сили опору, що робить такі великі швидкості економічно недоцільними навіть без огляду на фактори безпеки руху.

Значення питомих витрат ε , використані у даній роботі, оцінювалися на основі відкритих технічних даних виробників (Scania, Volvo, Mercedes-Benz) і результатів експлуатаційних випробувань серійних BEV-вантажівок повною масою 40 т у магістральному режимі руху зі швидкістю 70–85 км/год. Для BEV першого покоління значення ε становило біля 1,4–1,6 кВт·год/км, але в автомобілях останніх поколінь зменшилося до 1,1–1,2 кВт·год/км завдяки вдосконаленню й підвищенню ефективності електричних систем.

Однак енергія може витрачатися не лише на власне рух автомобіля, але й на кондиціонування чи обігрів кабіни, роботу систем освітлення, холодильних установок тощо. Наприклад, загальна потужність світлодіодних ламп лише у двох основних передніх фарах вантажівки може сягати 100 Вт, а вимоги системи клімат-контролю можуть перевищувати й 1 кВт. Враховуючи, що витрати часу на 100 км маршруту з урахуванням обмеження швидкості становлять біля 1,3 год, одночасна робота обігріву кабіни й зовнішнього освітлення може подвоїти загальний розхід енергії на 100 км пробігу.

З урахуванням цього для хоча б усередненого врахування реальних умов експлуатації автомобіля далі використовується коефіцієнт експлуатаційного резерву k , який узагальнює вплив роботи різноманітних допоміжних систем (в тому числі й підігріву батареї взимку), деградації акумуляторної батареї протягом життєвого циклу, метеорологічних умов (наприклад, зустрічного вітру), а також поздовжнього профілю дороги, перепадів висот та частоті зміни швидкості автомобіля внаслідок особливостей умов руху. При русі порівняно нового автомобіля по міжміській трасі за нормальних погодних умов $k \in [1,10; 1,20]$, але при сильних морозах чи за аномально високих температур значення k може сягати 2 і більше.

Остаточна формула для скоригованого енергоспоживання BEV набуває вигляду

$$E_{\text{corrected}} = D \cdot \varepsilon \cdot k.$$

З метою збереження ресурсу акумуляторної батареї та підтримання високої зарядної потужності у роботі зазвичай використовується SOC-вікно 20–80% (для Li-NMC батарей), у граничних випадках – до 85%. Такий вибір вікна SOC пов'язаний із тим, що при сильному розряджанні батареї її зношення посилюється, а швидкість заряджання різко знижуються при наближенні значення SOC до 100%.

Отже доступна для використання енергія батареї дорівнює

$$E_{\text{effective}} = C_{\text{bat}} \cdot (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}) = C_{\text{bat}} \cdot \Delta \text{SOC},$$

де C_{bat} – номінальна ємність батареї, кВт·год;

$$\Delta \text{SOC} = \text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}.$$

Максимально допустиму відстань між двома послідовними заряджаннями батареї визначаємо з рівняння $E_{\text{effective}} = E_{\text{corrected}}$:

$$D_{\text{max}} = \frac{E_{\text{effective}}}{\varepsilon \cdot k} = \frac{C_{\text{bat}} \cdot \Delta \text{SOC}}{\varepsilon \cdot k}.$$

Останнє співвідношення є ключовим у просторовому плануванні зарядної інфраструктури на міжміських транспортних коридорах.

Максимальна енергія, яку необхідно відновити протягом зупинки, також дорівнює $E_{\text{effective}}$, тобто максимальна потрібна тривалість заряджання за нормальних умов (температури і стану зношеності батареї) становитиме

$$t_{\text{charging}} = \frac{E_{\text{effective}}}{P_{\text{charging}} \cdot \eta}.$$

де P_{charging} – номінальна потужність зарядної станції (350 кВт для CCS2 або 750 кВт для MCS);

η – коефіцієнт ефективності заряджання (0,9–0,95).

Процес заряджання будемо вважати оптимально інтегрованим у логістику перевезень за умови, що

$$t_{\text{charging}} \leq t_{\text{break}},$$

де t_{break} – регламентована перерва водія (45 хв – коротка перерва або до 11 год – нічний відпочинок відповідно до Наказу №340)

Результати розрахунку ефективного запасу ходу по автомагістралі та тривалості заряджання на зарядних станціях різних типів для трьох серійних важких електричних вантажівок (Volvo FH Aero Electric, Scania Battery Electric Truck та Mercedes-Benz eActros 600) наведені у таблиці 4 (значення коефіцієнтів експлуатаційного резерву й ефективності заряджання були прийняті рівними $k = 1,15$ і $\eta = 0,92$ відповідно; питомі витрати енергії на 1 км шляху є бралися для BEV з масою 40 т – дозволеною максимальною масою автопоїзда).

Таблиця 4: Ефективний запас ходу і тривалість заряджання для BEV вантажівок з таблиці 1

	Scania Battery Electric Truck	Volvo FH Aero Electric (extended range)	Mercedes-Benz eActros 600
Номінальна ємність акумулятора, кВт·год	560	780	621
ΔSOC (з урахуванням типу батареї)	60%	60%	75%
Питомі витрати (для 40 тонн), ϵ , кВт·год/км	1,2	1,2	1,2
Доступна енергія, $E_{\text{available}}$, кВт·год	336	468	466
Ефективний запас ходу, D_{max} , км	243	339	337
Тривалість заряджання, t_{charging} , хв:			
CCS2 (350 кВт)	63	87	87
MCS (750 кВт)	29	41	41

Джерело: розховано автором.

Враховуючи, що ємність найбільшої з доступних для наведених автомобілів батарей становить 780 кВт·год, за 11-годинну нічну зупинку будь-який із них можна повністю зарядити навіть при середній потужності заряджання лише у 80 кВт, тобто додатковий аналіз даного процесу не є необхідним.

Стосовно ж короткої 45-хвилинної перерви є важливим визначити, яка саме потужність зарядної станції буде достатньою для відповідної підзарядки тягових батарей. Тут можна одразу сказати, що за допомогою зарядних станцій із конекторами формату CCS2 і потужністю у 350 кВт за 45 хвилин і за оптимальних умов можна передати до батареї не більше ніж 250 кВт·год енергії (тобто поповнити пробіг навіть економічного 40-тонного BEV не більше ніж

на 200 км – у півтора рази менше за оптимальне значення пробігу між послідовними регламентними зупинками). Тобто використання зарядних станцій даного класу потужності вимагатиме не тільки значно більш щільної мережі зарядних хабів, але й удвічі частіших зупинок на підзаряджання із відповідними втратами часу.

Більш потужні зарядні станції з конекторами формату MCS і потужностями від 700 кВт і вище здатні за 45 хв заряджання передати необхідну кількість енергії для відновлення ефективного запасу ходу важких BEV. Однак для повного заряджання батареї ємністю 780 кВт·год при номінальній потужності зарядної станції у 750 кВт знадобиться значно більше однієї години (до 2 годин) через обов'язкове зниження потужності заряджання при наближенні SOC до 100% (для типових літій-іонних батарей зазвичай вже після 80% і раніше, залежно від потужності зарядної станції)

Отже отримані результати свідчать, що комерційно наявні вантажні автомобілі з повною завантаженою масою біля 40 тонн вже здатні без підзаряджання долати відстані, порівнянні з максимально дозволеною нормативними документами дальністю безперервного ходу у 360 км (яка завжди фактично виявлятиметься меншою внаслідок дії обмежень швидкості на окремих ділянках маршруту тощо).

Зауважимо, що Mercedes-Benz eActros 600 оснащений літій-залізо-фосфатною батареєю, для якої виробник дозволяє використання 95% від її повної ємності. Хоча відчутно ширше SOC-вікно є типовою рисою LFP батарей порівняно з Li-NMC/NCA батареями, дозволене значення у 95% все ж виглядає відчутно завищеним у разі щоденного використання. Тому у даній роботі ми використали консервативне значення у 75%, більш прийнятне для регулярного використання або при використанні у неоптимальних кліматичних умовах (наприклад, взимку).

У випадку Scania Battery Electric Truck також можливо досягти ефективного запасу ходу у ≈ 340 км, якщо розширити SOC вікно від оптимального значення у 60% до 80–85%, що є припустимим для Li-NMC батарей за оптимальних кліматичних умов.

Оптимізація географічного розташування зарядної інфраструктури

Пошук оптимальних розташувань для потужних зарядних хабів проводився на наведеному вище графі основних транспортних шляхів України (рис. 2) з урахуванням ефективного запасу ходу, який транспортний засіб здатний отримати протягом 45-хвилинної регламентної зупинки за допомогою зарядних станцій обох типів (CCS2 і MCS) (таблиця 4).

Алгоритм оптимізації географічного розташування зарядних хабів наведено на рис. 3. Роль цільової функції грала кількість хабів відповідного типу, яка мінімізувалася. Обмеження отримувалися з тієї умови, щоб BEV був здатний подолати маршрут між будь-якими двома вершинами графа за найкоротшим шляхом, підзаряджаючись лише протягом регламентних 45-хвилинних зупинок (за умови, що при відправленні з початкового пункту його батареї була повністю заряджена). Для мережі станцій CCS2 очікуваний запас ходу приймався рівним 200 км (відстань, яку два з трьох розглянутих автомобіля здатні подолати після 45 хв заряджання), а у випадку MCS – 340 км. Розв'язок задачі лінійного програмування виконувався за допомогою бібліотеки PuLP для Python.

Враховуючи типові відстані між містами, при спробі побудувати оптимальну логістичну мережу на станціях типу CCS2 (350 кВт) і вкладати процес заряджання у типові 45 хвилин, то незалежно від обраного типу автомобіля зарядні хаби доведеться розташовувати практично у кожному вузлі графа (із можливим виключенням Рогатину та Луцьку чи Дубно), а на ділянках Ізмаїл–Одеса (234 км), Дніпро–Кропивницький (246 км), Ужгород–Львів (248 км), Одеса–Умань (272 км), Київ–Суми (335 км) і Київ–Полтава (337 км) доведеться будувати додаткові проміжні хаби чи істотно збільшувати тривалість заряджання перед ними.

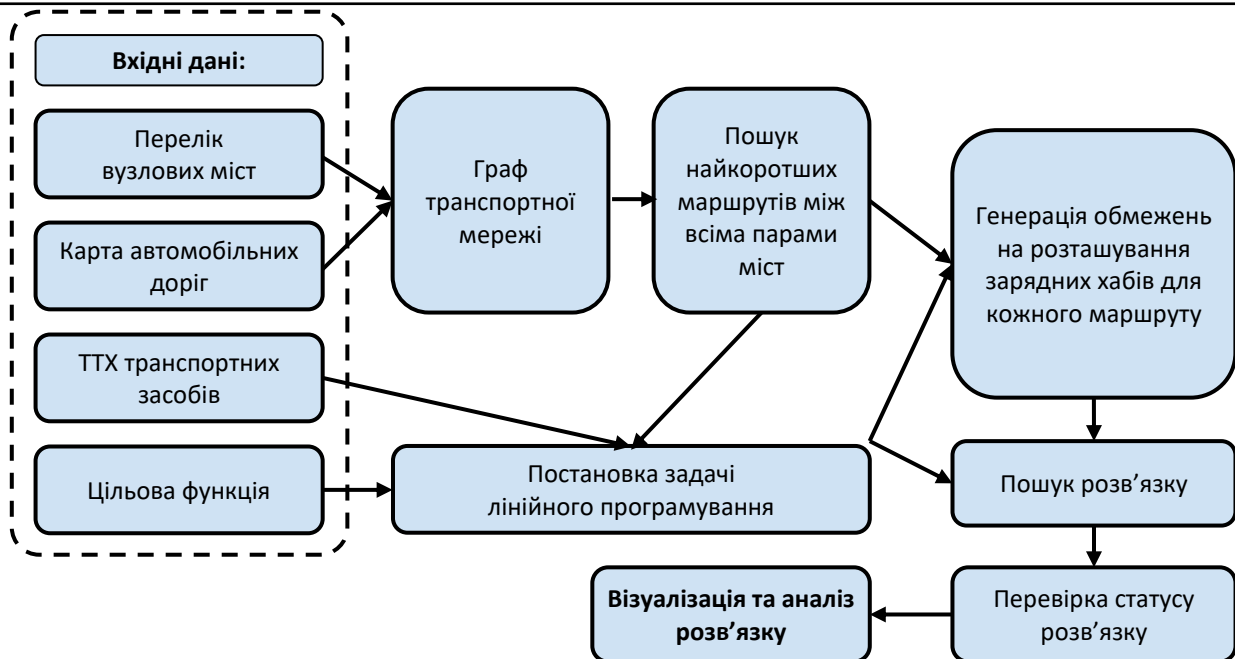


Рисунок 3: Блок-схема алгоритму оптимізації розташування зарядних хабів

Джерело: розроблено автором.

У випадку ж станцій “мегаватного” класу (MCS, 750 кВт) оптимальна мережа виявляється значно розрідженішою і включає всього 13 хабів: Дніпро, Дубно, Житомир, Кривий Ріг, Кропивницький, Київ, Львів, Одеса, Полтава, Стрий, Умань, Хмельницький і Черкаси (рис. 4).

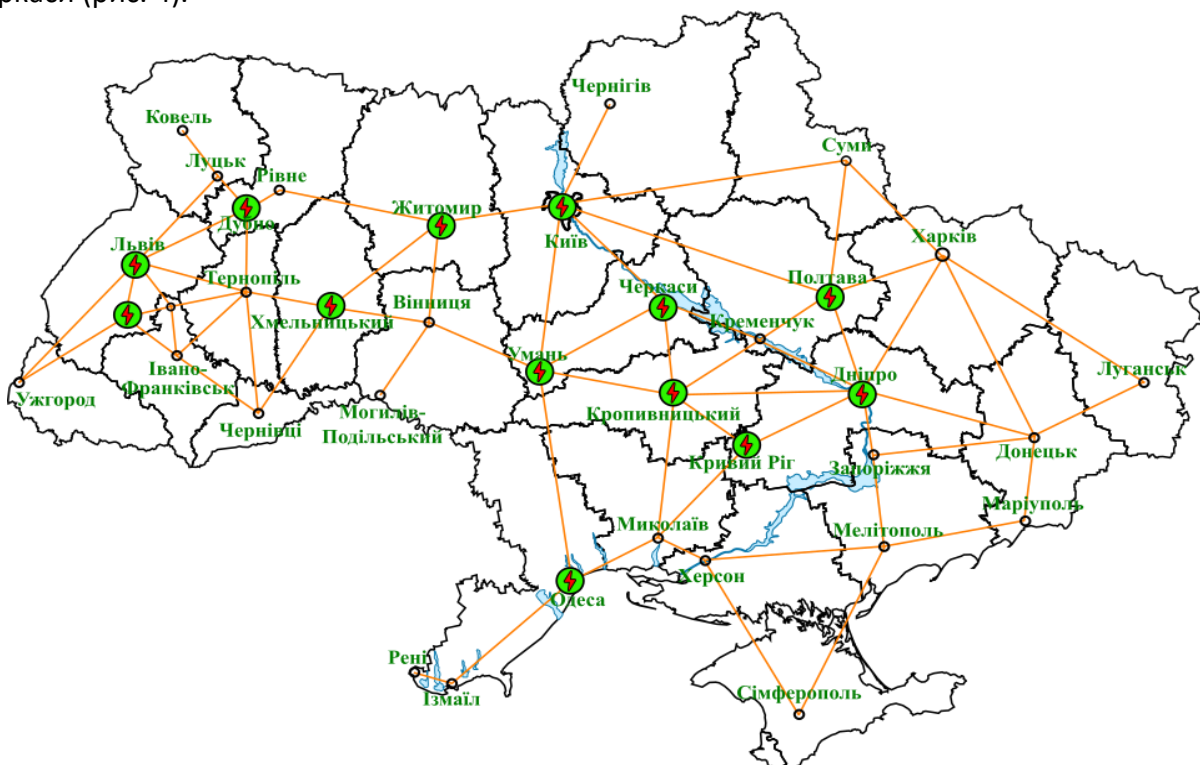


Рисунок 4: Карта оптимального розташування зарядних хабів мегаватного класу

Відмітимо, що з наведеного вище переліку основних вузлів графа доріг у даний перелік не потрапили лише Тернопіль (розташований в центрі насиченого вузловими точками регіоні) та Харків (який наразі знаходиться на самому краю безпечної для пересування території України).

Варто зазначити, що при розгляді повної карти транспортних шляхів (з урахуванням територій, тимчасово окупованих російською федерацією) оптимальний розв'язок зростає до 17 хабів (рис. 5), при чому наведений вище перелік міст залишається незмінним, а лише поповнюється Донецьком, Харковом, Херсоном і Мелітополем. Даний факт підтверджує економічну доцільність вибору зазначених вище міст у ролі вузлових хабів і гарантує, що цей вибір залишатиметься оптимальним і після відсічі збройної агресії рф.

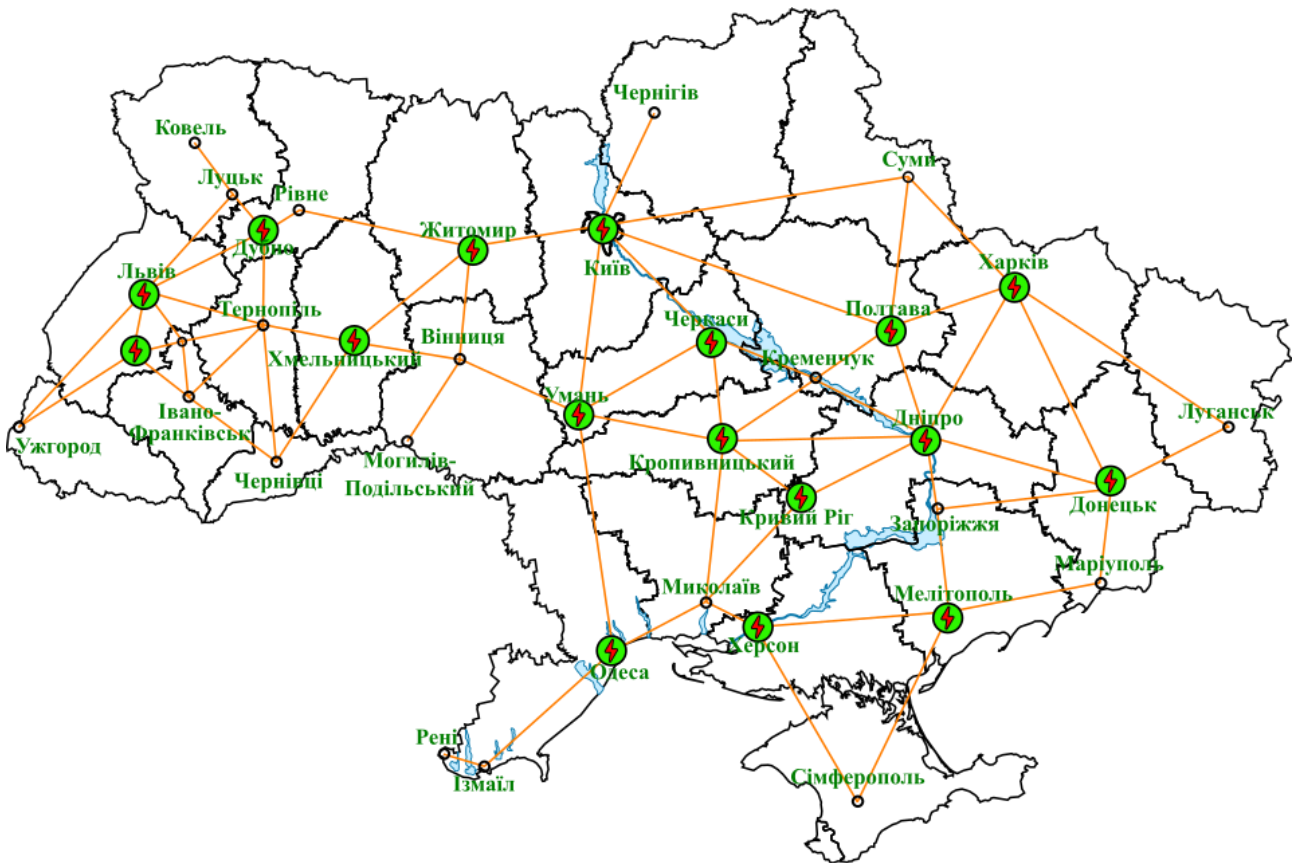


Рисунок 5: Карта оптимального розташування зарядних хабів мегаватного класу з урахуванням міст на тимчасово окупованій території

Додамо, що навіть збільшення запасу ходу транспортних засобів до 500 км у майбутньому (хоча його і буде неможливо використати протягом 4.5 годин безперервного руху) зменшує необхідну кількість вузлових станцій до лише 10, проте 8 з них (окрім Кременчука й Миколаєва) вже і так знаходяться у наведеному вище переліку оптимальних розташувань. При цьому, зрозуміло, що по мірі електрифікації вантажного автомобільного транспорту попит на потужні зарядні станції в усіх містах України лише зростатиме, тож жоден із запропонованих хабів не виявиться непотрібним.

Також варто звернути увагу на те, що значна частина із запропонованих хабів розташована достатньо близько до АЕС, які є потужними джерелами дешевої електроенергії. А саме: Житомир, Рівне і Хмельницький – навколо Хмельницької АЕС, а Кривий Ріг, Кропивницький, Одеса, Умань і Херсон – навколо Південноукраїнської АЕС.

Аналіз отриманого оптимального розв'язку

При подальшому аналізі будемо враховувати спиратися на два значення відстаней між заряджаннями BEV: введений вище $D_{\max} = 340$ км, пов'язаний з ефективним запасом ходу BEV, а також $D_{\text{reg}} = 280$ км – більш консервативним значенням, пов'язаним з вимогами нормативних документів (не менше 45 хвилин перерви після кожних 4,5 годин безперервного керування) і

більш реалістичною оцінкою середньої швидкості руху в 60–70 км/год.

Кількість можливих різних маршрутів на зв'язному графі з $n = 37$ вузлів визначається як число комбінацій другого порядку

$$C(n, 2) = \frac{n(n-1)}{2}, \quad C(37, 2) = 666.$$

Загальні характеристики цих маршрутів агреговані у таблиці 5.

Таблиця 5: Розподіл маршрутів по довжині у розрізі значень D_{reg} і D_{max}

Відносно запасу ходу BEV			Відносно обмежень тривалості руху		
До 340 км	153	23%	До 280 км	106	16%
340 – 680 км	226	34%	280 – 560 км	198	30%
680 – 1020 км	196	29%	560 – 840 км	174	26%
1020 – 1360 км	83	13%	840 – 1120 км	130	19%
1360 – 1700 км	8	1%	1120 – 1400 км	54	8%
Більше 1700 км	–	–	Більше 1400 км	4	1%

Джерело: розраховано автором.

У розглянутому випадку 153 із цих маршрутів (23%) мають довжину, меншу за D_{max} , тобто не вимагають проміжного підзарядження BEV за нормальних умов експлуатації і за оптимальних умов руху можуть обійтися без регламентної зупинки. При врахуванні D_{reg} замість D_{max} лише 106 маршрутів дозволяють подолання без обов'язкових зупинок.

Найдовшим маршрутом є Ужгород – Луганськ (1579 км), який мінімально потребує чотирьох повноцінних проміжних заряджання тягових батарей, але фактично реалізується (з урахуванням карти оптимального розташування зарядних хабів і відстаней між ключовими містами) з шістьма проміжними заряджаннями (Львів або Стрий після переходу через Карпати, Хмельницький, Умань, Кропивницький, Дніпро і Донецьк з трьома найдовшими ділянками біля 250 км). З точки зору норм роботи водія даний маршрут займає два повних дні з обов'язковою нічною зупинкою (на ділянці Умань – Кропивницький), і чотирьох регламентних зупинок (по дві в день), що дуже добре узгоджується з потребою підзарядження BEV (враховуючи в тому числі, що 45-хвилинна перерва може розбиватися дві коротші за потребою водія).

Загалом, слідуючи нормам законодавства, біля двох третин можливих маршрутів може бути подолано без нічної зупинки, а одна третина маршрутів вимагає її наявності (що дозволяє повноцінне заряджання навіть за допомогою станцій з потужністю до 100 кВт).

Від 30% до 35% від загальної кількості маршрутів можуть бути подолані лише з однією регламентною зупинкою, суміщеною зі швидкісним заряджанням.

Біля 25% маршрутів вимагають двох перерв і заряджання, але все ще вкладаються в один день.

Також варто додати, що для більшості маршрутів мережа зарядних станцій виявляється значно щільнішою, ніж того вимагають значення D_{reg} і D_{max} , що не лише збільшує гнучкість планування, але й робить раціональним використання вантажівок з ефективним запасом ходу значно меншим за D_{max} . Подальше вдосконалення BEV і збільшення їхнього запасу ходу лише збільшуватимуть цю гнучкість, дозволяючи водію максимально використовувати регламентований законодавством час керування автомобілем без необхідності ретельного підлаштування під розташування зарядних станцій.

Перспективи впровадження електричного вантажного транспорту в логістичне забезпечення ЗСУ

Сучасні умови функціонування військової логістики України характеризуються високою

інтенсивністю транспортних операцій, необхідністю оперативного переміщення значних обсягів матеріально-технічних ресурсів, а також підвищеними вимогами до автономності, мобільності та стійкості транспортної інфраструктури. Основою військових перевезень є традиційні дизельні транспортні засоби, проте їхнє використання пов'язане зі значною залежністю від постачання пального, що створює додаткові логістичні ризики при порушенні транспортних комунікацій чи ураження паливної інфраструктури.

В умовах сучасних бойових дій із щоденними ударами по тилі інфраструктурним об'єктам і портам питання диверсифікації джерел енергозабезпечення набуває стратегічного значення. Розвиток електричного вантажного транспорту дозволяє частково перенести навантаження з паливної логістики на енергетичну інфраструктуру, яка вже цілком довела свою здатність до функціонування за таких умов і може бути додатково резервована за рахунок локальних відновлюваних джерел енергії, стаціонарних накопичувачів енергії, а також дизель-генераторних і газотурбінних установок. А поява і практичне впровадження стандарту MCS із заряджанням навіть важких електричних вантажівок за 20–40 хв. зробила оптимальну електрифікацію логістики технологічно можливою.

Звісно наразі мова йде не про повну заміну дизельного логістичного транспорту ЗСУ електричним, а про поетапне створення змішаного транспортного парку, в якому електричні платформи виконуватимуть завдання у тих сегментах, де їхні технічні переваги є найбільшими.

Певною перевагою Збройних Сил перед комерційними логістичними компаніями є широка мережа вже існуючих логістичних баз і центрів забезпечення, розташованих по всій території країни. Саме на базі деяких із цих об'єктів можуть бути створені перші потужні зарядні хаби, відповідне підключення яких до електричної мережі також має виявитися значно простішим з формального боку завдяки державній підтримці.

Найбільш очевидною областю електрифікації є забезпечення стаціонарної тилової логістики між великими логістичними базами (включно з великим обсягом міжнародних перевезень), центральними складами, ремонтно-відновлювальними підприємствами і транспортними вузлами. Такі маршрути характеризуються передбачуваною протяжністю, можливістю попереднього планування зарядної інфраструктури та відносно стабільними умовами експлуатації.

Другим перспективним напрямом є забезпечення оперативного тилу, де електровантажівки можуть здійснювати регулярні перевезення боєприпасів, технічного майна, продовольства, медичного обладнання і запасних частин між регіональними логістичними центрами. При цьому обмежений запас ходу та більш тривале заряджання, ніж у випадку дизельних автомобілів, втрачає свою значимість, натомість значно краща динаміка розгону, низька акустична помітність, мінімальна теплова сигнатура та вища живучість електричних моторів і літій-залізо-фосфатних батарей (порівняно з дизельними автомобілями) дозволяють зробити переміщення вантажів у нічний час менш небезпечним з точки зору виявлення противником і враження FPV дронами.

Крім того, електричні вантажівки можуть бути інтегровані до енергетичної інфраструктури військових об'єктів як мобільні накопичувачі енергії (Vehicle-to-Grid), здатні виконувати функції резервного живлення командних пунктів, систем зв'язку, мобільних госпіталів, польових технічних комплексів та інших об'єктів критичної інфраструктури.

Обговорення

Отримані результати підтверджують сучасну тенденцію переходу світової транспортної галузі до використання важких електричних вантажівок як одного з ключових напрямів декарбонізації вантажних перевезень та підвищення енергетичної стійкості логістичних систем. Водночас проведене дослідження показало, що ефективність такого переходу визначається не лише технічними характеристиками транспортних засобів, а насамперед

раціональним просторовим плануванням зарядної інфраструктури, яка повинна відповідати особливостям транспортної мережі держави, інтенсивності вантажних потоків і нормативним вимогам до організації перевезень. Цей висновок узгоджується з результатами досліджень Metais та співавт. [10], Motlagh і Li [11], а також Xylia та співавт. [12], які розглядають оптимальне розміщення зарядних станцій як один із визначальних чинників розвитку електричного вантажного транспорту.

Запропонований у статті підхід істотно відрізняється від більшості відомих моделей просторового планування зарядної інфраструктури. Якщо попередні дослідження переважно орієнтовані на мінімізацію транспортних витрат або забезпечення попиту цивільних перевезень, то у даній роботі математична модель інтегрує одночасно конфігурацію транспортної мережі України, технічні характеристики сучасних важких електричних вантажівок, можливості зарядних систем CCS2 і Megawatt Charging System (MCS), а також нормативні вимоги щодо режимів праці та відпочинку водіїв. Такий комплексний підхід дозволив визначити вузлові логістичні центри, здатні забезпечити функціонування мережі зарядних хабів із мінімально необхідною кількістю об'єктів та високою транспортною доступністю.

Отримані результати також розширюють висновки Danielis та співавт. [4], Samet та співавт. [5] і Link та співавт. [7], які довели економічну доцільність використання важких електричних вантажівок за умови подальшого зниження вартості акумуляторних систем. Проведене дослідження демонструє, що навіть за наявності економічних переваг широкомасштабне впровадження електричних вантажівок буде стримуватися без створення мережі зарядних хабів мегаватного класу. Особливо це стосується міжміських перевезень, де тривалість заряджання безпосередньо впливає на продуктивність транспортних засобів і дотримання законодавчих вимог щодо режимів праці водіїв.

Враховуючи специфіку географії і транспортних мереж різних країн і регіонів, найбільш релевантним об'єктом для порівняння з отриманими у даній роботі результатами є існуюча мережа мегаватних зарядних станцій Західної Європи та плани з її розширення у найближчі роки [25]. Станом на середину 2026 року дана мережа охоплює територію площею біля 550 тис. км² від центральної Франції до Берліна, включно з Бельгією, Нідерландами і північною Італією та включає 13 функціонуючих і 8 запланованих станцій. Відстань по прямій між найвіддаленішими точками цієї якої становить практично рівно 1000 км, що еквівалентно відстані між Ужгородом і Харковом, роблячи цікавим та інформативним її порівняння з отриманими у даній роботі результатами для аналогічної мережі України (13–17 хабів). Одразу можна відмітити, що обидві мережі мають приблизно однакову щільність розташування хабів MCS, однак у південній половині існуючої Європейській мережі середня відстань між найближчими хабами перевищує 400 км, а у її північній половині – є меншою за 200 км. При цьому три з 8 запланованих MCS розташовані у центральній частині Франції, фактично вдвічі зменшуючи відстані між найближчими хабами у південно-західній половині мережі.

Середня відстань між найближчими хабами у запланованій мережі з 5 MCS у Англії становить біля 150 км, що корелює із щільністю аналогічної мережі на території Нідерландів і північній Німеччині, а чотири з п'яти хабів розташовані уздовж практично прямолінійного транспортного коридору Ешфорд – Лондон – Бірмінгем – Ліверпуль загальною довжиною біля 450 км. При русі між крайніми пунктами даному маршруту наведена конфігурація дозволяє обирати для підзаряджання автомобіля один із двох наявних проміжних пунктів, підвищуючи гнучкість планування перевезень і більш рівномірно розподіляючи навантаження на зарядну та енергетичну інфраструктуру. Однак варто зауважити, що така висока щільність мережі на даному етапі електрифікації вантажних автомобільних перевезень є можливою лише для порівняно невеликих регіонів, а її забезпечення в масштабах України виглядає цілком економічно недоцільною.

Важливою відмінністю запропонованого дослідження від існуючих робіт є врахування перспектив використання важких електричних вантажівок у логістичному забезпеченні Збройних Сил України. На відміну від роботи Горошка і Завальнюка [6], яка була зосереджена переважно на підготовці військових водіїв, у цій статті електричні вантажівки розглядаються як елемент перспективної системи тилового забезпечення. Зокрема, обґрунтовано можливість їх використання для міжбазових перевезень, доставки матеріально-технічних засобів та забезпечення функціонування військової інфраструктури, а в перспективі — як мобільних накопичувачів електроенергії для підтримки критично важливих об'єктів оперативного тилу. Такий підхід істотно розширює традиційне уявлення про роль електричного транспорту у військовій логістиці.

Водночас результати дослідження слід інтерпретувати з урахуванням певних обмежень. Побудована модель ґрунтується на основних міжнародних і регіональних автомобільних шляхах України та не враховує зміну інтенсивності транспортних потоків у часі, можливі пошкодження транспортної інфраструктури внаслідок бойових дій, обмеження енергосистеми щодо підключення зарядних комплексів великої потужності, а також економічні аспекти інвестицій у створення зарядних хабів. Крім того, модель орієнтована на сучасні серійні важкі електричні вантажівки, тоді як подальший розвиток акумуляторних технологій може істотно змінити оптимальні параметри зарядної мережі.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розробленням динамічних моделей просторового планування зарядної інфраструктури, які враховуватимуть прогнозовані вантажні потоки, розвиток енергетичної системи, використання відновлюваних джерел енергії, технологій Vehicle-to-Grid (V2G) та сценарії функціонування транспортної мережі в умовах воєнного стану. Окремим напрямом є економічне оцінювання вартості створення мережі мегаватних зарядних хабів та її інтеграції з логістичною інфраструктурою сектору безпеки і оборони України. Такі дослідження дозволять сформувати комплексну наукову основу для поетапної електрифікації вантажних перевезень і підвищення стійкості національної та військової логістики.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розроблено науково обґрунтований підхід до просторового планування мережі зарядних хабів для важких електричних вантажівок в Україні.

Встановлено, що існуючі серійні важкі електричні вантажівки класу 40 т вже забезпечують ефективний запас ходу у 230–340 км при консервативних значеннях SOC-вікна акумуляторної барареї. Дані значення відповідають нормативно допустимій дальності безперервного руху вантажного автопоїзда (до 360 км), що підтверджує технічну готовність сучасних BEV до використання на міжміських магістральних маршрутах України.

Показано принципову відмінність між зарядними стандартами CCS2 і MCS з точки зору інтеграції у логістику міжміських перевезень. Зарядні станції формату CCS2 потужністю 350 кВт здатні відновити за нормативну 45-хвилинну перерву не більше 200 км ефективного запасу ходу, що вимагає розміщення хабів практично у кожному вузлі транспортної мережі та подвоює частоту зупинок. Станції мегаватного класу MCS (від 750 кВт) за 40 хвилин забезпечують підзарядку на 330–340 км, повністю вписуючись у регламентну перерву.

Головним результатом роботи є модель мінімально достатньої мережі MCS-хабів (13–17 вузлів), отримана методами лінійного програмування на основі побудованого графа основних автомагістралей транспортної мережі України. Додатково продемонстровано, що отримане оптимальне розташування хабів є стійким і не змінюється через тимчасову окупацію південно-східних областей України російської федерацією, що підтверджує доцільність пріоритетного інвестування у визначені міста.

Додатково розглянуто перспективи поетапного впровадження важких електричних вантажівок у логістичне забезпечення Збройних Сил України. До пріоритетних напрямків віднесено стаціонарну тилову логістику між великими базами та центрами забезпечення, де передбачуваність маршрутів і наявна мережа об'єктів ЗСУ спрощують розгортання зарядної інфраструктури, а також перевезення в оперативному тилу, де незалежність від вразливої мережі стаціонарних заправочних станцій, вразливих для атак ударних беспілотників, разом з низкою акустичною й тепловою сигнатурою підвищує живучість BEV порівняно з дизельними автомобілями. Додатковою перевагою є можливість використання електричних вантажівок як мобільних накопичувачів електроенергії для резервного живлення будь-яких об'єктів військової і критичної інфраструктури.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел:

1. Horoshko O., Zavalniuk V. Electric vehicles: Driving toward a sustainable future – ecological benefits, challenges, and local trends // Collection of Scientific Works of the Odesa Military Academy. 2025. Vol. 24, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2025.24.9>.
2. Vehicles on European roads : report // The European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) : website. 2026. URL: <https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads-2026/> (дата звернення: 12.05.2026).
3. Average annual fuel use by vehicle type // U.S. Department of Energy, Office of Critical Minerals and Energy Innovation : website. 2025. URL: <https://afdc.energy.gov/data/10308> (дата звернення: 12.05.2026).
4. Danielis R., Niaz A. M. K., Scorrano M., Masutti M., Awan A. M. The economic feasibility of battery electric trucks: A review of the total cost of ownership estimates // Energies. 2025. Vol. 18, No. 2. Article 429. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020429> (дата звернення: 12.05.2026).
5. Samet M. J., Liimatainen H., Pihlatie M., van Vliet O. P. R. Levelized cost of driving for medium and heavy-duty battery electric trucks // Applied Energy. 2024. Vol. 361. Article 122976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122976> (дата звернення: 12.05.2026).
6. Горощко О. О., Завальнюк В. В. Аналіз перспектив переходу до вантажівок із електричним приводом у навчанні водінню військовослужбовців ЗС України // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2025. № 86. С. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2025/86-04> (дата звернення: 12.05.2026).
7. Link S., Stephan A., Speth D., Plötz P. Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification // Nature Energy. 2024. Vol. 9, No. 8. P. 1032–1039. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9> (дата звернення: 12.05.2026).
8. Bakker J., Lopez Alvarez J. A., Veldman J., Buijs P. Strategic fleet replacement for the electrification of heavy-duty road freight transportation // Applied Energy. 2025. Vol. 391. Article 125935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125935> (дата звернення: 12.05.2026).
9. Borlaug B., Muratori M., Gilleran M. et al. Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems // Nature Energy. 2021. Vol. 6, No. 6. P. 673–682. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00855-0> (дата звернення: 12.05.2026).

10. Metais M. O., Jouini O., Perez Y., Berrada J., Suomalainen E. Too much or not enough? Planning electric vehicle charging infrastructure: A review of modeling options // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 153. Article 111719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111719> (дата звернення: 12.05.2026).
11. Motlagh S. G., Li L. A review on electric vehicle charging station planning: Infrastructure placement, sizing, upgrades, and uncertainties // Journal of Energy Storage. 2026. Vol. 141. Article 119325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119325> (дата звернення: 12.05.2026).
12. Xylia M., Olsson E., Macura B., Nykvist B. Estimating charging infrastructure demand for electric vehicles: A systematic review // Energy Strategy Reviews. 2025. Vol. 59. Article 101753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101753> (дата звернення: 12.05.2026).
13. Yu H., Adhikari A., Sun X. et al. Can electric trucks be a viable green logistics and transportation solution? Modeling a joint logistics-and-charging-infrastructure network design problem // Green Energy and Intelligent Transportation. 2026. Vol. 5, No. 1. Article 100295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2025.100295> (дата звернення: 12.05.2026).
14. The zero-exhaust emission vehicles, from Mercedes-Benz Trucks, are expected to transport more than 350 million packages every year // About Amazon : website. 14 Jan. 2025. URL: <https://www.aboutamazon.eu/news/sustainability/amazon-places-its-largest-ever-order-of-electric-heavy-trucks> (дата звернення: 12.05.2026).
15. DFDS intensifies decarbonisation efforts with 100 additional e-trucks // DFDS : website. 18 Mar. 2024. URL: <https://www.dfds.com/en/about/media/news/dfds-intensifies-decarbonisation-efforts-with-100-additional-electric-trucks> (дата звернення: 12.05.2026).
16. The new MAN eTGX: The eTruck for the long haul // MAN Global : website. URL: <https://www.man.eu/global/en/truck/all-models/the-man-tgx/the-man-etgx/overview.html> (дата звернення: 12.05.2026).
17. Borrás J. Schneider electric semi truck fleet hits 6 million miles driven // Electrek : website. 27 Dec. 2024. URL: <https://electrek.co/2024/12/27/schneider-electric-semi-truck-fleet-hits-6-million-miles-driven/> (дата звернення: 12.05.2026).
18. Hanley S. Norway continues to lead the transition to a green economy // CleanTechnica : website. 09 May 2024. URL: <https://cleantechnica.com/2024/05/09/norway-continues-to-lead-the-transition-to-a-green-economy> (дата звернення: 12.05.2026).
19. Firth E. Transitioning to electric vehicles in logistics: Future outlook // Maersk : website. 04 June 2025. URL: <https://www.maersk.com/insights/sustainability/2025/06/04/transitioning-to-electric-vehicles-in-logistics> (дата звернення: 12.05.2026).
20. Ціни на дизельне паливо на АЗС України // Мінфін : вебсайт. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/> (дата звернення: 12.05.2026).
21. Про внесення змін до Податкового кодексу України щодо імплементації положень актів права Європейського Союзу щодо акцизного податку : Закон України від 18.07.2024 № 3878-IX // Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3878-20#Text> (дата звернення: 12.05.2026).
22. Battery electric truck // Scania : website. URL: <https://www.scania.com/ua/uk/home/products/trucks/battery-electric-truck.html> (дата звернення: 12.05.2026).
23. Volvo FH Aero Electric // Volvo Trucks : website. URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/electric/volvo-fh-aero-electric.html> (дата звернення: 12.05.2026).
24. Actros // Mercedes-Benz Trucks : website. URL: <https://www.mercedes-benz-trucks.com/gb/en/trucks/eactros.html> (дата звернення: 12.05.2026).
25. Public charging stations for electric trucks in Europe: A network in continuous expansion // Renault Trucks : website. URL: <https://www.renault-trucks.com/en/trucks-charging-stations> (дата звернення: 12.05.2026).

26. Fathollahi A., Derakhshandeh S. Y., Ghiasian A., Khoban M. H. Using dynamic wireless power transfer technology in a multi-product multi-depot supply chain // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022. Vol. 32. Article 100836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100836> (дата звернення: 12.05.2026).
27. Про затвердження Типового положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів : наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 07.06.2010 № 340 : редакція станом на 29.05.2025 // Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0811-10> (дата звернення: 12.05.2026).

References

1. Horoshko, O., & Zavalniuk, V. (2025). Electric vehicles: Driving toward a sustainable future— Ecological benefits, challenges, and local trends. *Collection of Scientific Works of the Odesa Military Academy*, 24(2). <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2025.24.9>
2. European Automobile Manufacturers' Association. (2026). *Vehicles on European roads: Report*. <https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads-2026/>
3. U.S. Department of Energy, Office of Critical Minerals and Energy Innovation. (2025). *Average annual fuel use by vehicle type*. <https://afdc.energy.gov/data/10308>
4. Danielis, R., Niazi, A. M. K., Scorrano, M., Masutti, M., & Awan, A. M. (2025). The economic feasibility of battery electric trucks: A review of the total cost of ownership estimates. *Energies*, 18(2), Article 429. <https://doi.org/10.3390/en18020429>
5. Samet, M. J., Liimatainen, H., Pihlatie, M., & van Vliet, O. P. R. (2024). Levelized cost of driving for medium and heavy-duty battery electric trucks. *Applied Energy*, 361, Article 122976. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122976>
6. Horoshko, O. O., & Zavalniuk, V. V. (2025). Analiz perspektyv perekhodu do vantazhivok iz elektrychnym pryvodom u navchanni vodinniu viiskovosluzhbovtziv Zbroinykh Syl Ukrainy [Analysis of the prospects for the transition to electric-powered trucks in driver training for servicemen of the Armed Forces of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka (Collection of Scientific Works of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv)*, 86, 34–43. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2025/86-04>
7. Link, S., Stephan, A., Speth, D., & Plötz, P. (2024). Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. *Nature Energy*, 9(8), 1032–1039. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9>
8. Bakker, J., Lopez Alvarez, J. A., Veldman, J., & Buijs, P. (2025). Strategic fleet replacement for the electrification of heavy-duty road freight transportation. *Applied Energy*, 391, Article 125935. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125935>
9. Borlaug, B., Muratori, M., Gilleran, M., Woody, D., Muston, W., Canada, T., Ingram, A., Gresham, H., & McQueen, C. (2021). Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems. *Nature Energy*, 6(6), 673–682. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00855-0>
10. Metais, M. O., Jouini, O., Perez, Y., Berrada, J., & Suomalainen, E. (2022). Too much or not enough? Planning electric vehicle charging infrastructure: A review of modeling options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, Article 111719. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111719>
11. Motlagh, S. G., & Li, L. (2026). A review on electric vehicle charging station planning: Infrastructure placement, sizing, upgrades, and uncertainties. *Journal of Energy Storage*, 141, Article 119325. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119325>
12. Xylia, M., Olsson, E., Macura, B., & Nykvist, B. (2025). Estimating charging infrastructure demand for electric vehicles: A systematic review. *Energy Strategy Reviews*, 59, Article 101753. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101753>

13. Yu, H., Adhikari, A., Sun, X., Solvang, W. D., Gan, M., & Aydin, N. (2026). Can electric trucks be a viable green logistics and transportation solution? Modeling a joint logistics-and-charging-infrastructure network design problem. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 5(1), Article 100295. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2025.100295>
14. About Amazon. (2025, January 14). *The zero-exhaust emission vehicles from Mercedes-Benz Trucks are expected to transport more than 350 million packages every year.* <https://www.aboutamazon.eu/news/sustainability/amazon-places-its-largest-ever-order-of-electric-heavy-trucks>
15. DFDS. (2024, March 18). *DFDS intensifies decarbonisation efforts with 100 additional e-trucks.* <https://www.dfds.com/en/about/media/news/dfds-intensifies-decarbonisation-efforts-with-100-additional-electric-trucks>
16. MAN Truck & Bus SE. (n.d.). *The new MAN eTGX: The eTruck for the long haul.* <https://www.man.eu/global/en/truck/all-models/the-man-tgx/the-man-etgx/overview.html>
17. Borrás, J. (2024, December 27). *Schneider electric semi truck fleet hits 6 million miles driven.* *Electrek.* <https://electrek.co/2024/12/27/schneider-electric-semi-truck-fleet-hits-6-million-miles-driven/>
18. Hanley, S. (2024, May 9). *Norway continues to lead the transition to a green economy.* *CleanTechnica.* <https://cleantechnica.com/2024/05/09/norway-continues-to-lead-the-transition-to-a-green-economy>
19. Firth, E. (2025, June 4). *Transitioning to electric vehicles in logistics: Future outlook.* *Maersk.* <https://www.maersk.com/insights/sustainability/2025/06/04/transitioning-to-electric-vehicles-in-logistics>
20. Minfin. (n.d.). *Tsiny na dyzelne palyvo na AZS Ukrainy* [Diesel fuel prices at filling stations in Ukraine]. <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/>
21. Verkhovna Rada Ukrainy. (2024, July 18). *Pro vnesennia zmin do Podatkovoho kodeksu Ukrainy shchodo implementatsii polozhen aktiv prava Yevropeiskoho Soiuzu shchodo aktsyznoho podatku (Zakon Ukrainy No. 3878-IX)* [On amendments to the Tax Code of Ukraine regarding the implementation of the provisions of European Union legal acts on excise tax (Law of Ukraine No. 3878-IX)]. *Zakonodavstvo Ukrainy.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3878-20>
22. Scania. (n.d.). *Battery electric truck.* <https://www.scania.com/ua/uk/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>
23. Volvo Trucks. (n.d.). *Volvo FH Aero Electric.* <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/electric/volvo-fh-aero-electric.html>
24. Mercedes-Benz Trucks. (n.d.). *eActros.* <https://www.mercedes-benz-trucks.com/gb/en/trucks/eactros.html>
25. Renault Trucks. (n.d.). *Public charging stations for electric trucks in Europe: A network in continuous expansion.* <https://www.renault-trucks.com/en/trucks-charging-stations>
26. Fathollahi, A., Derakhshandeh, S. Y., Ghiasian, A., & Khoban, M. H. (2022). Using dynamic wireless power transfer technology in a multi-product multi-depot supply chain. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, Article 100836. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100836>
27. Ministerstvo transportu ta zviazku Ukrainy. (2025). *Pro zatverdzhennia Typovoho polozhennia pro robochyi chas i chas vidpochynku vodiiv kolisnykh transportnykh zasobiv (Nakaz No. 340 vid 07 chervnia 2010 roku, redaktsiia stanom na 29 travnia 2025 roku)* [On approval of the Model Regulation on working time and rest time of drivers of wheeled vehicles (Order No. 340 of June 7, 2010, as amended on May 29, 2025)]. *Zakonodavstvo Ukrainy.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0811-10>

