

DOI: <https://doi.org/10.32782/city-development.2026.1-3>

УДК 330.101.541:311:629.331.72

АНАЛІТИЧНО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ: ГАРМОНІЗАЦІЯ КАПІТАЛОЄМНОСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО СТАРІННЯ¹

Вороненко В'ячеслав Ігорович

кандидат економічних наук, доцент,
старший викладач кафедри економіки,
підприємництва та бізнес-адміністрування
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0301-5924>

Мельник Леонід Григорович

доктор економічних наук, професор,
професор кафедри економіки, підприємництва
та бізнес-адміністрування
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7824-0678>

Маценко Олександр Михайлович

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри економіки, підприємництва
та бізнес-адміністрування
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-2811>

Гриценко Ігор Костянтинович

студент
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3432-5476>

Борисенко Олександра Валентинівна

студентка
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6983-5938>

Анотація. Виробництво електромобілів характеризується часовим дисбалансом між довгостроковими капіталомісткими інвестиціями у гігафабрики та короткими інноваційними циклами розвитку батарейних технологій, що підвищує ризики морального старіння активів. Метою статті є розроблення концептуальної моделі гармонізації капіталоємності та технологічного старіння у виробництві електромобілів шляхом інтеграції технологій Індустрії 4.0 та інструментів штучного інтелекту. Обґрунтовано, що традиційна стратегія зниження собівартості на основі ефекту масштабу втрачає ефективність в умовах технологічної турбулентності. Запропоновано гібридну модель управління виробничими потужностями, орієнтовану на оптимізацію часу, яка знижує темпи морального старіння основних фондів і підвищує інвестиційну привабливість проектів у галузі електромобілів.

Ключові слова: електромобілі, капіталоємність, технологічне старіння, Індустрія 4.0, штучний інтелект, гігафабрики.

¹ Робота виконана в рамках НДР «Фундаментальні засади сталого та інклюзивного розвитку регіонального простору для повоєнного відновлення в умовах цифрової трансформації» (№ д/р. 0125U001620).



Актуальність проблеми. Глобальний перехід автомобільної промисловості до електричної мобільності супроводжується глибокими структурними змінами у формуванні та використанні основного капіталу. Виробництво електромобілів характеризується високою капіталоємністю, значними довгостроковими інвестиціями у гігафабрики та водночас високими темпами технологічних змін у сфері батарейних технологій і цифрових систем керування. Ключова суперечність розвитку галузі полягає у часовій асиметрії між тривалістю інвестиційного циклу виробничих потужностей (10–15 років) та короткими технологічними циклами оновлення батарейних рішень (3–4 роки). Це підвищує ризики морального старіння активів, знецінення капіталу та зниження інвестиційної ефективності, що актуалізує потребу в нових підходах до управління виробничими потужностями в електромобільній індустрії. В електромобільній індустрії капіталоємність має бути гармонізована не зі зростанням обсягів виробництва, а зі швидкістю технологічного оновлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У наукових дослідженнях електромобільної індустрії значна увага приділяється питанням масштабування виробництва, розвитку батарейних технологій та інфраструктурного забезпечення. Зокрема, Moores (2021) аналізує глобальну конкуренцію у сфері будівництва гігафабрик та пов'язані з нею ризики концентрації виробничих потужностей. Дослідження de Souza et al. (2026) та Xiong et al. (2025) акцентують увагу на вразливості ланцюгів постачання критичних матеріалів та їх впливі на інвестиційну стабільність галузі. Роль штучного інтелекту та цифрових технологій у прискоренні інноваційних циклів розглядається у працях Ahmed et al. (2021) та Attia et al. (2025).

У великому огляді "Battery Technologies and Capacity Prediction" автори аналізують понад 22 000 публікацій для структурування сучасних трендів, технік і напрямків у розвитку батарейних технологій та методів прогнозування їхнього ресурсу, включаючи аспекти переробки та вторинного використання (Sang et al., 2024).

Огляд глобальних трансформацій промислового ланцюга нової енергетичної техніки показує, що структурні і ланцюгові зміни у глобальній автомобільній промисловості істотно впливають на конкурентоспроможність виробництва електромобілів у різних економічних системах, включно з Китаєм, США та ЄС (Wang, 2025).

Дослідження технічних та екологічних аспектів акумуляторів для електромобілів у вітчизняному контексті демонструє значні виклики, пов'язані з видобутком сировини та переробкою відпрацьованих батарей, що має враховуватися при стратегічному плануванні виробництва (Olishevskaya et al., 2025). Крім того, інші вітчизняні

роботи підкреслюють роль цифрової трансформації та цифрових технологій виробництва (Industry 4.0) для підвищення гнучкості та ефективності технологічних процесів у автомобільній галузі. Так, аналіз шляхів інтеграції цифрових рішень у виробничі процеси та організаційно-економічні моделі демонструє зростаючий вплив IT-рішень на стратегічний розвиток автомобільних підприємств (Skliarenko et al., 2025).

Водночас недостатньо дослідженим залишається питання узгодження часових параметрів капітальних інвестицій і технологічного оновлення виробництва електромобілів, що формує наукову нішу даного дослідження.

Метою статті є обґрунтування концепції гармонізації капіталоємності та технологічного старіння у виробництві електромобілів на основі інтеграції технологій Індустрії 4.0 та інструментів штучного інтелекту з урахуванням часових параметрів інвестиційних і технологічних циклів.

Для досягнення поставленої мети у дослідженні використано такі методи:

- статистико-економічний аналіз для оцінювання динаміки глобальних виробничих потужностей, капітальних інвестицій та цін на критичні матеріали для батарей; порівняльний аналіз для зіставлення строків капітального будівництва гігафабрик і технологічних циклів оновлення батарейних рішень;

- аналіз часових лагів для виявлення асиметрії між інвестиційним циклом основних фондів і темпами технологічного оновлення; економіко-логічне моделювання для формалізації взаємозв'язку між капіталоємністю, моральним старінням активів і ефективністю інвестицій. У межах дослідження застосовано показники капіталоємності виробництва (CAPEX на 1 GWh потужності), коефіцієнт часової асиметрії капіталу, показники утилізації виробничих потужностей, а також середні значення вартості батарейних блоків (USD/kWh).

Інформаційну базу дослідження становили статистичні дані International Energy Agency (IEA), BloombergNEF, U.S. Geological Survey, а також відкриті звіти провідних виробників батарей і електромобілів.

Результати дослідження. Станом на початок 2020-х років близько 148 із 200 глобальних проєктів будівництва гігафабрик перебували під контролем КНР (Moores, 2021). Така концентрація створює структурні ризики для західних виробників, які змушені нарощувати капітальні витрати, намагаючись скоротити технологічне відставання. Масштаб необхідних вкладень для подолання цього розриву ілюструють дані про капітальні інвестиції деяких західних провідних гравців ринку (табл. 1).

Спостерігається суттєвий часовий дисбаланс: запуск шахт з видобутку літію чи нікелю потре-

бує 7–10 років, тоді як будівництво батарейних заводів потребує 2–4 роки. Цей асиметричний лаг у часі формує дефіцити сировини, волатильність цін і підвищує невизначеність для виробників електромобілів (de Souza et al., 2026). Наслідком цього розриву стала екстремальна цінова волатильність сировинних ринків. Як продемонстровано на рис. 1, пікове зростання цін на літій у 2022 році (більш ніж у 4 рази) стало прямим результатом нездатності видобувної галузі швидко реагувати на попит.

Основний капітал містить «упредметнену працю», тобто матеріалізований час минулих періодів. Для виробника електромобілів критичними є три форми часу: потенційний (R&D цикл), поточний (виробничий цикл), минулий (інвестиції у фізичну інфраструктуру). Моральне старіння виникає тоді, коли апаратна частина застаріває швидше, ніж переносить свою вартість на продук-

цію (Moores, 2021). З метою формалізації часової суперечності між капіталомісткими інвестиціями та швидкими інноваційними циклами у виробництві електромобілів запропоновано коефіцієнт часової асиметрії капіталу:

$$K_{ta} = \frac{T_{cap}}{T_{tech}},$$

де T_{cap} – середній строк економічної експлуатації капітальних активів (гігафабрик, виробничого обладнання, інфраструктури), років; T_{tech} – середня тривалість технологічного циклу оновлення ключових батарейних та цифрових технологій, років.

Економічний зміст показника K_{ta} полягає у кількісному відображенні розриву між «повільним» часом фізичного капіталу та «швидким» часом технологічних інновацій. За умови $K_{ta} > 1$ виникає ефект прискореного морального ста-

Таблиця 1 – Оголошені капітальні інвестиції у ключові проекти гігафабрик

Проект	Оголошені інвестиції (млрд)	Потужність (GWh/рік)
CATL, Debrecen (Угорщина)	€ 7,34	100
CATL, Thuringia (Німеччина)	€ 1,80	14
Tesla, Gigafactory (Nevada)	\$6,2 (вже інвестовано) + \$3,6 (нове)	37
Northvolt, Ett (Швеція)	\$8,0	42

Джерело: [12–16]

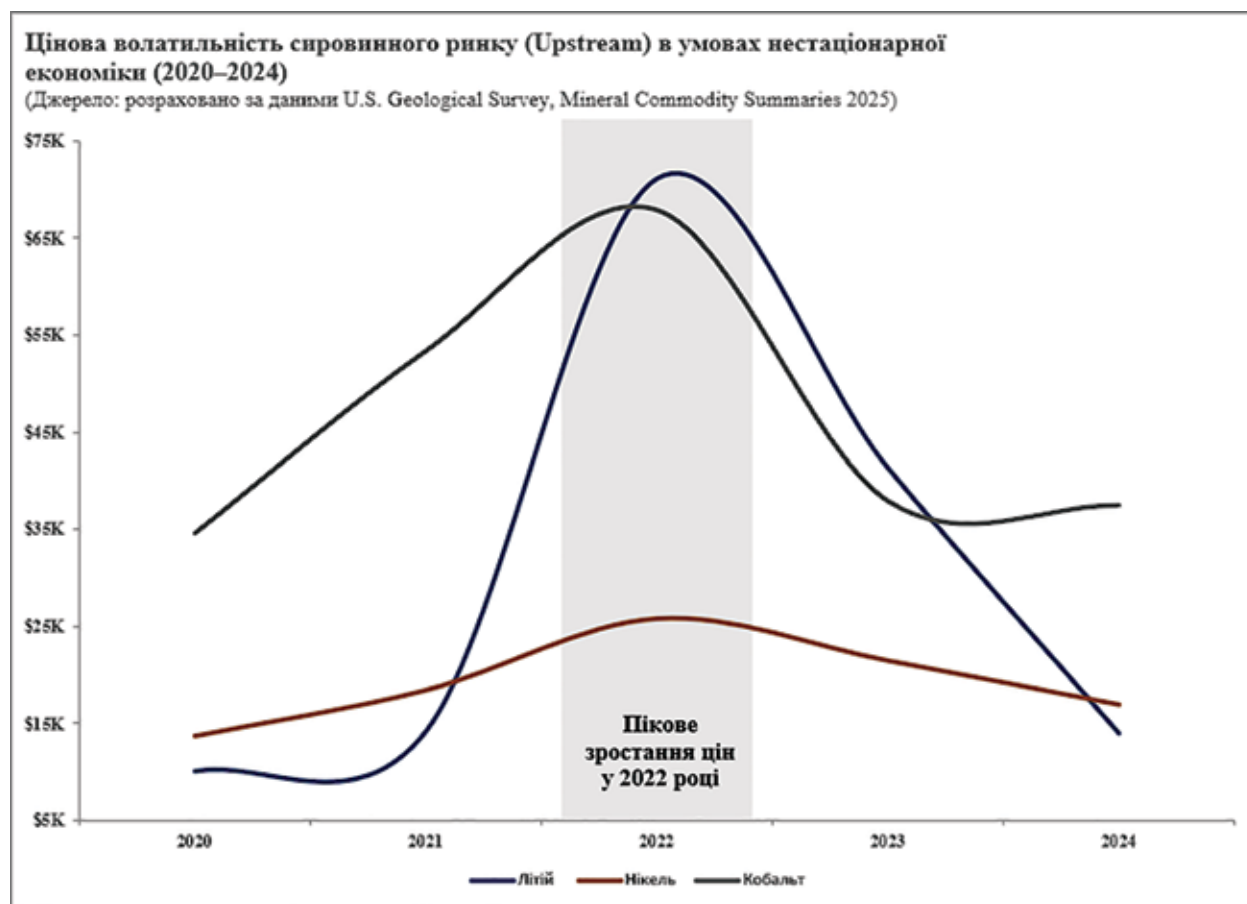


Рисунок 1 – Динаміка цін на критичні метали для батарей (USD/т), 2020–2024 рр.

ріння активів, оскільки технологічне оновлення відбувається швидше, ніж повна амортизація інвестованого капіталу.

Для електромобільної індустрії характерні значення $T_{cap} = 10\text{--}15$ років та $T_{tech} = 3\text{--}5$ років, що формує значення коефіцієнта K_{ta} у межах $2,0\text{--}5,0$. Це свідчить про структурно високий рівень часової асиметрії та підвищені ризики зниження чистої приведеної вартості (NPV) інвестиційних проєктів за умов зростання ставки дисконтування.

На ринку електромобілів ставка дисконтування суттєво зростає через високу невизначеність, коливання попиту та геополітичні чинники (de Souza et al., 2026). Збільшення тривалості циклу капітального будівництва експоненційно зменшує NPV проєктів. Додатковим фактором ризику є падіння рівня утилізації активів. Дані на рис. 2 свідчать про зростаючий розрив між номінальними потужностями заводів та реальним попитом, що призводить до простою обладнання та погіршення показників окупності.

У секторі виробництва електромобілів існує конфлікт ритмів: мікроритми (операції конвеєра), макроритми (інноваційні цикли у хімії батарей та електроніці, 3–5 років) (Das et al., 2023). Технологічна стратегія має забезпечувати узгодження цих ритмів через автоматизацію та роботизацію (Keshinro, 2024).

Традиційна модель зниження собівартості, що базувалася виключно на ефекті масштабу (Economies of Scale), продемонструвала свою вразливість. Як видно з рис. 3, у 2022 році вперше за десятиліття спостерігалось зростання вартості батарейного блоку (до $\$151/\text{kWh}$) внаслідок сировинних шоків, що підтверджує необхідність переходу до технологічної оптимізації.

Технологічна оптимізація може включати методи машинного навчання. Вони дозволяють моделювати властивості матеріалів та оптимізувати хімічні формули батарей без численних фізичних експериментів (Attia et al., 2025). Це значно скорочує час розробки. Але жорсткі автоматизовані лінії погано реагують на технологічні зміни. Тут може допомогти використання колаборативної робототехніки, що дозволить швидко переналаштовувати виробництво під нові фактори батарей (Keshinro, 2024) і зменшити ризики морального старіння апаратної частини. Крім цього, програмні OTA-оновлення дають змогу підтримувати актуальність продукту без механічних втручань. Це подовжує економічний ресурс основних фондів та зменшує потребу у частих капітальних модернізаціях. Штучний інтелект створює механізм «часового арбітражу»: він скорочує тривалість R&D та подовжує життєвий цикл продукту через OTA (Attia et al., 2025). Запропоновані підходи не потребують повної

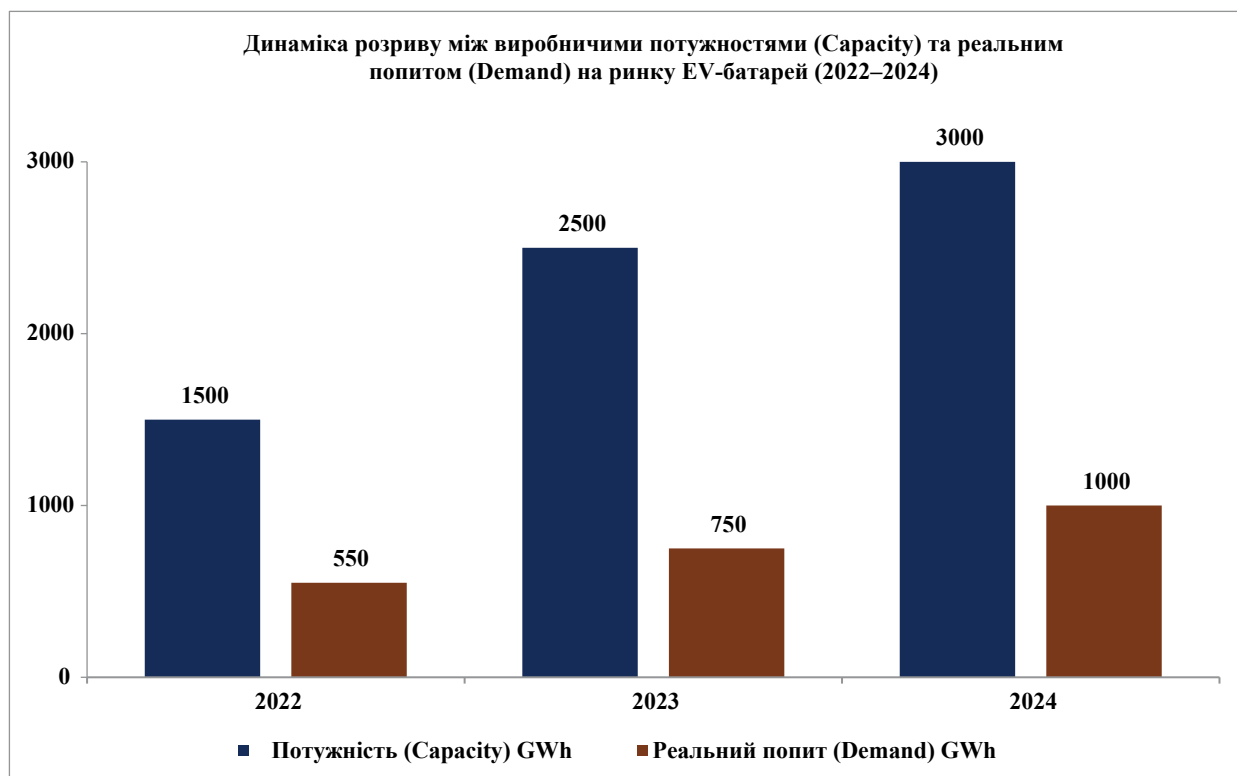


Рисунок 2 – Співвідношення глобальних потужностей та реального виробництва батарей, 2022–2024 рр.

Джерело: IEA Global EV Outlook

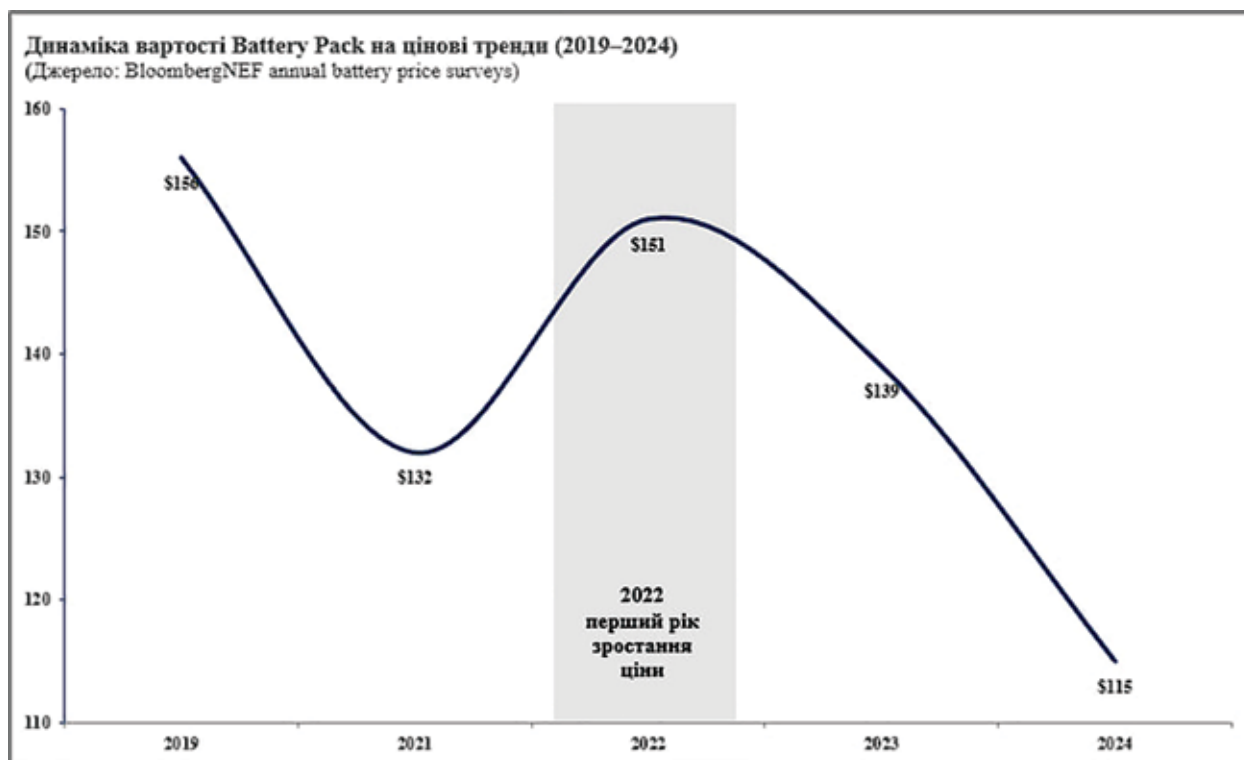


Рисунок 3 – Динаміка середньої ціни Battery Pack (USD/kWh), 2019–2024 рр.

заміни виробничої інфраструктури, а можуть бути впроваджені еволюційно в межах існуючих гіга-фабрик, що підвищує їх практичну застосовність.

У класичній економічній теорії капітал розглядається як накопичена у матеріальній формі праця, що переносить свою вартість на продукт у часі. В умовах високотехнологічного виробництва електромобілів часовий фактор набуває ключового значення, оскільки ефективність капіталу визначається не лише його фізичним зносом, а й темпами технологічного оновлення.

На відміну від традиційного автомобілебудування з двигунами внутрішнього згорання, де технологічні цикли мають відносно інерційний характер, електромобільна індустрія функціонує в режимі прискорених інноваційних ритмів. Скорочення циклів розробки батарейних хімії, електроніки та програмного забезпечення призводить до ситуації, за якої виробничі потужності можуть морально застарівати ще до завершення нормативного строку їх амортизації.

За таких умов ефективність інвестованого капіталу дедалі більше залежить від здатності виробничих систем адаптуватися до змін технологічних стандартів. Це зумовлює перехід від просторової оптимізації виробництва, орієнтованої на нарощування масштабів, до часової оптимізації, яка передбачає скорочення інноваційних лагів, підвищення гнучкості виробничих ліній та подовження економічного життєвого циклу активів.

Таким чином, час виступає самостійним економічним ресурсом, управління яким стає

ключовим чинником підвищення інвестиційної ефективності у виробництві електромобілів. Порівняльна оцінка часових параметрів капіталу та технологічного оновлення для різних типів транспортних засобів наведена у табл. 2, що дозволяє кількісно охарактеризувати масштаби часової асиметрії у електромобільній індустрії.

Дані, наведені в табл. 2, підтверджують наявність суттєвих відмінностей у часових параметрах функціонування капіталу залежно від технологічної платформи виробництва транспортних засобів. Для автомобілів з двигунами внутрішнього згорання характерний відносно низький рівень часової асиметрії, що зумовлено повільними темпами технологічних змін та близькістю строків фізичного і морального зносу основних фондів.

Перехід до гібридних технологій супроводжується зростанням коефіцієнта часової асиметрії, що відображає прискорення інноваційних циклів за збереження значної капіталомісткості виробничої інфраструктури. Найвищі значення показника K_{ta} характерні для електромобільного виробництва, де короткі цикли оновлення батарейних і цифрових технологій вступають у суперечність із тривалими строками економічної експлуатації гігафабрик.

Високі значення коефіцієнта часової асиметрії свідчать про підвищені ризики морального старіння капіталу, зростання недовантаження виробничих потужностей та зниження ефективності інвестиційних проектів у довгостроковій перспективі. За таких умов традиційні підходи до управління виробництвом, орієнтовані виключно на

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика часових параметрів капіталу та технологічного оновлення у виробництві транспортних засобів

Тип транспортного засобу	Строк економічної експлуатації капіталу (Tcap), років	Середній технологічний цикл оновлення (Ttech), років	Коефіцієнт часової асиметрії, (Kta)	Економічна інтерпретація
Автомобілі з ДВЗ	12–15	8–10	1,2–1,9	Низький рівень часової асиметрії; моральне старіння близьке до фізичного
Гібридні транспортні засоби	10–14	5–7	1,5–2,8	Помірна асиметрія; зростає роль гнучкості виробничих систем
Електромобілі	10–15	3–5	2,0–5,0	Висока часова асиметрія; значні ризики морального старіння капіталу
Електромобілі з інтеграцією Industry 4.0 та ШІ	10–15	4–6*	1,7–3,8	Часткова гармонізація часових циклів за рахунок цифрової гнучкості

* Збільшення ефективного Ttech досягається за рахунок модульності виробництва, програмних OTA-оновлень та використання інструментів штучного інтелекту.

Джерело: розраховано авторами на основі узагальнення даних IEA, BloombergNEF та аналітичних оглядів галузі.

досягнення ефекту масштабу, виявляються недостатніми.

Водночас інтеграція технологій Індустрії 4.0 та інструментів штучного інтелекту дозволяє частково знизити рівень часової асиметрії шляхом підвищення гнучкості виробничих систем, подовження ефективного технологічного циклу та уповільнення темпів морального старіння основних фондів. Це створює передумови для переходу до моделі управління капіталом, у якій ключовим критерієм ефективності стає не лише обсяг виробництва, а здатність підприємства адаптуватися до змін технологічних стандартів у часі.

Висновки. Встановлено, що у виробництві електромобілів формується стійка часова асиметрія між тривалими інвестиційними циклами капіталомісткої виробничої інфраструктури та короткими циклами технологічного оновлення батарейних і цифрових рішень. Ця асиметрія є системною характеристикою галузі та істотно впливає на ефективність використання основного капіталу.

Запропонований у дослідженні коефіцієнт часової асиметрії капіталу дозволяє кількісно оцінити ступінь розриву між строками економічної експлуатації основних фондів і тривалістю технологічних циклів. Порівняльний аналіз свідчить, що для електромобільного виробництва характерні найвищі значення коефіцієнта часової асиметрії капіталу (2,0–5,0), що суттєво перевищує відповідні параметри для традиційних автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння та гібридних транспортних засобів.

Високий рівень часової асиметрії обумовлює зростання ризиків морального старіння капіталу, зниження коефіцієнта завантаження виробничих потужностей та погіршення показників інвестиційної ефективності, зокрема чистої приведеної вартості проектів у умовах підвищеної ставки дисконтування. За таких обставин традиційна стратегія зниження собівартості на основі ефекту масштабу виявляється недостатньою для забезпечення довгострокової економічної стійкості виробництва електромобілів.

Обґрунтовано, що інтеграція технологій Індустрії 4.0 та інструментів штучного інтелекту створює передумови для часткової гармонізації часових параметрів капіталу і технологічного оновлення. Використання гнучких кіберфізичних виробничих систем, модульних технологічних рішень та програмних OTA-оновлень дозволяє подовжити ефективний технологічний цикл, знизити темпи морального старіння апаратної частини та зменшити значення коефіцієнта часової асиметрії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання коефіцієнта часової асиметрії капіталу як аналітичного інструменту при обґрунтуванні інвестиційних рішень у проектах гігафабрик, а також при розробленні стратегій управління виробничими потужностями в умовах високої технологічної турбулентності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на емпіричну апробацію запропонованого показника на рівні окремих підприємств та регіональних виробничих кластерів.

Бібліографічний список:

1. Ahmed M., Zheng Y., Amine A., Fathiannasab H., Chen Z. The role of artificial intelligence in the mass adoption of electric vehicles. *Joule*. 2021. Vol. 5, No. 9. P. 2296–2322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.012>
2. Das P. Strategies for minimizing cycle times in electric vehicle manufacturing. Zenodo. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14498275>
3. Attia P.M., Moch E., Herring P.K. Challenges and opportunities for high-quality battery production at scale. *Nature Communications*. 2025. № 16. Article number: 611. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-55861-7>
4. Keshinro, Babatunde. The Future of Electric Vehicle Assembly Lines: Leveraging Advanced Technologies for Improved Productivity and Safety. 2024. URL: <https://ssrn.com/abstract=4883666>
5. de Souza R. G., Domingues A. M., Mancini S. D. Supply of critical raw materials for lithium-ion batteries: Social and environmental risks in Brazil. *The Extractive Industries and Society*. 2026. № 25. Article 101810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101810>
6. Moores S. The global battery arms race: lithium-ion battery gigafactories and their supply chain. *Oxford Energy Forum*. 2021. No. 126. P. 26–30. URL: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2021/02/THE-GLOBAL-BATTERY-ARMS-RACE-LITHIUM-ION-BATTERY-GIGAFACTORIES-AND-THEIR-SUPPLY-CHAIN.pdf>
7. Xiong W., Wu D. D., Yeung J. H. Y. Semiconductor supply chain resilience and disruption: insights, mitigation, and future directions. *International Journal of Production Research*. 2025. № 63(9). P. 3442–3465. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2387074>
8. Sang V. T. D., Duong Q. H., Zhou L., Arranz C. F. A. Electric Vehicle Battery Technologies and Capacity Prediction: A Comprehensive Literature Review of Trends and Influencing Factors. *Batteries*. 2024. № 10(12). Article number 451. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10120451>
9. Wang X. The Global Evolution of the New Energy Vehicle Industrial Chain and China's Transformation: A Literature Review on "Chip Shortages and Soaring Battery Costs". *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. 2025. № 157. P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2025.AB22453>
10. Olishevska V. E., Olishevskiy H. S., Ivanova H. P. Electric Vehicle Batteries: Technical and Environmental Aspects. *Science and Transport Progress*. 2025. № 2(110). P. 35–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332155>
11. Skliarenko O., Skliarenko O., Vilianskyi A., Frolov I. Analysis of digital technology integration paths into production processes and organizational-economic models to ensure sustainable development of the automotive industry in Ukraine. *Kyiv Economic Scientific Journal*. 2025. № 9. P. 239–247. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-32>
12. U.S. Geological Survey. *Mineral commodity summaries 2025*. Reston, VA. 2025. 212 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2025>
13. CATL. CATL announces battery plant investment in Debrecen. URL: <https://catl.com/en/news/983.html>
14. CATL. CATL expands European production capacity. URL: <https://www.catl.com/en/news/1046.html>
15. Tesla. Continuing our investment in Nevada Gigafactory. URL: <https://www.tesla.com/blog/continuing-our-investment-nevada>
16. European Investment Bank. Northvolt Ett battery gigafactory project. URL: <https://www.eib.org/en/projects/all/20220461>
17. International Energy Agency. *Global EV Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>
18. International Energy Agency. *Global EV Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-battery-and-energy-demand>
19. BloombergNEF. Battery industry enters a new phase. URL: <https://www.iea.org/commentaries/the-battery-industry-has-entered-a-new-phase>
20. BloombergNEF. Battery pack prices fall to an average of \$132/kWh. URL: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>
21. BloombergNEF. Lithium-ion battery pack prices see largest drop since 2017. URL: <https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/>
22. BloombergNEF. Top 10 energy storage trends in 2023. URL: <https://about.bnef.com/insights/finance/top-10-energy-storage-trends-in-2023/>

References:

1. Ahmed M., Zheng Y., Amine, A., Fathiannasab H. & Chen Z. (2021). The role of artificial intelligence in the mass adoption of electric vehicles. *Joule*, no. 5(9), pp. 2296–2322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.012>
2. Das P. (2023). *Strategies for minimizing cycle times in electric vehicle manufacturing*. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14498275>

3. Attia P. M., Moch E. & Herring P. K. (2025). Challenges and opportunities for high-quality battery production at scale. *Nature Communications*, no. 16, Article 611. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-55861-7>
4. Keshinro B. (2024). *The future of electric vehicle assembly lines: Leveraging advanced technologies for improved productivity and safety*. SSRN. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4883666>
5. de Souza R. G., Domingues A. M. & Mancini S. D. (2026). Supply of critical raw materials for lithium-ion batteries: Social and environmental risks in Brazil. *The Extractive Industries and Society*, no. 25, Article 101810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101810>
6. Moores S. (2021). The global battery arms race: Lithium-ion battery gigafactories and their supply chain. *Oxford Energy Forum*, no. 126, pp. 26–30. Available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2021/02/THE-GLOBAL-BATTERY-ARMS-RACE-LITHIUM-ION-BATTERY-GIGAFACTORIES-AND-THEIR-SUPPLY-CHAIN.pdf>
7. Xiong W., Wu D. D. & Yeung J. H. Y. (2025). Semiconductor supply chain resilience and disruption: Insights, mitigation, and future directions. *International Journal of Production Research*, no. 63(9), pp. 3442–3465. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2387074>
8. Sang V. T. D., Duong Q. H., Zhou L. & Arranz C. F. A. (2024). Electric vehicle battery technologies and capacity prediction: A comprehensive literature review of trends and influencing factors. *Batteries*, no. 10(12), Article 451. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10120451>
9. Wang, X. (2025). The global evolution of the new energy vehicle industrial chain and China's transformation: A literature review on "chip shortages and soaring battery costs". *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, no. 157, pp. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2025.AB22453>
10. Olishkevskaya V. E., Olishkevskiy H. S. & Ivanova H. P. (2025). Electric vehicle batteries: Technical and environmental aspects. *Science and Transport Progress*, no. 2(110), pp. 35–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332155>
11. Skliarenko O., Skliarenko O., Vilianskyi A. & Frolov I. (2025). Analysis of digital technology integration paths into production processes and organizational-economic models to ensure sustainable development of the automotive industry in Ukraine. *Kyiv Economic Scientific Journal*, no. 9, pp. 239–247. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-32>
12. U.S. Geological Survey. (2025). *Mineral commodity summaries 2025*. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2025>
13. CATL. (n.d.). *CATL announces battery plant investment in Debrecen*. Available at: <https://www.catl.com/en/news/983.html>
14. CATL. (n.d.). *CATL expands European production capacity*. Available at: <https://www.catl.com/en/news/1046.html>
15. Tesla. (n.d.). *Continuing our investment in Nevada Gigafactory*. Available at: <https://www.tesla.com/blog/continuing-our-investment-nevada>
16. European Investment Bank. (n.d.). *Northvolt Ett battery gigafactory project*. Available at: <https://eib.org/en/projects/all/20220461>
17. International Energy Agency. (2023). *Global EV outlook 2023*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>
18. International Energy Agency. (2024). *Global EV outlook 2024*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-battery-and-energy-demand>
19. BloombergNEF. (n.d.). *The battery industry has entered a new phase*. Available at: <https://www.iea.org/commentaries/the-battery-industry-has-entered-a-new-phase>
20. BloombergNEF. (n.d.). *Battery pack prices fall to an average of \$132/kWh*. Available at: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>
21. BloombergNEF. (n.d.). *Lithium-ion battery pack prices see largest drop since 2017*. Available at: <https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/>
22. BloombergNEF. (n.d.). *Top 10 energy storage trends in 2023*. Available at: <https://about.bnef.com/insights/finance/top-10-energy-storage-trends-in-2023/>

ANALYTICAL-STATISTICAL MODEL OF ELECTRIC VEHICLE PRODUCTION: HARMONIZATION OF CAPITAL INTENSITY AND TECHNOLOGICAL OBSOLESCENCE

Viacheslav Voronenko

PhD, Associate Professor, Senior Lecturer
of the Department of Economics, Entrepreneurship
and Business Administration
Sumy State University

Leonid Melnyk

Doctor of Sciences (Economics), Professor,
Professor of the Department of Economics,
Entrepreneurship and Business Administration
Sumy State University

Oleksandr Matsenko

PhD, Docent, Associate Professor
of the Department of Economics, Entrepreneurship
and Business Administration
Sumy State University

Ihor Hrytsenko

Student
Sumy State University

Oleksandra Borysenko

Student
Sumy State University

Summary. The rapid transition of the automotive industry toward electric mobility has fundamentally altered the structure of capital investment. Electric vehicle production is characterized by a growing mismatch between long-term capital-intensive investments in gigafactories and short technological life cycles driven by rapid battery innovation. This temporal asymmetry increases the risks of technological obsolescence and capital depreciation before full amortization is achieved. The purpose of this study is to develop a conceptual framework for harmonizing capital intensity and technological aging in electric vehicle manufacturing through the integration of Industry 4.0 technologies and artificial intelligence tools. The research is based on statistical analysis of global battery production capacity, capital expenditure data, and commodity price dynamics for critical battery materials. The results demonstrate that traditional cost-reduction strategies based solely on economies of scale are insufficient under conditions of technological turbulence and high discount rates. The study substantiates the shift toward time-oriented optimization, emphasizing flexible cyber-physical production systems, modular manufacturing, and over-the-air software updates as mechanisms for extending the economic life of fixed assets. The proposed hybrid model reduces the pace of moral depreciation and enhances investment efficiency in electric vehicle production.

Keywords: electric vehicles, capital intensity, technological obsolescence, Industry 4.0, artificial intelligence, gigafactories, time-based optimization.

Дата надходження статті: 03.02.2026

Дата прийняття статті: 26.02.2026

Дата публікації статті: 09.03.2026