

ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРЕХОДУ ДО СЕСТЕЙНОВИХ МОДЕЛЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В УМОВАХ АДИТИВНОЇ ЕКОНОМІКИ¹

SUBSTANTIATION OF THE TRANSITION TO SUSTAINABLE MODELS OF ENERGY SUPPLY UNDER THE CONDITIONS OF THE ADDITIVE ECONOMY

У статті обґрунтовано перехід від субтрактивної моделі енергетики, що базується на викопних ресурсах, до адитивної моделі розвитку, заснованої на відновлюваних джерелах, цифрових технологіях і горизонтальних системах (EnergyNet). Визначено, що сучасний енергетичний перехід є фазовим процесом, що супроводжується зміною базового метаболізму економічних систем: від «віднімання» природних ресурсів до «додавання» відновлюваної енергії, інформації та синергетичних зв'язків. Показано, що адитивна енергетика формує основи сестейнаної (сталі) моделі функціонування економіки, здатної забезпечити енергетичну автономність, екологічну безпеку територій і соціально-економічну живучість в умовах війни. На основі міжнародних і національних даних доведено, що понад 60 % енергетичної інфраструктури України пошкоджено або знищено, зокрема 80 % теплової та 40 % гідроенергетики, що актуалізує потребу у децентралізації енергопостачання. Визначено, що розосереджена генерація на основі ВДЕ (сонце, вітер, біомаса, водень) демонструє вищу живучість і здатність підтримувати енергобаланс у кризових умовах. Розроблено модель факторів переходу до адитивної енергетики, що включає матеріальні (3D-принтери, сонячні панелі, акумулятори), інформаційні (AI, Big Data, Smart Grid) та синергетичні (EnergyNet, енергокооперативи, блокчейн) компоненти. Запропоновано інтегральний показник енергетичної сестейновості, який кількісно оцінює рівень автономності території. Також представлено економіко-математичну модель ефективності переходу бізнесу на ВДЕ, що враховує різницю у витратах, дисконтну ставку та доходи від «зеленого тарифу». Доведено, що навіть за умов війни такі інвестиції залишаються економічно доцільними. Зроблено висновок, що перехід до адитивної енергетики є трансформацією, яка інтегрує інноваційно-цифрові, соціальні та екологічні механізми розвитку в контексті Industry 5.0 та Society 5.0.

Ключові слова: адитивна енергетика, субтрактивна модель, сестейнова економіка, відновлювана енергія, EnergyNet, Industry 5.0, децентралізація енергетики, цифрова трансформація, енергетична автономність.

The article substantiates the transition from a subtractive energy model based on fossil fuels to an additive development model grounded in renewable sources, digital technologies, and horizontal systems (EnergyNet). It is determined that the modern energy transition is a phased process in which the basic metabolism of economic systems transforms – from the “subtraction” of natural resources to the “addition” of renewable energy, information, and synergistic connections. The study demonstrates that additive energy forms the foundation of a sustainable (sustainable) model of economic functioning, capable of ensuring energy autonomy, environmental safety of territories, and socio-economic resilience under wartime conditions. Based on international and national data, it has been proven that over 60% of Ukraine’s energy infrastructure has been damaged or destroyed, including 80% of thermal and 40% of hydroelectric capacities, which highlights the urgent need for decentralization of energy supply. It is shown that distributed generation based on renewable energy sources (solar, wind, biomass, hydrogen) demonstrates higher resilience and the ability to maintain energy balance in crisis conditions. A model of factors for the transition to additive energy has been developed, which includes material (3D printers, solar panels, batteries), informational (AI, Big Data, Smart Grid), and synergistic (EnergyNet, energy cooperatives, blockchain) components. An integral indicator of territorial energy sustainability is proposed, which quantitatively assesses the level of territorial autonomy. Additionally, an economic and mathematical model of business transition efficiency to renewable energy is presented, considering differences in costs, discount rates, and income from the “green tariff.” It is proved that even under wartime conditions such investments remain economically viable. The conclusion emphasizes that the transition to additive energy represents a transformation that integrates innovative-digital, social, and environmental mechanisms of development within the context of Industry 5.0 and Society 5.0.

Key words: additive energy, subtractive model, sustainable economy, renewable energy, EnergyNet, Industry 5.0, decentralization of energy, digital transformation, energy autonomy.

УДК 330.15:620.9:504.05

DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.20-25>

Маценко О.М.²

к.е.н., доцент,
доцент кафедри економіки,
підприємництва
та бізнес-адміністрування,
Сумський державний університет

Matsenko Oleksandr

Sumy State University

Постановка проблеми. Сучасна цивілізація переживає фазу глобальної трансформації енергетичних і виробничих систем, що відбувається під впливом переходу від субтрактивної до адитивної економіки. Субтрактивна модель господарювання, заснована на вилученні й спалюванні викопних ресурсів, породила системну екологічну кризу, енергетичну залежність і виснаження природного

капіталу планети (Мельник, 2023). В умовах глобальних викликів – зміни клімату, воєнних конфліктів, ресурсного дефіциту – постає необхідність докорінного оновлення принципів функціонування енергетики та промисловості на засадах сестейновості та адитивності.

Наукові дослідження останніх років доводять, що адитивна енергетика є не лише технічним, але

¹ The publication was prepared in the framework of the research project “Restructuring of the national economy in the direction of digital transformations for sustainable development” (№0122U001232) from National Research Foundation of Ukraine.

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-2811>

й соціально-економічним феноменом, який передбачає перехід від централізованих вертикальних енергосистем до децентралізованих горизонтальних мереж (EnergyNet), у яких кожен споживач може стати виробником і носієм енергії (Melnyk et al., 2022; Мельник, 2023). Такий перехід супроводжується зміною базових метаболічних потоків економіки: від «віднімання» природних ресурсів – до «додавання» відновлюваної енергії, інформації та синергетичних зв'язків між учасниками енергетичного ринку.

Війна в Україні загострила потребу у реструктуризації енергетики: руйнування централізованої інфраструктури зробили очевидною необхідність автономних, стійких до ризиків систем локальної генерації – сонячних, вітрових, біоенергетичних (Matsenko et al., 2025). У цих умовах адитивний принцип енергетичного виробництва стає не просто альтернативою, а умовою виживання. Формування малих горизонтальних енергетичних кластерів на базі відновлюваних джерел забезпечує як енергетичну безпеку територій, так і збереження людського та природного капіталу.

Водночас, як показують дослідження Європейської Бізнес Асоціації (EBA, 2025), перехід бізнесу до нової енергетичної реальності змінює корпоративні моделі – від споживчих до енергоактивних. Компанії, що інтегрують ВДЕ у власні ланцюги вартості, формують net-zero бізнес-моделі, демонструючи зрушення від конкуренції до енергетичної кооперації та створення ESG-орієнтованої корпоративної культури. Проте такі зміни залишаються фрагментарними і не охоплюють системного підходу до формування сестейнових моделей функціонування економіки, що інтегрують альтернативну енергетику, адитивні технології та екологічну безпеку територій. Таким чином, постає необхідність системно обґрунтувати перехід до сестейнових моделей енергетичного розвитку, що базуються на адитивному принципі виробництва й використанні альтернативних джерел енергії, здатних забезпечити екологічну, соціальну та енергетичну живучість економічних систем. Для більш глибокого розуміння сутності цього переходу доцільно розглянути сучасні наукові напрацювання з тематики адитивної енергетики та сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика енергетичного переходу до сталих (сестейнових) моделей функціонування економіки вже тривалий час перебуває у фокусі досліджень як міжнародних організацій (IEA, IRENA, OECD), так і академічної спільноти. У сучасних оглядових роботах наголошується, що ключову роль у досягненні цілей net-zero відіграють відновлювані джерела енергії, цифрові технології та нові інструменти «зеленої» фінансизації, які забезпечують масштабування ВДЕ та підвищення

енергоефективності на рівні міст, підприємств та домогосподарств (Khaleel & Yusupov, 2026).

У праці (Li, et al., 2022) здійснено порівняльний еколого-економічний аналіз технологій енергетики на основі показника Levelized Cost of Energy (LCOE), що дозволило показати, що у 2019–2021 рр. альтернативна енергетика досягла, а подекуди й перевищила економічну ефективність традиційної теплової генерації на викопному паливі, а до 2030 року очікується зростання її переваг у 2,5 рази. Це підкріплює висновок про об'єктивність фазового переходу від «бурої» (subtractive) до «цифрової/зеленої» економіки на основі відновлюваних джерел та циркулярних технологій.

У дослідженні (Melnyk et al., 2022) співавтори розвивають ідею адитивної економіки як нової соціально-економічної формації, заснованої на принципі додавання (add) енергії та речовини замість традиційного «віднімання» ресурсів. Адитивна економіка трактується не лише як 3D-друк, а як системний перехід до виробництва й енергетики, що мінімізують використання первинних ресурсів, дематеріалізують виробництво та знижують навантаження на екосистеми. У цьому контексті адитивна енергетика – отримання енергії безпосередньо з відновлюваних джерел (сонце, вітер, біомаса) – розглядається як серцевина фазового переходу до нової формації, де горизонтальні мережеві структури замінюють централізовані вертикальні системи (Melnyk et al., 2022; Мельник, 2023).

Сьогодні поширення ВДЕ, енергонакопичувачів, електротранспорту, 3D-друку та цифрових платформ має характер квазивірусних технологічних явищ: вони швидко дифундують через економічні системи, змінюючи базові метаболічні потоки та створюючи нові конфігурації стійкості й уразливості. Схожі висновки містять і новітні праці про quasi-viral technologies як драйвери цифрової трансформації та сталості, де ВДЕ, 3D-друк, енергонакопичення та ІТ визначаються як базові інноваційні ядра поточного фазового переходу (Melnyk et al., 2025).

Окремий напрям досліджень пов'язаний із воєнними та безпековими детермінантами енергетичного переходу. У статті про трансформацію енергопостачання житлового сектору України на основі концепції Industry 3.0 (Matsenko et al., 2025) доведено, що масоване руйнування централізованої інфраструктури внаслідок війни актуалізує перехід до децентралізованих рішень: домогосподарств з автономною генерацією, «зелених» кредитів, енергетично незалежних будинків із терміном окупності проєктів близько 7 років. Подібні висновки роблять і міжнародні аналітичні центри, що розглядають війну як «шок децентралізації», який оголює вразливість великих центрів генерації і стимулює розбудову розподіленої системи на

базі ВДЕ, зберігання енергії та гнучких резервних потужностей (Bandura & Romanishyn, 2025).

Нові емпіричні дані доповнюються прикладами проєктів децентралізованої генерації та енергонакопичення: інвестиції приватних енергокомпаній у масштабні системи зберігання енергії, розгортання програм типу RISE для встановлення дахових СЕС та акумуляторів у бізнесі й публічних установах, що прямо орієнтовані на підвищення живучості енергосистеми та зменшення ризиків блекаутів (Parodi & Williams, 2025). Паралельно з цим у джерелах технічного напрямку активно досліджуються моделі управління мікромережами та децентралізованими системами (smart grids, model predictive control), особливо в умовах криз та обмежених ресурсів (Voitenko & Polishchuk, 2025).

У площині корпоративних та бізнес-моделей значний внесок зробили дослідження сталих бізнес-моделей у «зеленій» енергетиці, де показано, що інтеграція ВДЕ створює нову триєдину цінність – економічну, екологічну та соціальну, але натрапляє на бар'єри вартості капіталу, регуляторних обмежень і технологічної складності (Rolando & Ingriana, 2024). Практичний вимір цих тенденцій відображений у науковій праці (EBA, 2025), де підкреслюється зростання ролі децентралізованої генерації, корпоративних СЕС, РРА-контрактів, локальних енергетичних спільнот і переходу бізнесу від пасивного споживача до активного гравця енергоринку (prosumer, energy partner).

Разом із тим, попри значну кількість праць, в яких підіймаються зазначені вище питання, досі недостатньо розробленим залишається системний підхід, який одночасно поєднував адитивний принцип (у виробництві й енергетиці), сестейнову трансформацію енергетики (sustainization енергетичного комплексу) як системного «ядра» переходу до адитивної економіки, умови воєнних та поствоєнних шоків, що прискорюють реструктуризацію енергетики від централізованих до горизонтальних систем, і вимоги екологічної безпеки територій як критерію оцінювання результатів такого переходу. Саме заповнення цієї прогалини – побудова цілісного теоретико-методологічного підходу до обґрунтування переходу до сестейнових моделей енергетичного переходу в умовах адитивної економіки – і становить наукове завдання даної статті.

Узагальнення зазначених підходів дозволяє сформулювати наукову проблему, що потребує подальшого системного осмислення.

Постановка проблеми. Метою статті є обґрунтування системного підходу до переходу від субтрактивної моделі енергетики, заснованої на використанні викопних ресурсів, до адитивної моделі енергетичного розвитку, що ґрунтується на відновлюваних джерелах енергії, цифрових та горизонтальних технологіях EnergyNet. У межах цього підходу передбачається теоретично й методологічно

довести, що саме адитивний принцип виробництва та споживання енергії є базовою умовою формування сестейнових (сталих) моделей функціонування економіки, які забезпечують енергетичну автономність, екологічну безпеку територій і соціально-економічну живучість суспільства в умовах глобальних і воєнних викликів.

Об'єктом дослідження є процес системної трансформації енергетичних і виробничих систем у напрямі переходу від субтрактивної моделі економіки, що базується на використанні викопних ресурсів, до адитивної моделі енергетичного розвитку, заснованої на відновлюваних джерелах енергії, цифрових технологіях та горизонтальних мережевих структурах (EnergyNet), які формують основу сестейнових (сталих) моделей функціонування економіки.

Виклад основних результатів дослідження. Війна в Україні та атаки на енергетичну інфраструктуру справили катастрофічний вплив на генеруючі потужності та мережеву топологію країни: за узагальненими урядовими та міжнародними оцінками, близько половини генеруючих потужностей, які функціонували до повномасштабного вторгнення, були пошкоджені або виведені з експлуатації. Найсерйозніших втрат зазнала тепла генерація: кілька великих теплових електростанцій і теплоелектроцентралей були фактично знищені, інші – суттєво пошкоджені. За даними МВФ (International, 2024), понад 80% потужностей ТЕС опинилися поза ладу (зруйновані або недоступні). Аналітичні повідомлення оператора і великих приватних генеруючих компаній підтверджують масштаб руйнувань: наприкінці 2024 р. приватна енергокомпанія ДТЕК, що до війни виробляла близько чверті електроенергії, інформувала про втрату 90% своїх генеруючих активів (Polityuk, 2024). Окремо варто підкреслити критичні ураження гідроенергетики – підірвав Каховської ГЕС у 2023 р. зруйнував одну з найбільших гідросистем і спричинив значну екологічну шкоду. Сумарні втрати гідроенергетичних потужностей оцінюються на рівні понад 40%. Цілеспрямовані удари по трансформаторах і підстанціях магістральних напруг (330–750 кВ) призводили до каскадних відключень та фазових системних аварій, що додатково підсилює вразливість вертикально організованої енергосистеми. Негайні ремонтні заходи – перестановка трансформаторів, підключення резервних ліній, мобілізація технічних ресурсів – мали локальний ефект, однак стратегічна вразливість централізованої архітектури збережена (Піщимуха, 2025).

Результатом цих процесів стало поглиблення розбалансування енергетичного ринку, зростання собівартості електроенергії та тарифного навантаження на споживачів, а також підвищення екологічних ризиків через нестабільність системи постачання (табл. 1).

Офіційні оцінки збитків енергетики України від війни

Період, який охоплює оцінка	Накопичені прямі збитки енергетики, млрд дол. США	Джерело
24.02.2022 – червень 2022 (перші 3 місяці війни)	3,1	(RDNA 1, 2022)
24.02.2022 – 24.02.2023 (перший рік повномасштабної війни)	10,6	(RDNA 2, 2023)
24.02.2022 – 31.12.2023 (майже два роки війни)	10,6	(RDNA 3, 2023)
24.02.2022 – кінець травня 2024	>16	(Pidubnyi & Goriunov, 2024)
24.02.2022 – 31.12.2024 (три повні роки війни)	20,5	(RDNA 4, 2025)

Основними причинами розбалансування стали:

- руйнування енергетичної інфраструктури: понад 60% енергетичної інфраструктури було пошкоджено, що призвело до масових відключень електроенергії (GOLAW, 2024);

- втрати в зеленій енергетиці: війна вивела з ладу значну частину потужностей відновлюваної енергетики: до осені 2022 року були зруйновані більшість вітрових електростанцій та близько 50% сонячних (GOLAW, 2024);

- проблеми ресурсозабезпеченості: існують проблеми з забезпеченням енергетичного господарства необхідними ресурсами, що також вносить свій вклад у дисбаланс.

На фоні такого деструктиву роль розосередженої відновлюваної генерації виявилася критичною для підтримання енергопостачання і підвищення живучості системи. Незважаючи на обстріли та окупацію окремих майданчиків, частка ВДЕ у виробництві електроенергії у 2023 р. зросла до близько 17,9% (рис. 1). Причому саме розподілені малі сонячні установки й локальні вітроформування часто продовжували генерацію в умовах, коли великі ТЕС були знеструмлені. Розосередженість таких джерел стала конструктивною перевагою: тисячі невеликих генераторів значно складніше вивести з ладу одночасно. Отже, масштабна «мережа мереж» підвищує стійкість до зовнішніх

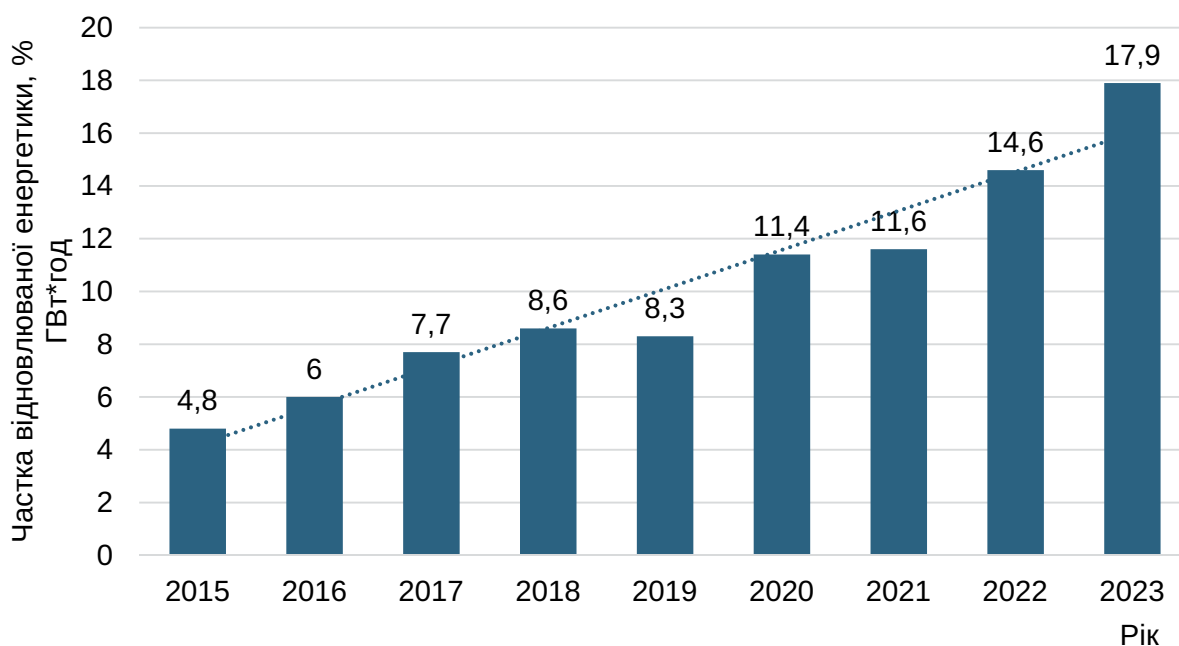


Рис. 1. Динаміка частки відновлюваної енергетики у виробництві електроенергії, ГВт*год., Україна, 2015–2023 рр.

Джерело: побудовано автором на основі (IRENA, 2025)

ударів. Приклади інвестиційної активності й масштабних проектів підкреслюють стратегічну зміну пріоритетів: завершення першої черги великої вітроелектростанції з подальшим розширенням до 500 МВт (інвестиції 450 млн євро, прогнозне покриття до 900 тис. домогосподарств) та державна програма розвитку ВДЕ до 2030 р. із фінансуванням близько 20 млрд дол. США і планом додати понад 10 ГВт нових «зелених» потужностей загроз (Піщимуха, 2025). Сукупно ці процеси формують передумови для переходу до адитивної (дисперсної, модульної) енергетичної архітектури – архітектури, яка через масштабну децентрацію виробництва й накопичення енергії забезпечує не тільки енергетичну автономію, а й підвищену екологічну безпеку територій у умовах довготривалих криз і воєнних.

Адитивна модель енергетики побудована на використанні відновлюваних, екологічно чистих джерел – сонячної, вітрової, біо- та геотермальної енергії. Її функціональний принцип – «додавання»: накопичення, зберігання й перетворення енергії у замкнених або взаємопов'язаних системах без руйнації природних екосистем. Така модель є децентралізованою та горизонтальною, формуючи енергетичні мережі типу EnergyNet, що базуються на взаємодії локальних споживачів і виробників. Соціально-економічна структура при цьому набуває рис солідарності та енергетичної кооперації, а ефективність визначається через екоінновації, автономність і дохідність від самозабезпечення. Тип стійкості адитивної моделі – антикрихкий, тобто така система не лише витримує зовнішні потрясіння, а й посилюється під їхнім впливом завдяки гнучкості, адаптивності та самовідновлювальним властивостям (табл. 2).

Порівняння показує, що адитивна модель не лише змінює джерела енергії, а й трансформує соціально-економічні засади енергетичної системи. Як видно з порівняльного аналізу, ці відмінності відображаються і в динаміці переходу, що зображено на рисунку 2. Тут відображено поетапну еволюцію енергетичної системи – від викопної

(субтрактивної) моделі до адитивної (цифрової), що становить основу формування сестейнової моделі розвитку в межах концепцій Industry 5.0 та Society 5.0.

На першому етапі, коли домінують викопні джерела енергії, суспільство стикається з екологічною кризою, енергозалежністю та загрозами війни, що формують потребу у переході до альтернативних шляхів забезпечення енергією. Другий етап – альтернативні (відновлювані) джерела – характеризуються появою технологій сонячної, вітрової, біо- та геоенергетики, які стають базою для децентралізації та цифровізації енергетичних систем. У цей період ключову роль починають відігравати технології штучного інтелекту, що оптимізують процеси балансування, зберігання та розподілу енергії.

Наступний рівень розвитку пов'язаний із формуванням горизонтальних систем типу EnergyNet, у яких поєднуються локальні споживачі, виробники та накопичувачі енергії. Цей етап базується на інституційній синергії та принципах солідарної економіки, де енергетичні ресурси стають елементом колективної відповідальності та спільного управління. Завершальна фаза переходу – адитивна (цифрова) економіка, у якій енергетичні системи набувають ознак сестейності, автономності та антикрихкості, інтегруючись у структури Industry 5.0. Таким чином, рисунок відображає логіку системного переходу від ієрархічної, ресурсно-витратної моделі енергетики до децентралізованої, цифрово-гуманістичної парадигми, що забезпечує стійкий розвиток і безпеку майбутнього (рис. 2).

В таблиці 3 систематизовано ключові групи факторів, що визначають перехід від традиційної субтрактивної моделі енергетики до адитивної (дистрибутивної та цифрової). Вона відображає матеріальні, інформаційні та синергетичні компоненти процесу трансформації, які у своїй взаємодії формують цілісну архітектоніку сестейнової енергетичної системи. Матеріальні фактори становлять основу технічного переоснащення енергетики. До них належать технологічні інструменти виробництва, зберігання та розподілу енергії – 3D-принтери,

Таблиця 2

Відмінності субтрактивної та адитивної моделей енергетики

Критерій	Субтрактивна модель	Адитивна модель
Джерело енергії	Викопні ресурси (нафта, газ, вугілля)	Сонячна, вітрова, біо-, геотермальна
Принцип процесу	Віднімання: руйнування екосистем і переробка	Додавання: акумуляція чистої енергії
Екологічні наслідки	Викиди CO ₂ , відходи, деградація	Мінімізація відходів, zero-carbon
Організація системи	Вертикальна, централізована	Горизонтальна, децентралізована
Соціальна структура	Монополізація, залежність	Солідарність, енергетичні кооперативи
Економічна ефективність	Екстерналії, субсидії, втрати	Екоефекти, самодостатність, дохідність
Тип стійкості	Крихка (енергозалежна)	Антикрихка (адаптивна, автономна)

Джерело: авторська розробка



Рис. 2. Логіка переходу від субтрактивної до адитивної енергетики та Industry 5.0

Джерело: авторська розробка

Таблиця 3

Фактори та драйвери переходу до адитивної енергетики

Група факторів	Зміст	Інструменти реалізації
Матеріальні	Технічний інструментарій для виробництва та зберігання енергії	3D-принтери, сонячні панелі, водневі установки, акумулятори
Інформаційні	Цифрове управління та оптимізація енергопотоків	AI, Big Data, Smart Grid, хмарні платформи
Синергетичні	Координація горизонтальних систем і спільнот	EnergyNet, енергокооперативи, блокчейн-енергетика

Джерело: авторська розробка

сонячні панелі, водневі установки, акумуляторні системи накопичення. Вони забезпечують автономність та локалізацію енергопотоків, створюючи матеріальну базу адитивного принципу «додавання» енергії без руйнування природних систем. Інформаційні фактори формують інтелектуальне середовище функціонування адитивної енергетики. Завдяки штучному інтелекту (AI), великим даним (Big Data), розумним мережам (Smart Grid) та хмарним платформам, забезпечується цифрова оптимізація виробництва, балансування та розподілу енергоресурсів. Ці інструменти створюють основу для гнучкого управління енергетичними потоками в реальному часі. Синергетичні фактори відображають соціально-організаційний вимір переходу – формування горизонтальних мережних систем і спільнот типу EnergyNet, енергетичних кооперативів, блокчейн-енергетики. Саме вони забезпечують узгодження інтересів держави, бізнесу й громад на основі децентралізованої взаємодії та довіри. У комплексі ці три групи факторів утворюють системну матрицю переходу до сестейнової, антикрихкої енергетики, що відповідає викликам епохи Industry 5.0.

Для кількісного вимірювання ефективності переходу автором запропоновано два узагальнені показники.

Для кількісного оцінювання рівня переходу до адитивної енергетики і рівня енергетичної стійкості та автономності території можна використати інтегральний показник енергетичної сестейновості території, який об'єднує технічні, технологічні, організаційні та екологічні параметри розвитку енергетичної системи:

$$S_E = \alpha_1 \times R_{alt} + \alpha_2 \times A_{add} + \alpha_3 \times H_{net} - \alpha_4 \times D_{CO_2} \quad (1)$$

де, R_{alt} – частка відновлюваної енергії у загальному виробництві; A_{add} – рівень впровадження адитивних технологій у виробництво; H_{net} – індекс горизонталізації енергетичних систем; D_{CO_2} – питомі викиди вуглецю на одиницю виробленої енергії; α_i – вагові коефіцієнти, що визначаються експертно залежно від типу території, її природного потенціалу та рівня технологічного розвитку.

Якщо $S_E > 0.7$ – територія характеризується високим рівнем енергетичної автономності й належить до категорії «антикрихких» систем; якщо $S_E = 0.4-0.7$ – формується перехідна модель, де

процес децентралізації вже запущено, але залежність від централізованих мереж ще зберігається; якщо $S_E < 0.4$ – територія залишається енергозалежною, тобто функціонує в межах субтрактивної парадигми.

Показник S_E дає змогу діагностувати рівень енергетичної самодостатності та визначити стратегічні пріоритети розвитку енергетики – від локального балансування до створення регіональних EnergyNet-кластерів, що інтегрують відновлювану, адитивну та цифрову енергетику в єдину сестейнову систему.

Для оцінювання економічного потенціалу децентралізованих енергетичних рішень на рівні підприємства або територіальної громади, визначення оптимального строку окупності проєктів у сфері «зеленої» енергетики та планування переходу до адитивної економіки можна визначити ефект адитивного переходу визначається за формулою:

$$E_{add} = \sum_{t=1}^T \frac{(C_{trad} - C_{alt}) + D}{(1+r)^t} - I_0 \quad (2)$$

C_{trad} – щорічні витрати на споживання традиційної (викопної) енергії; C_{alt} – витрати на енергозабезпечення після переходу на ВДЕ (сонячні, вітрові, біоенергетичні установки); D – дохід від реалізації надлишкової енергії за «зеленим» тарифом; r – дисконтна ставка, що враховує вартість капіталу, інфляційні ризики та невизначеність ринку; I_0 – початкові інвестиційні витрати на встановлення альтернативної енергосистеми; T – розрахунковий період життєвого циклу проєкту.

Якщо $E_{add} > 0$, проєкт вважається економічно ефективним, тобто чистий приведений ефект (NPV) від переходу на ВДЕ є позитивним і забезпечує окупність вкладених ресурсів у межах розрахункового періоду. У випадку $E_{add} < 0$ – інвестиція не покриває витрат, і модель потребує оптимізації (наприклад, через державні стимули, податкові пільги або корекцію тарифної політики).

Таким чином, результати дослідження свідчать, що перехід до сестейнових моделей енергетичного забезпечення є багатовимірним процесом, у якому поєднуються технологічні інновації, цифрова трансформація, соціальна синергія та екологічна відповідальність. Адитивна енергетика, базована на принципах горизонтальності, децентралізації та інтелектуального управління, формує нову архітектуру енергетичної системи, що здатна функціонувати в умовах невизначеності, зберігаючи енергетичну автономність і стійкість територій. У рамках концепції Industry 5.0 та Society 5.0 вона виступає інженерним зрушенням, що змінює логіку відтворення енергії та вартості – від експлуатаційного «споживання» до інтеграційного «додавання». Запропонований в роботі

інтегральний показник енергетичної сестейновості (SE) створює основу для стратегічного планування розвитку енергетики та бізнесу в напрямі адитивної економіки, сприяючи формуванню систем антикрихкої, децентралізованої та екологічно безпечної енергетики, орієнтованої на майбутнє сталою розвитку.

Висновки. Результати проведеного дослідження підтверджують, що перехід до сестейнових моделей енергетичного забезпечення є не лише технологічною модернізацією, а системною трансформацією парадигми розвитку економіки. Він поєднує екологічну доцільність, соціальну солідарність і цифрову адаптивність, утворюючи нову архітектуру енергетичних відносин, де пріоритет надається децентралізації, гнучкості та енергетичній автономності територій. Адитивна енергетика в цьому контексті постає як ядро майбутньої економічної системи, що здатна підтримувати стійкість суспільства навіть у кризових і воєнних умовах, зменшуючи залежність від викопних ресурсів і централізованих мереж.

Обґрунтовано, що розвиток адитивної енергетики спирається на синергію трьох факторних груп – матеріальної, інформаційної та соціально-синергетичної. Вони формують взаємопов'язану систему, в якій технологічні інновації (3D-друк, Smart Grid, водневі установки) взаємодіють із цифровими інструментами управління (AI, Big Data, хмарні платформи) та мережевими кооперативами типу EnergyNet. Саме ця триєдність забезпечує адаптивність та антикрихкість енергетичної системи, перетворюючи енергоспоживача на активного учасника процесу генерації та збереження енергії.

Наукова новизна полягає у формалізації системного підходу до переходу від субтрактивної до адитивної моделі енергетики, що інтегрує технічні, інформаційні та синергетичні фактори розвитку.

Запропонований у статті інтегральний показник енергетичної сестейновості (S_E) дає змогу кількісно оцінювати рівень автономності та екологічної ефективності територій, а також використовувати його як інструмент стратегічного планування енергетичної політики. Отже, перехід до адитивної енергетики є невідворотним напрямом еволюції економічних систем у добу Industry 5.0 та Society 5.0. Він формує підґрунтя для нової енергетичної культури, де енергія розглядається не як ресурс для споживання, а як елемент сталою розвитку, взаємодії та синергетичного співіснування людини, технологій і природи.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Мельник Л. Г. Адитивна економіка (Економіка перетворень): Досвід ЄС щодо економічних перетворень в ході Industries 3.0, 4.0, 5.0 : монографія. Суми : Університетська книга, 2023. 208 с.

2. Melnyk L., Matsenko O., Kubatko O., Korneyev M., Tulyakov O. Additive economy and new horizons of innovative business development. *Problems and Perspectives in Management*. 2022. 20 (2). S. 175–185. DOI: [https://doi.org/10.21511/ppm.20\(2\).2022.15](https://doi.org/10.21511/ppm.20(2).2022.15)
3. Matsenko O., Melnyk L., Skrypka Y., Dehtyarova I., Kozmenko S., Kalinichenko L. Military and economic prerequisites for transforming the energy supply of the housing sector of Ukraine based on Industry 3.0. *International Journal of Global Energy Issues*. 2025. 47 (1-2). P. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2025.143354>
4. ЕВА (2025). Бізнес у новій енергетичній реальності: як відновлювана енергія змінює корпоративні моделі. URL: <https://eba.com.ua/biznes-u-novij-energetychnij-realnosti-yak-vidnovlyuvana-energiya-zminyuye-korporatyvni-modeli>
5. International Monetary Fund. (2024) European Dept. “Ukraine: Fourth Review of the Extended Arrangement under the Extended Fund Facility, Request for Modifications of a Performance Criterion, and Financing Assurances Review-Press Release; Staff Report; and Statement by the Executive Director for Ukraine”, IMF Staff Country Reports 2024, 199, accessed 11.11.2025. DOI: <https://doi.org/10.5089/9798400282386.002>
6. Polityuk P. (2024). Ukraine's DTEK to receive 107 mln euros from EU, US to rebuild power facilities. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/ukraines-dtek-receive-107-mln-euros-eu-us-rebuild-power-facilities-2024-11-25>
7. Піщимуха А. (2025). Україна готується до важкої зими – чи витримає енергосистема? Фарватер.Схід. URL: <https://farvatermedia.com/news/sylyspetsoperatsii-likviduvaly-drh-protyvnyka-v-yampoli-na-donechchyni>
8. GOLAW (2024). Сучасний стан української енергетики. Energy Alert Дайджест. URL: <https://golaw.ua/ua/insights/energy-alert/suchasnij-stan-ukrayin-skoji-energetiki>
9. RDNA1. (2022). European Union; Nations, United; Ukraine, Government of; World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (English). Washington, D.C.: World Bank Group. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099445209072239810>
10. RDNA 2. (2023). European Union; Government of Ukraine; United Nations; World Bank. Second Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2) : February 2022 – February 2023 (English). Washington, D.C. : World Bank Group. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099184503212328877>
11. RDNA 3. (2023). European Union; Nations, United; Ukraine, Government of; World Bank. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) : February 2022 – December 2023 (English). Washington, D.C. : World Bank Group. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099021324115085807>
12. RDNA 3. (2025). European Union; Nations, United; Ukraine, Government of; World Bank. Ukraine – Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4) : February 2022 – December 2024 (English). Washington, D.C. : World Bank Group. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099022025114040022>
13. Pidubnyi I. & Goriunov D. (2024). Assessment of Damages and Losses to Ukraine's Energy Sector Due to Russia's Full-scale Invasion. KSE. URL: https://dtek.com/content/upload/urc/Kyiv%20School%20of%20Economics_2024.pdf
14. Khaleel, M., & Yusupov, Z. (2026). Advancing sustainable energy transitions: Insights on finance, policy, infrastructure, and demand-side integration. *Unconventional Resources*, 9, 100274. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.UNCRE.2025.100274>
15. Li R., Kubatko O., Baranchenko Y., Benetyte R., Melnyk L., Dehtyarova I., Matsenko O. Environmental and economic analysis of technological innovations in the energy sector. *International Journal of Global Environmental Issues*. 2022.No 21 (2-4). P. 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijgenvi.2022.126204>
16. Melnyk, L., Vasa, L., Singh, S., Kubatko, O., & Kalinichenko, L. (2025). Quasi-Viral Technologies as the Drivers of the Economy Digital Transformation Towards sustainability. *HighTech and Innovation Journal*, 6(1), 183–200. DOI: <https://doi.org/10.28991/HIJ-2025-06-01-013>
17. Bandura R. & Romanishyn A. (2025). Striving for Access, Security, and Sustainability: Ukraine's Transition to a Modern and Decentralized Energy System. The Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/striving-access-security-and-sustainability>
18. Parodi A. & Williams N. (2025). Ukraine's DTEK buys 200MW energy storage systems in bid to limit outages. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/ukraines-dtek-buys-200mw-energy-storage-systems-bid-limit-outages-2025-01-13>
19. Voitenko, V., & Polishchuk, R. (2025). Decentralised generation and its role in enhancing the resilience of energy islands and critical infrastructure: Current trends and prospects. *Technologies and Engineering*, 26(2), 11–26. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.2.1>
20. Rolando, B., & Ingriana, A. (2024). Sustainable Business Models in the Green Energy Sector: Creating Green Jobs through Renewable Energy Technology Innovation. *International Journal of Economics and Business Studies*, 1(1), 43–56. DOI: <https://doi.org/10.1234/IJEBS.V1I1.3>

REFERENCES:

- Melnyk L. H. (2023). Adytyvna ekonomika (Ekonomika peretvoren): Dosvid YeS shchodo ekonomichnykh peretvoren v khodi Industries 3.0, 4.0, 4.0, 5.0 : monohrafiia. Sumy : Unversytetska knyha, 208 s.
- Melnyk L., Matsenko O., Kubatko O., Korneyev M., Tulyakov O. (2022). Additive economy and new horizons of innovative business development. *Problems and Perspectives in Management*, vol. 20 (2), pp. 175–185. DOI: [https://doi.org/10.21511/ppm.20\(2\).2022.15](https://doi.org/10.21511/ppm.20(2).2022.15)
- Matsenko O., Melnyk L., Skrypka Y., Dehtyarova I., Kozmenko S., Kalinichenko L. (2025). Military and economic prerequisites for transforming the energy supply of the housing sector of Ukraine based on Industry 3.0. *International Journal of Global Energy Issues*, vol. 47 (1-2), pp. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2025.143354>
- EBA (2025). Biznes u novii enerhetychnii realnosti: yak vidnovliuvana enerhiia zminiuie korporatyvni

modeli. Available at: <https://eba.com.ua/biznes-u-novij-energetychnij-realnosti-yak-vidnovlyuvana-energiya-zminyuye-korporatyvni-modeli>

5. International Monetary Fund. (2024) European Dept. "Ukraine: Fourth Review of the Extended Arrangement under the Extended Fund Facility, Request for Modifications of a Performance Criterion, and Financing Assurances Review-Press Release; Staff Report; and Statement by the Executive Director for Ukraine", IMF Staff Country Reports 2024, 199, accessed 11.11.2025. DOI: <https://doi.org/10.5089/9798400282386.002>

6. Polityuk P. (2024). Ukraine's DTEK to receive 107 mln euros from EU, US to rebuild power facilities. Reuters. Available at: <https://www.reuters.com/business/energy/ukraines-dtek-receive-107-mln-euros-eu-us-rebuild-power-facilities-2024-11-25>

7. Pishchymukha A. (2025). Ukraina hotuietsia do vazhkoi zymy — chy vytrymaie enerhosystema? Farvater.Skhid. Available at: <https://farvatermedia.com/news/syly-spetsoperatsii-likviduvaly-drh-protyvnyka-v-yampoli-na-donechchyni>

8. GOLAW (2024). Suchasnyi stan ukrainskoi enerhetyky. Energy Alert Daidzhest. Available at: <https://golaw.ua/ua/insights/energy-alert/suchasnij-stan-ukrayinskoyi-energetiki>

9. RDNA 1. (2022). European Union; Nations, United; Ukraine, Government of; World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (English). Washington, D.C.: World Bank Group. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099445209072239810>

10. RDNA 2. (2023). European Union; Government of Ukraine; United Nations; World Bank. Second Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2) : February 2022 – February 2023 (English). Washington, D.C. : World Bank Group. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099184503212328877>

11. RDNA 3. (2023). European Union; Nations, United; Ukraine, Government of; World Bank. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) : February 2022 – December 2023 (English). Washington, D.C. : World Bank Group. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099021324115085807>

12. RDNA 3. (2025). European Union; Nations, United; Ukraine, Government of; World Bank. Ukraine – Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4) : February 2022 – December 2024 (English). Washington,

D.C. : World Bank Group. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099022025114040022>

13. Piddubnyi I. & Goriunov D. (2024). Assessment of Damages and Losses to Ukraine's Energy Sector Due to Russia's Full-scale Invasion. KSE. Available at: https://dtek.com/content/upload/urc/Kyiv%20School%20of%20Economics_2024.pdf

14. Khaleel M., Yusupov Z. (2026). Advancing sustainable energy transitions: Insights on finance, policy, infrastructure, and demand-side integration. *Unconventional Resources*, no. 9, 100274. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.UNCRE.2025.100274>

15. Li R., Kubatko O., Baranchenko Y., Benetyte R., Melnyk L., Dehtyarova I., Matsenko O. (2022). Environmental and economic analysis of technological innovations in the energy sector. *International Journal of Global Environmental Issues*, no. 21 (2-4), pp. 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijgenvi.2022.126204>

16. Melnyk L., Vasa L., Singh S., Kubatko O., Kalinichenko L. (2025). Quasi-Viral Technologies as the Drivers of the Economy Digital Transformation Towards sustainability. *HighTech and Innovation Journal*, vol. 6(1), pp. 183–200. DOI: <https://doi.org/10.28991/HIJ-2025-06-01-013>

17. Bandura R. & Romanishyn A. (2025). Striving for Access, Security, and Sustainability: Ukraine's Transition to a Modern and Decentralized Energy System. The Center for Strategic and International Studies. Available at: <https://www.csis.org/analysis/striving-access-security-and-sustainability>

18. Parodi A., Williams N. (2025). Ukraine's DTEK buys 200MW energy storage systems in bid to limit outages. Reuters. Available at: <https://www.reuters.com/business/energy/ukraines-dtek-buys-200mw-energy-storage-systems-bid-limit-outages-2025-01-13>

19. Voitenko V., Polishchuk R. (2025). Decentralised generation and its role in enhancing the resilience of energy islands and critical infrastructure: Current trends and prospects. *Technologies and Engineering*, vol. 26(2), pp. 11–26. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.2.1>

20. Rolando B., Ingriana A. (2024). Sustainable Business Models in the Green Energy Sector: Creating Green Jobs through Renewable Energy Technology Innovation. *International Journal of Economics and Business Studies*, vol. 1(1), pp. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.1234/IJEBS.V1I1.3>