

УДК 330.342:656.03:620.92

Класифікатор JEL L94, R42, Q42, O13

Вікторія Яновська, д.е.н., професор

(завідувач кафедри економіки, маркетингу та бізнес-адміністрування, Національний транспортний університет)

ORCID 0000-0002-0648-3643

Анастасія Устіловська, PhD, доцент

(доцент кафедри економіки, маркетингу та бізнес-адміністрування, Національний транспортний університет)

ORCID 0000-0002-9297-7614

Ренат Зіганишин

(здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, Національний транспортний університет)

ORCID 0009-0004-0339-0814

Максим Салімовський

(здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, Національний транспортний університет)

ORCID 0009-0009-9727-9063

ЕКОНОМІЧНІ МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ АКТИВІВ В ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ

Стаття присвячена узагальненню моделей інтеграції транспортних активів в енергетичні системи на основі емпіричного аналізу міжнародних практик двадцяти країн світу. Досліджено трансформацію транспортного сектору, за якої рухомий склад та інфраструктура розглядаються як активи, здатні надавати енергетичні послуги і формувати нові моделі створення вартості. Порівняльний аналіз проведено за технічними та економічними характеристиками в межах трьох концепцій: використання транспорту як мобільного накопичувача (V2G/V2X), транспортної інфраструктури як елемента генерації (I2G, включаючи фотовольтаїку та рекуперацію) та збору розсіяної енергії з дорожнього покриття (energy harvesting). Доведено, що цифрова агрегація цих розподілених ресурсів у віртуальні електростанції (BES) та смарт-мережі дозволяє виходити на оптові ринки електроенергії. Класифіковано ключові економічні механізми монетизації за чотирма напрямками: капіталізація активів із низьким коефіцієнтом завантаження, інтерналізація позитивних екстерналій, багатостороння диверсифікація доходів, а також визначено інституційні моделі управління та фінансування проєктів. Виокремлено регуляторні, інституційні, інвестиційні та технічні бар'єри масштабування таких технологій. Окрему увагу приділено стратегічним перспективам України. Обґрунтовано, що за умов низького приватного попиту, дефіциту капіталу та комунальної власності на інфраструктуру, для країни найбільш ефективними є інфраструктурно орієнтовані рішення.

© Яновська В.П., Устіловська А.С., Зіганишин Р.А., Салімовський М.В., 2026

Визначено три пріоритетні напрями для впровадження в межах повоєнного відновлення: рекуперація енергії гальмування міського електротранспорту, дахова фотовольтаїка на об'єктах депо та двонаправлена зарядка муніципальних автопарків. Реалізація цих рішень підвищить національну енергетичну безпеку завдяки децентралізації.

Ключові слова: сталий розвиток, ефективність, електротранспорт, інтелектуальні транспортні системи, альтернативна енергетика, циркулярна економіка, прогнозування, економічні моделі, економічні механізми.

Постановка проблеми. Розвиток інтелектуальних транспортних та енергетичних систем розширює функціональні можливості транспортного сектору. Поряд із традиційною функцією споживання енергії транспортна інфраструктура та рухомий склад розглядаються як енергетичні активи, що створюють можливості для отримання додаткових економічних вигід завдяки накопиченню, передачі та гнучкому використанню енергоресурсів. Така трансформація формує передумови для виникнення у транспортному секторі нових моделей створення вартості, за яких економічний результат від надання транспортних послуг доповнюється доходами від участі транспортних активів у функціонуванні енергетичної системи шляхом надання енергетичних послуг. У зв'язку з цим актуалізується потреба в дослідженні економічних механізмів реалізації такого потенціалу, зокрема механізмів формування доходів, оцінювання економічної ефективності та обґрунтування моделей управління транспортними активами в інтегрованих транспортно-енергетичних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичний аналіз дозволяє виділити три основні напрями інтеграції транспорту до енергетичної системи, які передбачають використання транспортних активів як мобільних накопичувачів енергії (концепція від транспортного засобу до мережі – англ. *vehicle-to-grid* V2G, від транспортного засобу до всього – англ. *vehicle-to-everything* V2X), елементів інфраструктури енергогенерації (від інфраструктури до мережі – англ. *infrastructure-to-grid* I2G) та засобів збору розсіяної енергії з дорожнього покриття (англ. *energy harvesting*). Спільною характеристикою цих підходів є їх інтеграція в інтелектуальні енергетичні системи, зокрема смарт-мережі (англ. *smart grid*) та віртуальні електростанції, що забезпечують координацію потоків енергії та взаємодію транспорту і енергетичної інфраструктури [17, 18].

Метою статті є узагальнення моделей інтеграції транспортних активів в енергетичні системи на основі емпіричного аналізу міжнародних практик. Емпіричною основою дослідження стали документально підтверджені практики двадцяти країн, проаналізовані за двома взаємопов'язаними вимірами – технічними (інженерними) та економічними характеристиками (джерелами формування доходів або економії, потребами в інвестиціях, моделями управління). Порівняльний аналіз міжнародного досвіду потребував врахування національних економічних і енергетичних особливостей. Зокрема, було враховано, що Японія характеризується зниженням частки низьковуглецевої генерації після аварії на АЕС «Фукусіма» (з 19,4% (2010) до 5,8% (2012) за майже незмінного ВВП), що істотно вплинуло на структуру її енергетичного балансу. Індія суттєво відрізняється від інших країн вибірки рівнем економічного розвитку та продуктивності праці (ВВП Індії на одного зайнятого у 2024 році складає близько 5700 доларів США, що приблизно вчетверо менше за найближчий показник вибірки). Сінгапур, як місто-держава з обмеженими природними ресурсами, функціонує в умовах високої залежності від природного газу (частка чистої енергії 2,1–2,6%). Такі структурні особливості не зменшують аналітичної цінності відповідних кейсів, проте обмежують можливість їх прямого порівняння з іншими країнами без урахування відмінностей у макроекономічних і енергетичних передумовах.

Основні результати дослідження. Транспортний засіб як мобільний накопичувач (V2G/V2X). Перша концепція представлена найширше і в економічному сенсі є найбільш

зрілою. Її логіка ґрунтується на спостереженні, що приватний або службовий електротранспорт простоює 80–90% доби, і в цей час його батарея може надавати мережі платні послуги без шкоди для мобільності. Данський проєкт Parker першим експериментально підтвердив, що серійні електромобілі різних марок здатні надавати мережі послугу підтримання частоти (FCR), реагуючи на запити швидко та точно. Пов'язаний із проєктом комерційний хаб у Копенгагені бере участь у ринку резервів частоти з 2016 року [1]. Оскільки в межах цього проєкту послугу надавали автомобілі різних виробників за єдиним протоколом, є підстави стверджувати, що дохід від балансування не прив'язаний до конкретної марки та може спиратися на наявний автопарк. Німецькі польові випробування Bidirectional Charging Management одночасно підтвердили дві статті доходу: оптимізацію самоспоживання фотовольтаїки та внутрішньодобовий арбітраж, тобто заробіток на різниці цін між дешевою ніччю та дорогим піком [1]. Австралійський проєкт REVS у Канберрі перетворив автопарк із 51 електромобіля Nissan Leaf на джерело доходу. Поки автомобілі припарковані між поїздками, вони надають мережі послугу регулювання частоти (FCAS), їхня очікувана доступність для цього становить близько 70%. У лютому 2024 року 16 підключених автомобілів проєкту вперше у світі підтримали мережу під час аварії [3]. Проєкт співфінансували Агентство відновлюваної енергетики (2,4 млн доларів США) та уряд Австралійської столичної території. В комерціалізації просунулася Франція. Mobilize разом із технологічним партнером The Mobility House запустив для електромобіля Renault 5 послугу двонаправленого заряджання, яка дає змогу повертати енергію в дім і продавати її назад у мережу, монетизуючи віддану електроенергію. За даними компанії, вартість заряджання при цьому в середньому знижується вдвічі [4]. У цьому контексті спроможності окремо взятого автомобіля для оптового ринку є незначущими, тому з економічної точки зору ця модель має більший сенс у випадку агрегації тисяч батарей у єдиний керований ресурс. Рішення для муніципальних і службових автопарків із передбачуванним графіком упроваджують також у США, Канаді та Швеції, а в Японії ще з 2012 року діє побутова система двонаправленого живлення «LEAF to Home». Спільним для цих проєктів є те, що дохід забезпечується за рахунок надання послуг для мережі, а не з продажу енергії, тож він не конкурує з основною, транспортною функцією активу. Для транспорту із регулярним графіком пересування, як-от шкільні автобуси, модель особливо вигідна, бо час простою збігається з періодами, коли мережі потрібні послуги балансування. Водночас економіка двонаправленої зарядки чутлива до додаткового зносу батареї, тому привабливість моделі залежить від того, чи перевищує дохід від послуг вартість прискореної деградації. Саме тому ранні комерційні проєкти зосереджуються на транспортних засобах із передбачуванним пробігом, де цей баланс легше контролювати.

Інфраструктура як джерело генерації (I2G). Друга концепція розглядає транспортну інфраструктуру як генератор. Вона має дві усталені форми, до яких належить фотовольтаїчна генерація на елементах інфраструктури та рекуперація енергії гальмування з поверненням у тягову мережу.

Фотовольтаїчна форма ґрунтується на заміщенні придбаної з мережі електроенергії власною генерацією за нижчою вартістю. У Нідерландах діє сонячна велодоріжка SolaRoad у Кроммені, де половину з двадцяти семи бетонних елементів обладнано сонячними модулями. За даними першого року експлуатації орієнтовна річна віддача найкращих модулів становить 85–90 кіловат-годин з квадратного метра і може зрости приблизно в півтора рази за використання монокристалічних елементів [4]. У Польщі фотовольтаїчні установки інтегровано в систему живлення тролейбусної мережі Гдині [6]. Найбільший масштаб демонструє Китай. Експериментальна сонячна автотраса в Цзінані генерує близько 1 млн кіловат-годин електроенергії на рік із видачею надлишків у мережу. Водночас собівартість дорожнього покриття становить близько 458 доларів за квадратний метр при заявленому терміні експлуатації до 20 років [6]. Аналогічний підхід до масштабування

реалізовано також на першій у країні вуглецево-нейтральній автомагістралі, яка поєднує сонячну та вітрову генерацію із системами накопичення енергії. У той же час досвід КНР демонструє межі економічної доцільності проєкту. Висока вартість спеціального дорожнього покриття наразі перевищує економічний ефект від генерації, тому масштабування технології стримується значними капітальними витратами, а не технічними обмеженнями. Дешевшими та ближчими до окупності є рішення, що використовують уже наявні поверхні, тобто дахи, навіси та шумозахисні екрани, оскільки витрати на їхні конструкції вже виправдані основним цільовим призначенням. Цю тенденцію підтверджує досвід метрополітену Делі (Індія). Розвиток дахових сонячних електростанцій разом із закупівлею потужностей сонячного парку Rewa дозволив збільшити частку відновлюваної енергії в системі до 60%. При цьому собівартість сонячної генерації наразі є нижчою за тариф на електроенергію з мережі. [8]. Подібні установки на дахах станцій, шумозахисних екранах і паркінгах задокументовано також в Австрії, Сінгапурі та Південній Кореї. Визначальним економічним чинником для всіх зазначених рішень є співвідношення собівартості власної генерації та роздрібного мережевого тарифу. За умов високих тарифів і достатньої інсоляції самоспоживання окупається швидко, тоді як постачання надлишків у мережу за нижчою ціною забезпечує значно меншу фінансову ефективність.

Рекуперація енергії гальмування з економічного погляду забезпечує безпосереднє зниження обсягів закупівлі тягової електроенергії завдяки її повторному поверненню в енергосистему. Результати техніко-економічного аналізу свідчать, що максимальна ефективність досягається на ділянках із високою частотою гальмування за умови розміщення накопичувачів безпосередньо на борту рухомого складу або вздовж мережі [9]. Найбільш показовим є досвід метрополітену Делі. Цей об'єкт став першим у світі залізничним проєктом, зареєстрованим у межах Механізму чистого розвитку ООН, що дозволило отримати близько 400 тис. вуглецевих кредитів. Завдяки поверненню приблизно 30% спожитої енергії в контактну мережу для живлення інших потягів на лінії, проєкт забезпечує як щорічну економію на операційних витратах (закупівлі тягової енергії), так і одноразовий дохід від реалізації вуглецевих квот [10].

Вибір між бортовими та стаціонарними накопичувачами є критичним економічним чинником. Стаціонарні рішення, розміщені вздовж мережі, характеризуються нижчими експлуатаційними витратами та є доцільнішими для щільних міських ліній із частими зупинками, тоді як бортові системи є оптимальними для ділянок із нерозвиненою інфраструктурою. У Європі аналогічний підхід інтегровано з елементами розумних мереж (англ. *smart grid*) у тролейбусній системі Гдині. Це дозволяє не лише рекуперувати енергію, а і згладжувати пікові навантаження на тягові підстанції [11]. Подібні системи рекуперації також впроваджено та задокументовано в метрополітенах Відня та Сінгапуру.

Збір розсіяної енергії з дорожнього покриття (англ. energy harvesting). Третя концепція перебуває на значно ранньому етапі розробки. Лабораторні дослідження підтверджують можливість генерації електроенергії внаслідок деформації покриття під дією транспортного навантаження, проте питома потужність окремих перетворювачів вимірюється мікроватами. Їхня висока собівартість та обмежений термін експлуатації в умовах інтенсивного дорожнього руху наразі не дозволяють досягти позитивного економічного ефекту [12]. Серед країн вибірки не виявлено жодного діючого промислового проєкту. Технологічні рішення залишаються на стадії експериментальних установок і дослідних полігонів. Забезпечення комерційно значущих обсягів генерації потребує значних площ покриття, що суттєво підвищує питомі капітальні витрати на одиницю енергії, тоді як постійне механічне навантаження від транспорту прискорює деградацію перетворювачів. Порівняно з фотоелектричними системами на аналогічних поверхнях, технологія п'єзоелектричного харвестингу поступається за вартістю кіловат-години на кілька порядків. Відповідно, у найближчій перспективі її потенційне застосування обмежиться живленням автономних

датчиків, а не постачанням енергії в загальну мережу. З огляду на це, інвестиції в зазначений напрям мають науково-дослідний, а не комерційний характер.

Цифровий рівень інтеграції: смарт-мережі та віртуальні електростанції. Зазначені три концепції функціонують у синергії через єдину цифрову систему керування. Вона агрегує розподілені енергетичні ресурси у віртуальні електростанції (ВЕС), оптимізує тягове навантаження та дає змогу використовувати транспортну інфраструктуру як гнучкий елемент енергосистеми. Цей підхід успішно реалізовано в Південній Кореї на базі островних мікромереж (зокрема, на острові Каса). Система забезпечує згладжування пікових навантажень, мінімізує залежність від дизельної генерації та знижує обсяги шкідливих викидів. Водночас інструменти регулювання попиту (англ. *demand response*) перетворюють споживачів на активних учасників балансування мережі, що зменшує витрати палива на дизельних генераторах і дозволяє відтермінувати капіталовкладення в нові потужності [12]. Економічна доцільність інтеграції екологічного транспорту в розумні мережі обґрунтована також на прикладі іспанського міста Леон. Моделювання динаміки поширення електромобілів на період до 2030 року продемонструвало, що показники чистої теперішньої вартості (NPV), внутрішньої норми дохідності (IRR) та терміну окупності повністю виправдовують впровадження цієї технології, а тарифний дефіцит міста може скоротитися майже вдвічі [14]. Цифровий рівень управління виконує подвійну економічну функцію. По-перше, він інтегрує малопотужні та нерегулярні джерела гнучкості окремих суб'єктів у прогнозований комерційний продукт, без чого вихід поодиноких автопарків та депо на оптовий ринок електроенергії був би неможливим. По-друге, система розподіляє фіксовані витрати на облік, зв'язок та контракування між декількома джерелами доходу, знижуючи питомі витрати для кожного окремого учасника. Саме тому оператори ВЕС, а не власники індивідуальних активів, акумулюють основну частину створеної вартості. Це зумовлює формування окремого ринкового сегмента незалежних агрегаторів, чий дохід формується як маржа між вартістю ресурсу гнучкості на оптовому ринку та виплатами кінцевим учасникам, а рівень конкуренції між агрегаторами визначає частку прибутку власників активів. Найвищим ступенем інтеграції є демонстраційні проекти, що об'єднують кілька концепцій одночасно. Зокрема, італійський комплекс Mirafiori інтегрує технологію двонаправленої зарядки потужністю до 25 МВт (що робить його найбільшим V2G-об'єктом у світі) та сонячну електростанцію потужністю 5 МВт (близько 12 тис. панелей із річною генерацією 6500 мегават-годи у єдину ВЕС). За своєю ефективністю ця система еквівалентна оптимізації енергоспоживання близько 8,5 тис. домогосподарств. За умовами проекту в обмін на надання балансувальних послуг учасники отримують грошову компенсацію або безкоштовну електроенергію [15]. Комплекс доводить, що жодне з джерел доходу окремо не забезпечило б окупності інвестицій, тоді як їхня синергія в межах однієї платформи гарантує достатній рівень сукупної рентабельності. Аналогічні проекти з інтеграції транспорту як гнучкого енергетичного ресурсу також реалізують оператори у Швейцарії, Норвегії та Великій Британії.

Економічні механізми інтеграції транспортних активів в енергосистему. Дослідження теоретико-економічних базисів інтеграції транспорту в енергосистему дозволяє стверджувати, що за зовнішньою різноманітністю практичних кейсів стоїть обмежений набір механізмів монетизації. Вони наочно пояснюють спроможність транспортної інфраструктури генерувати додану вартість як повноцінний елемент енергомережі. Зазначені чинники доцільно класифікувати за чотирма ключовими аналітичними напрямками, кожен з яких спирається на усталені концепції економічної теорії.

Перший із таких напрямів ґрунтується на концепції капіталізації активів із низьким коефіцієнтом завантаження. Приватний автотранспорт перебуває в стані простою близько 80–90% добового часу, а елементи транспортної інфраструктури (навіси, дахи станцій, шумозахисні екрани чи дорожнє покриття) мають значні резервні площі та невикористаний

ресурс. Усі проаналізовані рішення, від технології двонаправленої зарядки (V2G) до інфраструктурних фотоелектричних систем, спрямовані на монетизацію цього недовантаженого капіталу. Вони трансформують період простою вже профінансованого активу в додаткове джерело доходу за низьких граничних витрат. Економічна привабливість такого підходу зумовлена тим, що додатковий грошовий потік генерується на базі наявної потужності без необхідності залучення нових значних капіталовкладень. Ця логіка корелює із глобальною тенденцією підвищення коефіцієнта використання активів, притаманною для економіки спільного використання (англ. *sharing economy*). Найбільш ефективно цей механізм функціонує для активів із високою капітальною вартістю та тривалим життєвим циклом, де навіть мінімальний приріст експлуатаційного завантаження забезпечує відчутний економічний ефект. Навпаки, для бюджетних або недовговічних активів фінансова вигода від інтенсифікації використання нівелюється витратами на їхнє прискорене зношення та амортизацію.

Другий аналітичний напрям охоплює процеси інтерналізації позитивних екстерналій (зовнішніх ефектів). Інтеграція чистих джерел енергії та декарбонізація транспорту створюють значущі суспільні блага: стабільність енергосистеми, енергетичну безпеку та зниження обсягів емісії парникових газів. За класичних ринкових умов ці ефекти не підлягають прямому фінансовому винагородженню, через що спостерігається їх дефіцит. Розглянуті механізми дозволяють трансформувати ці екстерналії в прямий комерційний дохід за допомогою спеціальних ринкових інструментів. Наочним прикладом є метрополітен Делі, де скорочення викидів CO² було монетизовано через механізм купівлі-продажу вуглецевих кредитів [10]. Аналогічно, ринки допоміжних послуг встановлюють ринкову ціну за підтримання стабільності мережі, що раніше функціонувала як безоплатне суспільне благо. Фактично йдеться про трансформацію зовнішнього ефекту у внутрішній ціновий сигнал, що є класичним розв'язанням проблеми екстерналій в економічній теорії [16]. Практична цінність таких інструментів полягає в тому, що вони роблять екологічну та системну користь фінансово відчутною для оператора проєкту. Проте обсяг цього доходу безпосередньо детермінований наявністю відповідної регуляторної бази. За відсутності ринків допоміжних послуг або торгівлі квотами на викиди, зовнішній ефект залишається немонетизованим, а проєкт втрачає одне з ключових джерел формування вартості.

Третій концептуальний напрям розкриває бізнес-модель багатосторонньої диверсифікації доходів. У межах цієї моделі один і той самий актив одночасно обслуговує кілька суміжних ринків та інтереси різних сторін (власника транспортного засобу, оператора системи розподілу, оптового енергоринку та оператора автопарку). Електромобіль або зарядне депо інтегруються в ринок мобільності та ринок електроенергії одночасно. Відповідно, єдина капітальна база генерує фінансові потоки з кількох незалежних джерел (надання послуг із балансування, цінового арбітражу, мінімізації витрат через самоспоживання та реалізації надлишків енергії). Найбільш виразно цю синергію демонструє комплекс Mirafiori, який поєднує функцію балансування, власну генерацію та алгоритми оптимізації в межах єдиної віртуальної електростанції [15]. Економічне значення такої диверсифікації джерел доходу полягає в суттєвому підвищенні рентабельності інвестицій (ROI) та скороченні терміну окупності, що є критично важливим чинником для впровадження капіталомістких активів. Для інвестора це означає необхідність комплексного оцінювання проєкту за сукупністю всіх фінансових потоків, а не за кожним окремо, оскільки інакше його загальна дохідність буде суттєво недооцінена, що призведе до ухвалення неефективних інвестиційних рішень. Саме тому мультифункціональна інтеграція кількох технологічних процесів у межах одного об'єкта є економічно вигіднішою, ніж їхнє роздільне впровадження.

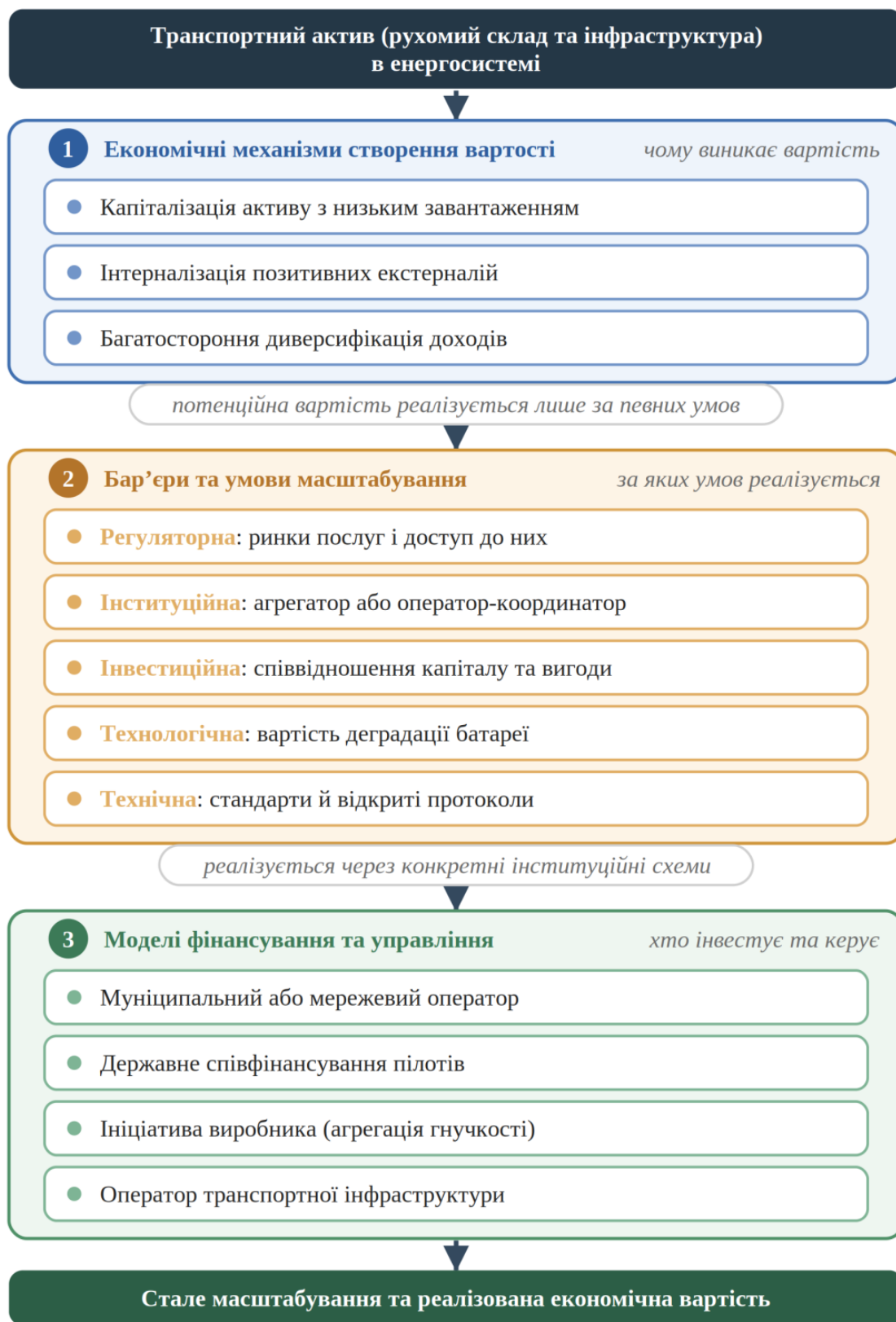


Рис. 1. Економічна логіка інтеграції транспортних активів в енергосистему

Джерело: побудовано авторами на основі [1, 3, 4, 8, 10, 11, 15, 16]

Бар'єри та умови масштабування. Зіставлення кейсів дає змогу виокремити умови, за яких розглянуті рішення переходять від пілотних стадій до сталої експлуатації. Перша умова є регуляторною, її суть в тому, що дохід від послуг мережі виникає лише там, де існують ринки допоміжних послуг і де агрегованим ресурсам транспорту дозволено на них виходити. Саме доступ до ринку регулювання частоти зробив можливими проекти Parker, REVS і Mirafiori, тоді як у країнах без таких ринків відповідні послуги лишаються неоплачуваними. Друга умова є інституційною, для її виконання потрібен суб'єкт, здатний агрегувати дрібні гнучкості та взяти на себе контрактні відносини з оператором мережі, чи то агрегатор-виробник, чи то комунальне підприємство. Третя умова є інвестиційною. Капіталомісткі рішення на кшталт сонячного дорожнього покриття або енергозбору залишаються передкомерційними доти, доки питома вартість не зрівняється з вигодою, тоді як рішення на вже наявній інфраструктурі долають цей бар'єр одразу. Четверта умова стосується самого активу, вона спирається на той факт, що економіка двонаправленої зарядки чутлива до вартості деградації батареї, тому стійкі моделі або обмежують глибину розряду, або компенсують знос доходом від послуг. Таким чином технологічна готовність є необхідною, проте не достатньою умовою. Вирішальне значення для комерціалізації має синергія сприятливої ринкової кон'юнктури, розвиненого інституційного середовища та рентабельного співвідношення витрат і вигод. Важливою також є технічна сумісність, адже рішення масштабується легше там, де спирається на стандартизоване обладнання та відкриті протоколи обміну даними, а не на пропрієтарну платформу окремого постачальника. З погляду економічної політики це означає, що держава найбільше пришвидшує впровадження не прямими субсидіями на обладнання, а створенням ринків, на яких послуги транспорту можна продати, та усуненням регуляторних і контрактних бар'єрів для агрегаторів.

Моделі фінансування та управління. Окрім джерел формування вартості, досліджені проекти суттєво різняться за моделями фінансування та суб'єктами управління. Саме ця інституційна специфіка визначає, наскільки легко відтворюваною є та чи інша модель. Загалом доцільно виокремити чотири базові схеми. Перша схема реалізується як ініціатива муніципального або мережевого оператора, який бере на себе фінансові ризики та отримує економічні вигоди, перетворюючи парк електротранспорту на керований ресурс енергомережі (саме так функціонують програми електрифікації автопарків у Північній Америці). Друга схема базується на державному співфінансуванні пілотних рішень, що демонструє проєкт REVS, де публічні кошти покривають ранні технологічні ризики до моменту доведення комерційної життєздатності концепції [3]. Третя модель є корпоративною ініціативою автовиробника, який інтегрує енергетичні функції безпосередньо у свій продукт, агрегуючи ресурси гнучкості через власні дочірні компанії, як у проєктах Mobilize [4] та Mirafiori [15]. Четверта схема постає як ініціатива оператора транспортної інфраструктури, коли власник великого об'єкта оптимізує баланс власного енергоспоживання та генерації, що наочно ілюструють приклади метрополітену Делі [8] та тролейбусної мережі Гдині [11].

Вибір конкретної моделі не є довільним, оскільки він безпосередньо зумовлений структурою власності та рівнем зрілості ринку. Якщо приватний попит залишається слабким, а інфраструктура є переважно публічною, ініціатива закономірно зміщується до операторів мереж та інфраструктурних об'єктів. Відповідно, для систем із домінуючою державною та муніципальною власністю на транспорт найприроднішими є перша та четверта схеми, оскільки вони спираються на вже існуючий інституційний фундамент і можуть успішно реалізовуватися навіть за відсутності масового приватного попиту (рис. 1).

Висновки. Документально підтверджених операційних проєктів V2G чи I2G в Україні наразі немає, натомість реалізуються концептуальні ініціативи у сфері смарт-мереж і модернізації міського електротранспорту за підтримки міжнародних фінансових організацій. В умовах обмеженого приватного попиту та переважно державної та комунальної власності

на транспортну інфраструктуру споживчі моделі двонаправленої зарядки, поширені за кордоном, для України менш реалістичні, ніж інфраструктурно орієнтовані напрями. Україна має одну з найрозгалуженіших у Європі мереж міського електротранспорту, тобто десятки тролейбусних і трамвайних господарств та метрополітени, що вже електрифіковані та перебувають у комунальній власності. Це створює готову матеріальну базу саме для інфраструктурних рішень, які не потребують масового парку приватних електромобілів і розвиненого ринку допоміжних послуг. Фінансовою опорою для таких проєктів можуть стати програми міжнародних фінансових організацій та механізми відновлення, орієнтовані на стійку інфраструктуру, що частково знімає проблему дефіциту капіталу, характерну для комунального сектору.

Можна виділити три найдоречніші напрямки. Перший полягає в рекуперації гальмування у поєднанні зі смарт-мережами на наявних тролейбусних, трамвайних і метрополітенних мережах, він потребує мінімальних капіталовкладень, спирається на вже наявну інфраструктуру, добре узгоджується з комунальною формою власності та прямо зменшує операційні витрати перевізника, окупаючись коштом зекономленої тягової електроенергії. Другий полягає в інфраструктурній фотовольтаїці на дахах депо і станцій, що знижує вартість електроенергії та підвищує енергетичну незалежність, особливо цінну за воєнних загроз централізованій мережі. Третій полягає у двонаправленій зарядці муніципальних і службових парків транспортних засобів як інституційному шляху, що не залежить від платоспроможності окремого споживача й може спиратися на передбачуваний графік руху громадського транспорту. Окремою передумовою є стан національного ринку електроенергії. Йдеться зокрема про те, що повноцінна монетизація послуг балансування та агрегації стане можливою лише в процесі його лібералізації й інтеграції з європейським, тоді як заміщення власною генерацією та рекуперація можуть забезпечити економію вже в нинішніх умовах. У межах розглянутої аналітичної моделі для України найефективнішими є механізми інтерналізації зовнішніх ефектів та капіталізації наявних активів. В умовах дефіциту капітальних інвестицій повторне використання вже існуючої електрифікованої інфраструктури характеризується найнижчими транзакційними витратами. З управлінського погляду це зумовлює переорієнтацію маркетингової та інвестиційної політики від інструментів стимулювання індивідуального попиту, які є недостатньо ефективними за умов низької купівельної спроможності, до інфраструктурних та інституційних рішень. Така стратегія відповідає структурі власності українського електротранспорту та логіці його повоєнного відновлення. Окрім того, децентралізована генерація та системи накопичення енергії на об'єктах транспортної інфраструктури підвищують стійкість енергопостачання до дестабілізації централізованих мереж, що робить цей напрям стратегічно актуальним для національної енергетичної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Andersen P. B., Hashemi S., Sousa T. et al. The Parker project: cross-brand service testing using V2G. *World Electric Vehicle Journal*. 2019. Vol. 10, no. 4. Art. 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj10040066>
2. Ostermann A., Haug T., Regener V. Project Bidirectional Charging Management: results and findings from the BCM field trial. *Antriebe und Energiesysteme von morgen*. 2025. Vol. 23. P. 156–173. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-41439-9_13
3. ACT electric fleet vehicles powered grid during energy emergency. URL: https://www.cmtedd.act.gov.au/open_government/inform/act_government_media_releases/rattenbury/2024/act-electric-fleet-vehicles-powered-grid-during-energy-emergency
4. Mobilize V2G: the world's first vehicle-to-grid product for end customers. Mobilize (Renault Group). 2023. URL: <https://media.renault.com/mobilize-v2g-where-the-future-electric-renault-5-becomes-a-source-of-energy>

5. Shekhar A., Kumaravel V. K., Klerks S. et al. Harvesting roadway solar energy: performance of the installed infrastructure integrated PV bike path. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018. Vol. 8, no. 4. P. 1066–1073. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2820998>
6. Bartłomiejczyk M., Połom M. Potential application of solar energy systems for electrified urban transportation systems. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 4. Art. 954. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040954>
7. China rolls out world's first solar highway. 2018. URL: <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/chinas-innovative-solar-highway>
8. 60% of Delhi Metro now powered by solar energy from Madhya Pradesh. 2019. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/06/05/delhi-metro-goes-solar>
9. Ceraolo M., Lutzemberger G., Meli E. et al. Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains. *Journal of Energy Storage*. 2018. Vol. 16. P. 269–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.017> (
10. Shukla, Anoop & Singh, Brajesh & Dixit, Kartikeya. CARBON TRADING: AN APPROACH TO SUSTAINABLE FUTURE DEVELOPEMENT IN INDIA. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/358853635_CARBON_TRADING_AN_APPROACH_TO_SUSTAINABLE_FUTURE_DEVELOPEMENT_IN_INDIA (
11. Bartłomiejczyk M. Smart grid technologies in electric power supply systems of public transport. *Transport*. 2018. Vol. 33, no. 5. P. 1144–1154. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2018.6433>
12. Zabihi N., Saafi M. Recent developments in the energy harvesting systems from road infrastructures. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 17. Art. 6738. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12176738>
13. Tightiz L., Yoo J. A robust energy management system for Korean green islands project. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Art. 22005. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25096-3>
14. Colmenar-Santos A., Borge-Diez D., Ortega-Cabezas P. M. et al. Macroeconomic impact, reduction of fee deficit and profitability of a sustainable transport model based on electric mobility. Case study: city of León (Spain). *Energy*. 2014. Vol. 65. P. 303–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.077>
15. Vehicle-to-Grid pilot project at Mirafiori. 2020. URL: <https://www.media.stellantis.com/em-en/e-mobility/press/the-vehicle-to-grid-pilot-project-has-been-inaugurated-at-mirafiori> (
16. Coase R. H. The problem of social cost. *The Journal of Law and Economics*. 1960. Vol. 3. P. 1–44. DOI: <https://doi.org/10.1086/466560>
17. Türkoğlu A.S., Güldorum H.C., Sengor I., Çiçek A., Erdiñç O., Hayes B.P. Research paper Maximizing EV profit and grid stability through Virtual Power Plant considering V2G. *Energy Reports*, Vol. 11, 2024, pp. 3509–3520. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.013>
18. Vizzari D., Bahrani N., Fulco G. Coexistence of Energy Harvesting Roads and Intelligent Transportation Systems (ITS). *Infrastructures*, Vol. 8, 2023, 14. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8010014>

REFERENCES

1. Andersen, P.B., Hashemi, S., Sousa, T., Soerensen, T.M., Noel, L., Christensen, B. (2019). The Parker project: cross-brand service testing using V2G. *World Electric Vehicle Journal* 10(4), 66.
2. Ostermann, A., Haug, T., Regener, V. (2025). Project Bidirectional Charging Management – Results and Findings from the BCM Field Trial. In: Heintzel, A. (eds) *Antriebe und Energiesysteme von morgen* 23, 156–173.
3. ACT Government. (2024). ACT electric fleet vehicles powered grid during energy emergency. Chief Minister, Treasury and Economic Development Directorate. URL: https://www.cmtedd.act.gov.au/open_government/inform/act_government_media_releases/rattenbury/2024/act-electric-fleet-vehicles-powered-grid-during-energy-emergency.
4. Mobilize. (2023). Mobilize V2G: Where the future electric Renault 5 becomes a source of energy. Renault Group. URL: <https://media.renault.com/mobilize-v2g-where-the-future-electric-renault-5-becomes-a-source-of-energy/>.
5. Shekhar, A., Kumaravel, V.K., Klerks, S., de Wit, S., Venugopal, P., Narayan, N. (2018). Harvesting Roadway Solar Energy – Performance of the Installed Infrastructure Integrated PV Bike Path. *IEEE Journal of Photovoltaics* 8(4), 1066–1073.
6. Bartłomiejczyk, M. (2018). Potential application of solar energy systems for electrified urban transportation systems. *Energies*, 11(4), Article 954.
7. Energy Matters. (2018). China rolls out world's first solar highway. URL: <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/chinas-innovative-solar-highway/>.
8. World Bank. (2019). 60% of Delhi Metro now powered by solar energy from Madhya Pradesh. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/06/05/delhi-metro-goes-solar>.

9. Ceraolo, M., Lutzemberger, G., Meli, E., Pugi, L., Rindi, A., Pancari, G. (2018) Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains. *Journal of Energy Storage* 16, 269–279.
10. Shukla, A., Singh, B., & Dixit, K. (2014). Carbon trading: An approach to sustainable future development in India. URL: https://www.researchgate.net/publication/358853635_CARBON_TRADING_AN_APPROACH_TO_SUSTAINABLE_FUTURE_DEVELOPEMENT_IN_INDIA
11. Bartłomiejczyk, M. (2018). Smart grid technologies in electric power supply systems of public transport. *Transport* 33(5), 1144–1154.
12. Zabihi, N., Saafi, M. (2020). Recent developments in the energy harvesting systems from road infrastructures. *Sustainability* 12, 6738.
13. Tightiz, L., Yoo, J. (2022). A robust energy management system for Korean green islands project. *Scientific Reports* 12, 22005.
14. Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., Ortega-Cabezas, P.M., Míguez-Camiña, J.V. (2014). Macroeconomic impact, reduction of fee deficit and profitability of a sustainable transport model based on electric mobility. Case study: city of León (Spain). *Energy* 65, 303–318.
15. Stellantis Media. (2020). The Vehicle-to-Grid pilot project has been inaugurated at Mirafiori. URL: <https://www.media.stellantis.com/em-en/e-mobility/press/the-vehicle-to-grid-pilot-project-has-been-inaugurated-at-mirafiori>.
16. Coase R. H. (1960). The problem of social cost. *The Journal of Law and Economics*. Vol. 3. P. 1–44.
17. Türkoğlu, A.S., Güldorum, H.C., Sengor, I., Çiçek, A., Erdinç, O., Hayes, B.P. (2024). Research paper Maximizing EV profit and grid stability through Virtual Power Plant considering V2G. *Energy Reports* 11, 3509–3520.
18. Vizzari, D., Bahrani, N., Fulco, G. (2023). Coexistence of energy harvesting roads and intelligent transportation systems (ITS). *Infrastructures* 8, 14.

Viktoriia Yanovska, Doctor of Economic Sciences, Professor
(Head of the Department of Economics, Marketing and Business Administration, National Transport University)
ORCID 0000-0002-0648-3643

Anastasiia Ustilovsk, PhD, Associate Professor
(Associate Professor of the Department of Economics, Marketing and Business Administration, National Transport University)
ORCID 0000-0002-9297-7614

Renat Zihanshyn
(Postgraduate, National Transport University)
ORCID 0009-0004-0339-0814

Maksym Salimovskyi
(Postgraduate, National Transport University)
ORCID 0009-0009-9727-9063

ECONOMIC MODELS OF INTEGRATING TRANSPORT ASSETS INTO ENERGY SYSTEMS

The article is devoted to the generalization of models for integrating transport assets into energy systems based on an empirical analysis of international practices across twenty countries worldwide. It examines the transformation of the transport sector, in which rolling stock and infrastructure are increasingly regarded as assets capable of providing energy services and generating new value creation

models. The comparative analysis is conducted along technical and economic dimensions within three conceptual frameworks: the use of transport as a mobile energy storage system (V2G/V2X), transport infrastructure as an element of energy generation (I2G, including photovoltaics and energy recovery systems), and the harvesting of ambient energy from road surfaces (energy harvesting). It is demonstrated that the digital aggregation of these distributed resources into virtual power plants (VPPs) and smart grids enables access to wholesale electricity markets. Key economic mechanisms of monetization are classified along four dimensions: capitalization of low-utilization assets, internalization of positive externalities, and multi-channel revenue diversification. In addition, institutional models of project governance and financing are identified. Regulatory, institutional, investment, and technical barriers to the scaling of such technologies are also outlined. Special attention is paid to the strategic prospects of Ukraine. It is argued that, under conditions of low private demand, capital shortages, and publicly owned infrastructure, infrastructure-oriented solutions are the most effective for the country. Three priority directions for implementation within the framework of post-war recovery are identified: regenerative braking energy in urban electric transport, rooftop photovoltaics on depot facilities, and bidirectional charging of municipal vehicle fleets. The implementation of these solutions would enhance national energy security through decentralization.

Keywords: sustainable development, efficiency, electric transport, intelligent transport systems, alternative energy, circular economy, forecasting, economic models, economic mechanisms.

Стаття надішла до видання 08.06.2026

Стаття прийнята до друку після рецензування 23.06.2026

Стаття опублікована 10.07.2026