

УДК 629.3.017:502.131.1

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ: ПРОЄКТНИЙ АНАЛІЗ РОЗВИТКУ МЕРЕЖІ НА МАГІСТРАЛІ М-06

Вовк Юрій, Голубіцький Богдан, Вовк Олег, Сторощук Дмитро, Кучер Олег

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001*

Стрімке зростання парку електромобілів в Україні (171,1 тис. од. станом на жовтень 2025 р., що на 58% більше, ніж у 2024 р.) актуалізує питання розвитку зарядної інфраструктури на міжміських магістралях. Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) зарядних станцій дозволяє комплексно оцінити їх вплив на довкілля від етапу виробництва до утилізації, що відповідає принципам сталого розвитку транспорту та вимогам стандартів ISO 14040/14044.

Магістраль М-06 (Київ-Чоп, 821,5 км) є ключовим транспортним коридором, що з'єднує Україну з ЄС через пункти пропуску до Польщі, Словаччини та Угорщини. Станом на вересень 2025 р. на трасі функціонує 15 швидких зарядних станцій (DC Fast Chargers) потужністю 120-160 кВт операторів ОККО, ТОКА, WOG та IONITY. Проте аналіз покриття виявив 5 критичних розривів, де відстань між станціями перевищує нормативні 60 км згідно з регламентом ЄС AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation).

Мета дослідження – виконати проєктний аналіз розвитку мережі зарядних станцій на М-06 з позицій життєвого циклу, включаючи оцінку капітальних та операційних витрат (CAPEX/OPEX), економічної ефективності (NPV, IRR) та екологічного впливу проєкту на горизонті 10 років.

Використано метод оптимального розміщення Maximum Covering Location Problem (MCLP) для визначення локацій нових станцій, що забезпечують максимальне покриття траси з дотриманням нормативу AFIR (60 км між станціями). Проєктний аналіз виконано за методологією дисконтованих грошових потоків (DCF) з дисконтною ставкою 12%. Оцінка життєвого циклу проведена за стандартом ISO 14040 з урахуванням чотирьох етапів: виробництво обладнання, транспортування та монтаж, експлуатація (10 років), утилізація.

Результати дослідження.

1. Аналіз існуючої інфраструктури. Інвентаризація зарядних станцій на М-06 (табл. 1) показала нерівномірне покриття: максимальна відстань між станціями становить 130 км (ділянка Дубно–Броди), мінімальна – 5 км (всередині Львова).

Таблиця 1

Фрагмент інвентаризації зарядних станцій на М-06 (2025 р.)

№	Місто	Оператор	Потужність	Кількість портів	Відстань від Києва, км
1	Київ (Борщагівка)	ОККО	150 кВт	2× CCS2	15
2	Житомир	ОККО	160 кВт	2× CCS2	140
6	Дубно	ОККО	160 кВт	2× CCS2	350
7	Броди	ОККО	150 кВт	2× CCS2	480

Джерело: [4, власні дослідження]

Виявлено 9 ділянок (64% траси), де відстань перевищує норматив AFIR. Це створює бар'єр для міжміських поїздок електромобілями, оскільки середній запас ходу популярних моделей (Tesla Model 3, Nissan Leaf) становить 300-400 км, а рекомендована дозарядка – при 20% заряду батареї.

2. Оптимізація розміщення нових станцій. За результатами моделювання MCLP визначено 7 локацій для нових зарядних станцій DC 150 кВт (рис. 1), які забезпечують 100% покриття траси з максимальною відстанню 60 км:

- км 75 (між Києвом і Житомиром) – усунення 125-км розриву
- км 210 (між Бердичевом і Рівним) – усунення 115-км розриву
- км 340, 410 (ділянка Дубно–Броди) – усунення критичного 130-км розриву км 590, 670, 760 (західна частина траси)

3. Проектний аналіз капітальних витрат (CAPEX). Розрахунок інвестицій для встановлення 7 нових станцій виконано на основі актуальних цін обладнання та будівництва (табл. 2).

Таблиця 2

Структура CAPEX для однієї зарядної станції DC 150 кВт

Стаття витрат	Вартість, тис. грн	Частка, %
Зарядне обладнання (2× DC 150 кВт)	2800	53,7
Трансформаторна підстанція (630 кВА)	1200	23,0
Будівельно-монтажні роботи	650	12,5
Навіс, освітлення, благоустрій	420	8,1
Проектування та дозвільна документація	140	2,7
Разом на 1 станцію	5210	100
Загальний CAPEX (7 станцій)	36 470	-

Джерело: власні розрахунки на основі даних ОККО, ТОКА (2025)

Питомі капітальні витрати становлять 17,5 тис. грн/кВт встановленої потужності, що на 12% нижче середньоевропейських показників (€560/кВт) завдяки нижчій вартості будівництва в Україні.

4. Операційні витрати та доходи (OPEX). Прогноз фінансових потоків побудовано на горизонті 10 років (2026-2035 рр.) з урахуванням зростання парку електромобілів за CAGR 25% (консервативний сценарій). Базові параметри моделі:

- Роздрібний тариф зарядки: 12 грн/кВт·год
- Тариф закупівлі електроенергії: 4,5 грн/кВт·год (промисловий споживач I категорії)
- Валова маржа: 7,5 грн/кВт·год (167%)
- Утилізація станції (рік 1): 20%, зростання на 5 п.п. щорічно до 45% (рік 6)
- Річні OPEX: 186 тис. грн/станцію (електроенергія, обслуговування, ремонти, зарплата персоналу)

Розрахунок NPV виконано за формулою дисконтованих грошових потоків:

$$NPV = \sum_{t=1}^{10} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

де CF_t – чистий грошовий потік року t , $r = 12\%$ – дисконтна ставка.

Результати проектного аналізу:

- NPV (10 років) = 68,8 млн грн
- IRR = 34,2%
- Термін окупності = 4,8 років
- PI (Profitability Index) = 2,89

Проект є високорентабельним навіть у консервативному сценарії зростання попиту. Аналіз чутливості показав, що критичним параметром є базова утилізація (рік 1): зниження до 16% робить NPV негативним, тому необхідні заходи зі стимулювання попиту на етапі запуску.

5. Оцінка життєвого циклу (LCA). Екологічний слід проекту оцінено за чотирма етапами:

Етап 1. Виробництво обладнання. Зарядна станція DC 150 кВт масою ~800 кг (силова електроніка, трансформатори, корпус) має вуглецевий слід виробництва 4,2 т CO₂-екв.

урахуванням допоміжного обладнання (трансформатор 630 кВА – 6,5 т CO₂-екв, кабелі, конструкції) загальні викиди на етапі виробництва становлять 12,1 т CO₂-екв на станцію, або 84,7 т CO₂-екв для 7 станцій.

Етап 2. Транспортування та монтаж. Доставка обладнання з порту Одеса до західних регіонів (середня відстань 650 км) та будівельні роботи додають 2,8 т CO₂-екв на станцію (19,6 т CO₂-екв сумарно).

Етап 3. Експлуатація (10 років). Ключовий етап з точки зору викидів CO₂. Споживання електроенергії залежить від структури генерації в енергосистемі України. Використано дані НЕК «Укренерго» про вуглецеву інтенсивність 0,42 кг CO₂/кВт·год (середнє значення 2025 р. з урахуванням 55% низьковуглецевої генерації: АЕС, ГЕС, ВДЕ) .

Прогнозний обсяг електроенергії, відпущеної 7 станціями за 10 років:

- Рік 1: 1680 МВт·год
- Рік 10: 4536 МВт·год (при утилізації 45%)
- Сумарно за 10 років: 30 240 МВт·год

Викиди CO₂ від споживання електроенергії: $30\,240 \times 0,42 = 12\,701$ т CO₂-екв.

Проте необхідно врахувати позитивний екологічний ефект: заміщення поїздок на автомобілях з ДВЗ електромобілями. За даними дослідження, 1 кВт·год зарядки замінює 0,25 л бензину . Скорочення викидів:

$$\Delta CO_2 = 30240 \times 0,25 \times 2,31 = 17464 \text{ т } CO_2$$

де 2,31 кг CO₂/л – емісійний фактор бензину.

Чисте скорочення викидів за 10 років: +4763 т CO₂ (позитивний екологічний ефект).

Етап 4. Утилізація. Після закінчення терміну служби (15-20 років) обладнання підлягає переробці. Рівень рециркуляції міді (50% маси електроніки), алюмінію (25%) та сталі (20%) становить 75-85% згідно з директивою ЄС WEEE . Викиди від демонтажу та переробки: 1,2 т CO₂-екв на станцію (8,4 т CO₂-екв для 7 станцій).

Таблиця 3

Зведена оцінка життєвого циклу проєкту

Етап	Викиди CO ₂ -екв, т	Частка, %
Виробництво обладнання	+84,7	-
Транспортування та монтаж	+19,6	-
Експлуатація (споживання електроенергії)	+12 701	-
Разом викиди	12 805,3	100
Скорочення викидів (заміщення ДВЗ)	-17 464	-
Чистий екологічний ефект	-4658,7	-
Утилізація	+8,4	-
ПІДСУМОК LCA (10 років)	-4650,3 т CO ₂	-

Джерело: власні розрахунки

Проєкт має позитивний екологічний баланс: за 10 років експлуатації уникнено 4650 т CO₂, що еквівалентно вилученню 1010 легкових автомобілів з ДВЗ з експлуатації протягом року або посадці 232 тис. дерев .

6. Соціальні аспекти та безпека праці. Будівництво та експлуатація 7 станцій створить 28 робочих місць (будівництво – тимчасово, обслуговування – 14 постійних, технічна підтримка – 8, адміністрування – 6).

З точки зору безпеки праці, експлуатація високовольтного обладнання (DC 400-1000 В) вимагає дотримання НПА ОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок». Ключові ризики:

- Ураження електричним струмом при обслуговуванні (ймовірність: низька при дотриманні процедур)
- Пожежа літій-іонних батарей під час зарядки (ймовірність: 0,01% на подію зарядки)
- Травми при ДТП біля зарядних станцій

Рекомендовано: сертифікація персоналу за групою електробезпеки IV, встановлення систем автоматичного пожежогасіння, розміщення станцій на відстані >25 м від проїзної частини.

Таким чином, розвиток мережі зарядних станцій на магістралі М-06 (7 нових станцій DC 150 кВт) забезпечить 100% покриття траси згідно з вимогами AFIR та стимулюватиме міжміську електромобільність. Проєкт є економічно ефективним: NPV = 68,8 млн грн, IRR = 34,2%, термін окупності – 4,8 років. Критичним фактором успіху є досягнення базової утилізації >20% у перший рік. Оцінка життєвого циклу показала позитивний екологічний ефект: чисте скорочення викидів CO₂ на 4650 т за 10 років завдяки заміненню автомобілів з ДВЗ, що підтверджує внесок проєкту у досягнення цілей сталого розвитку транспорту. Соціальний ефект: створення 28 робочих місць, підвищення доступності екологічного транспорту, покращення зв'язності західних регіонів з ЄС через коридор TEN-T. Рекомендовано впровадження системи менеджменту безпеки праці ISO 45001 для мінімізації ризиків при експлуатації високовольтного обладнання.

1. Українська енергетика. В Україні на третину зріс попит на електромобілі. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/v-ukraini-na-tretynu-zris-popyt-na-elektromobili> (дата звернення: 27.10.2025).
2. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: ISO, 2006. 20 p.
3. Wikipedia. Автошлях М06. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Автошлях_М06 (дата звернення: 26.10.2025).
4. ОККО. ОККО встановила ще 24 Ultra Fast Chargers на 19 АЗК. URL: <https://www.okko.ua/okko-vstanovila-she-24-ultra-fast-chargers-na-19-azk-elektromobilistam-stalo-prostishe-podorozhuvati-mizh-mistami> (дата звернення: 27.10.2025).
5. AMPECO. How AFIR reshapes the EV charging business in Europe. URL: <https://www.ampco.com/blog/how-afir-reshapes-ev-charging-business/> (дата звернення: 27.10.2025).
6. Church R., ReVelle C. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*. 1974. Vol. 32. P. 101-118.
7. Tesla. Model 3 specifications. URL: <https://www.tesla.com/model3> (дата звернення: 26.10.2025).
8. European Alternative Fuels Observatory. Charging infrastructure investment costs. Brussels: EAFO, 2024. 42 p.
9. Hawkins T. R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A. H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*. 2013. Vol. 17(1). P. 53-64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
10. НЕК «Укренерго». Звіт про вуглецеву інтенсивність електроенергії. Київ, 2025. 18 с.
11. Lutsey N., Nicholas M. Update on electric vehicle costs in the United States through 2030. The International Council on Clean Transportation. 2019. Working Paper 2019-06. 24 p.
12. Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*. 2012. L 197. P. 38-71.
13. EPA. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. URL: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator> (дата звернення: 28.10.2025).
14. НПА ОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок. Київ: Держнаглядохоронпраці, 1998. 264 с.
15. Liao Z., Zhang S., Li K., Zhao M. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2019. Vol. 436. Article 226879.