

DIGITAL TECHNOLOGIES IN RENEWABLE ENERGY: ECONOMIC CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВІДНОВЛЮВАНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ: ЕКОНОМІЧНІ ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ

Олена Кліменко

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Харків, Україна

elena.n.klimenko@gmail.com

Abstract. This article examines the impact of digital technologies on the development of renewable energy, as well as the economic opportunities and challenges associated with the implementation of digital technologies in the renewable energy sector. Special attention is given to key digital technologies such as the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence, and blockchain, which are actively used to optimize energy production and distribution. The economic benefits of digitalization in energy systems are analyzed, including cost reduction, efficiency improvement, and the introduction of new business models. Investment barriers, cybersecurity issues, and the need for regulatory adaptation to new conditions are also discussed. The final section proposes promising directions for the development of digital technologies in renewable energy. **Keywords:** digital transformation, renewable energy sources, Internet of Things, artificial intelligence, blockchain, energy optimization,

Анотація. У статті досліджується вплив цифрових технологій на розвиток відновлювальної енергетики, а також економічні можливості та виклики впровадження цифрових технологій у сектор відновлюваних джерел енергії. Особливу увагу приділено основним цифровим технологіям, таким як Інтернет речей (IoT), великі дані (big data), штучний інтелект, блокчейн, які активно використовуються для оптимізації виробництва та розподілу енергії. Аналізуються економічні переваги цифровізації енергетичних систем, включаючи зниження витрат, підвищення ефективності та впровадження нових бізнес-моделей. Окремо розглянуто інвестиційні бар'єри, питання кібербезпеки та необхідність адаптації регулюючих норм до нових умов. У фінальній частині запропоновано перспективні напрями розвитку цифрових технологій у відновлюваній енергетиці. **Ключові слова:** цифрова трансформація, відновлювальні джерела енергії, Інтернет речей, штучний інтелект, блокчейн, оптимізація енергетики.

Світовий енергетичний сектор у нинішні часи зазнає значних змін під впливом цифровізації та розвитку відновлюваних джерел енергії. Сталий розвиток економіки вимагає переходу до екологічно чистих та ефективних енергетичних рішень, що знижують залежність від викопних ресурсів. У відповідь на глобальні виклики, такі як зміна клімату, енергетична безпека та нестабільність традиційних енергоресурсів, світові економіки все більше зосереджуються на пошуку інноваційних рішень для оптимізації виробництва, розподілу та споживання енергії.

Сучасні підходи до застосування відновлюваних джерел енергії немислимі без цифрових технологій. Розвиток відновлювальної енергетики, внаслідок її інноваційного характеру, можливий лише за впровадженням новітніх розробок у цифровізаційній сфері. Значення цифрових технологій неможливо перебільшити у трансформації відновлюваної енергетики. Всі виклики сьогодення – підвищення ефективності енергетичних систем, зниження витрат, забезпечення більш гнучкого управління, інтеграції децентралізованих енергоресурсів тощо, у цій сфері енергетики вирішуються лише цифровими інноваціями. Водночас впровадження цифрових технологій в енергетику, особливо в сферу використання відновлюваних джерел

супроводжується низкою економічних проблем, зокрема необхідністю значних вартісних інвестицій, питаннями кібербезпеки та адаптацією нормативно-правової бази.

Важливо відзначити, що цифрова трансформація в енергетичному секторі стосується не лише енергетичних компаній-виробників, а всіх гравців енергетичного комплексу. Простежимо ланцюжок: мережеві оператори, роздрібні постачальники, кінцеві споживачі – домогосподарства або підприємства, комунальні компанії, виробничі підприємства. Потенційні вигоди у цифровізації відновлювальної енергетики є для кожного з них. Так, за McKinsey (2018), мережеві оператори одержують широкі можливості для модернізації мережевої інфраструктури за допомогою цифрових технологій за використанням вдосконалених систем управління розподілом, що дозволяє здійснювати моніторинг стану мережі в режимі реального часу; інтелектуальних лічильників, що допомагають запобігти перевантаженню та оптимізувати розподіл ресурсів на основі моделей споживання; хмарних рішень, що дозволяють швидко реагувати на будь-які зміни у системі. Роздрібні постачальники часто стикаються з вимогами цифровізації у взаємодії з клієнтами. Кінцеві споживачі, чи то домогосподарства чи підприємства, мають певні очікування, які стосуються прозорих можливостей керування енергоспоживанням; можливості участі у децентралізованих системах виробництва за рахунок використання сонячної енергії та рішень щодо зберігання; участі у торгівлі надлишками та багато іншого. Звичайно, ці очікування неможливо задовольнити без цифрових технологій: програмного забезпечення, послуг, обладнання та необхідних обчислювальних потужностей. Комунальні компанії, у свою чергу, повинні вирішувати проблеми пікового навантаження, щоб задовольнити попит, що зростає, і скоротити кількість несподіваних відключень. Виробничі підприємства, які впроваджують цифрові інструменти, набувають конкурентної переваги в умовах зростаючої конкуренції. Цифрові інструменти допомагають впроваджувати нові бізнес-моделі та адаптуватися до глобальної невизначеності.

Метою даного дослідження є аналіз можливостей та викликів цифровізаційних технологій для відновлюваної енергетики, а також оцінка її впливу на економіку. Для досягнення цієї мети автор ставить завдання розглянути основні цифрові технології, їх вплив на економічну ефективність енергетичних систем, а також потенційні ризики та перспективи розвитку цифрових технологій у відновлювальній енергетиці.

Важливість цифрових трансформацій в енергетичному секторі взагалі та у секторі відновлювальної енергетики визначається необхідністю оптимізації процесів, підвищенням енергоефективності та управління енергоресурсами. Згідно досліджень світових вчених, за впровадженням нових цифрових технологій енергетичні компанії можуть майже на третину скоротити свої витрати на експлуатацію капіталу і підвищити загальну продуктивність підприємства на 5 – 15 % (Борзенко & Глазова, 2024). Крім того, за даними статистичного агентства Statista (2025) згідно фактичних та прогнозних даних, під впливом соціально-демографічних та економічних факторів зростає попит на електроенергію (рис. 1). Як видно з рисунка, подано загальне постачання первинної енергії в усьому світі у 2022 році та прогноз на 2030–2050 роки за сценарієм обмеження глобального потепління до 1,5°C. Дані представлені в екзаджоулях (EJ) на рік та розподілені за трьома основними джерелами енергії: викопні палива (fossil fuels) – синій колір; відновлювані джерела енергії (renewables) – темно-синій колір; ядерна енергетика (nuclear) – сірий колір. За основними тенденціями у 2022 році основним джерелом енергії залишалися викопні палива (514 EJ), тоді як відновлювані джерела постачали 88 EJ, а ядерна енергетика – 31 EJ. До 2030 року прогнозується значне зростання відновлюваних джерел енергії (206 EJ), тоді як використання викопного палива скоротиться до 348 EJ. До 2050 року очікується радикальна зміна енергетичного балансу: відновлювані джерела енергії стануть домінуючими – 488 EJ; викопні палива значно скоротяться – до 100 EJ; ядерна енергетика зросте незначно – до 38 EJ. Таким чином, за даними Statista (2025) та IRENA (2022), очікується глобальний перехід на відновлювану енергетику. Викопні палива поступово витіснятимуться з енергетичного балансу, а ядерна енергетика матиме стабільне, але незначне зростання.

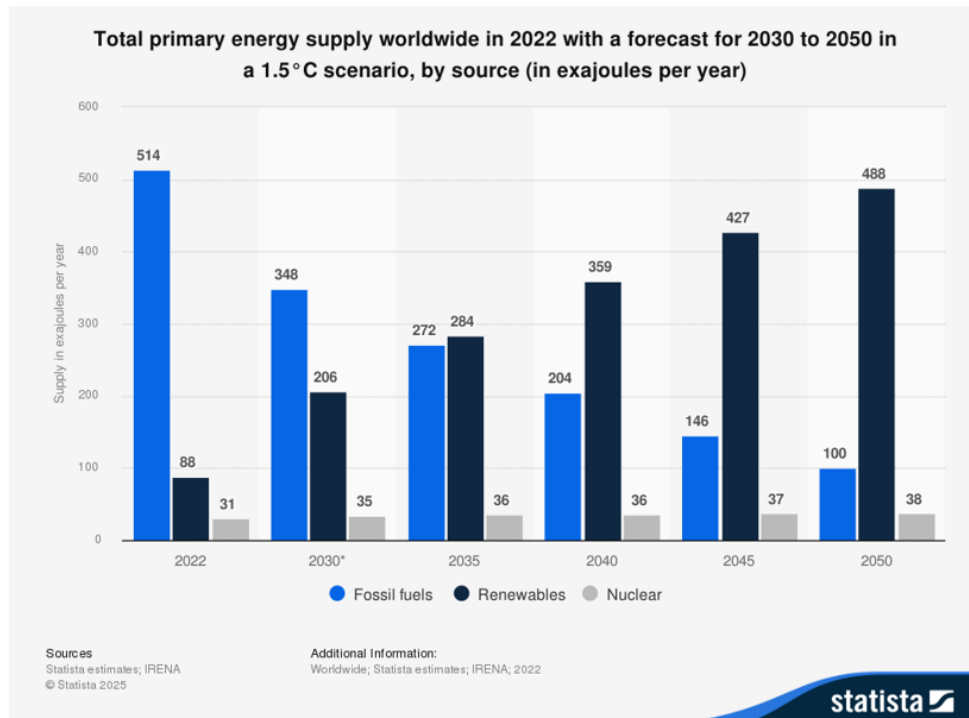


Рис. 1. Загальне постачання первинної енергії в усьому світі в 2022 році з прогнозом на 2030-2050 роки (в ЕІ на рік). Джерело: Statista (2025)

У 2022 році світове споживання первинної енергії досягло рекордного рівня, відновившись після спаду, спричиненого пандемією COVID-19. Споживачі витратили майже 10 трильйонів доларів США на енергію, що в середньому становить понад 1 200 доларів на особу (IEA, 2023).

Згідно з прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (IEA), частка викопних палив у глобальному енергопостачанні, яка протягом десятиліть залишалася на рівні близько 80%, почне знижуватися і досягне 73% до 2030 року. У сценарії Net Zero Emissions by 2050 (NZE) частка викопних палив знизиться до 62% до 2030 року, а інвестиції в чисту енергію зростуть до майже 5 трильйонів доларів США на рік після 2030 року (IEA, 2023)..

Альтернативні сценарії передбачають, що до 2040 року загальний попит на первинну енергію може становити 450 ексаджоулів (ЕДж) у сценарії з підвищенням температури на 2 °C або 400 ЕДж у сценарії з підвищенням на 1,5 °C, що є нижчим за поточний рівень виробництва. До 2050 року відновлювані джерела енергії можуть задовольнити майже весь енергетичний попит (IEA, 2023).

Ці прогнози підкреслюють необхідність глобальних зусиль для переходу до відновлюваних джерел енергії та досягнення цілей сталого розвитку.

При чому, підприємства енергетичного сектору повинні враховувати світові тенденції поступового глобального переходу на «зелену» економіку. Це означає, головним чином, декарбонізацію та перехід на чисту енергію. Ці виклики показують необхідність втілення цифрових інноваційних рішень, які в змозі вирішити ці питання. До того ж, задоволення постійно зростаючого попиту на енергію з відновлюваних джерел, приводить до збільшення навантаження на енергосистеми. Не варто також забувати про тенденції зростання децентралізації в енергетичному секторі. Все це потребує додаткового моніторингу та управління в реальному часі. Дійсно, лише автоматизовані системи управління новітнього покоління з втіленням штучного інтелекту можуть виконати ці задачі.

Слід сказати, що світові стандарти з охорони довкілля і досягнення нульових викидів у 2050 році потребують від будь-яких компаній зниження впливу на навколишнє середовище (IEA, 2023). Це рішення теж потребує корегування та втілення цифрових інструментів.

Світові запаси викопного палива виснажуються, їх видобування стає все складнішим і технологічно, і технічно, і за витратами. Збільшується навантаження на навколишнє середовище. Да і взагалі багато чого можна сказати на користь відновлюваних джерел енергії. Всі аргументи плюс зростання попиту на світовому енергетичному ринку саме на чисту енергію потребує втілення нових цифрових технологій і розуміння, що розвиток енергетичного ринку неможливий без цифровізації. В даному контексті майбутнє за відновлювальною енергетикою та цифровими технологіями.

Розглянемо цифрові технології, які можна використовувати для розвитку відновлюваної енергетики із забезпеченням ефективності, автоматизації та оптимізації процесів.

Інтернет речей, Internet of Things або прийняте скорочення IoT, використовують для застосування сенсорів та розумних лічильників, що збирають дані про виробництво та споживання енергії в режимі реального часу; автоматизованого моніторингу стану обладнання, що попереджає про несправності та оптимізує технічне обслуговування; систем управління мікро-мережами для балансування навантаження між різними джерелами енергії (Іванцов, 2024).

Штучний інтелект, AI, застосовується для прогнозування виробництва енергії, де AI-алгоритми аналізують погодні умови, щоб передбачити генерацію сонячної та вітрової енергії, а також для оптимізації роботи енергосистеми, де AI допомагає балансувати попит і пропозицію, зменшуючи втрати енергії (Gielen et al., 2019). Ще можна згадати про машинне навчання, ML, для виявлення аномалій, де системи машинного навчання автоматично виявляють несправності та прогнозують можливі поломки.

Великі дані, Big Data, та аналітика використовують для обробки великих обсягів даних при аналізі показників роботи сонячних і вітрових станцій для підвищення ефективності, також для моделювання сценаріїв розвитку відновлюваних джерел енергії застосовують аналітику для прогнозування енергетичних трендів та планування розширення діяльності (Parag & Sovacool, 2016). Крім того, для оптимізації споживання енергії при аналізі поведінки користувачів для розробки персоналізованих тарифів.

Технологія Блокчейн у відновлювальній енергетиці використовують у децентралізованих енергетичних ринках для забезпечення прозорості та безпеки угод у реє-то-реє торгівлі енергією між виробниками та споживачами; укладання смарт-контрактів для автоматизації процесів укладання угод між учасниками енергетичних мереж; забезпечення довіри, тому що блокчейн-фіксація виробництва та споживання відновлюваних джерел енергії гарантує достовірність екологічних сертифікатів.

Хмарні технології, Cloud Computing, використовують для обробки та зберігання даних, тому що хмарні платформи дозволяють централізовано керувати розподіленими енергетичними об'єктами; для віддаленого управління енергетичними станціями та забезпечення доступу до даних і контролю роботи станцій у будь-який час (Gielen et al., 2019); для гнучкого масштабування і можливості підключення нових об'єктів без необхідності дорогих оновлень апаратного забезпечення (Gielen et al., 2019).

Цифрові двійники Digital Twins – застосування для моделювання енергетичних систем і створення віртуальних копій сонячних, вітрових або гідроелектростанцій для тестування сценаріїв їх роботи. І крім того, для оптимізації обслуговування та прогнозування необхідності ремонтних робіт на основі даних цифрового двійника, а також для тестування нових рішень і можливість віртуального випробування технологій перед їх фізичною інтеграцією.

5G та розумні енергетичні мережі Smart Grids – ці нові технології призначені у відновлювальній енергетиці для швидкого передавання даних та забезпечення безперебійного зв'язку між пристроями IoT та центральними системами управління; для автоматичного перерозподілу енергії між об'єктами ВДЕ та споживачами при використанні розподіленої

енергетики та розумних мереж; для реагування на зміни в реальному часі, завдяки чому енергетичні компанії можуть швидко адаптувати мережу до змін у виробництві та попиті.

Зведемо ці дані (табл. 1) для структурування та упорядкування.

Таблиця 1. Основні цифрові технології для застосування у відновлювальній енергетиці

Технологія	Застосування у відновлювальній енергетиці
Інтернет речей (IoT)	Моніторинг стану обладнання, розумні лічильники, балансування енергомереж
Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML)	Прогнозування виробництва енергії, оптимізація балансування попиту та пропозиції, виявлення помилок
Великі дані (Big Data)	Аналіз даних з енергетичних установок, оптимізація використання ресурсів, прогнозування попиту
Блокчейн	Децентралізовані P2P енергетичні ринки, смарт-контракти, сертифікація походження енергії
Хмарні технології (Cloud Computing)	Централізоване управління ВДЕ-станціями, зберігання та обробка великих обсягів даних
Цифрові двійники (Digital Twins)	Віртуальне моделювання ВДЕ-станцій, прогнозування помилок, оптимізація роботи обладнання
5G та розумні енергетичні мережі (Smart Grids)	Швидке передавання даних між енергосистемами, адаптація до змін у генерації та споживанні

Отже, застосування цифрових технологій у відновлювальній енергетиці дозволяє підвищити ефективність виробництва та споживання енергії, мінімізувати втрати та інтегрувати ВДЕ у глобальні енергетичні системи. Найперспективнішими напрямками є IoT, AI, Big Data, блокчейн та цифрові двійники. Ці технології сприяють розвитку «розумних» енергетичних систем і забезпечують надійну інтеграцію відновлюваних джерел енергії у майбутню екологічно чисту енергетику.

Слід сказати, що впровадження цифрових технологій у відновлювальну енергетику властива далеко не у всіх корпораціях ВДЕ Європи та світу. Застосування цифрових технологій залежить від багатьох факторів. По-перше, це рівень розвитку компанії та її технологічна стратегія. Великі міжнародні енергетичні компанії, такі, як: Siemens Energy, Shell, TotalEnergies, Enel, Ørsted, Vestas (U.S. Department of Energy, 2022), активно впроваджують AI, IoT, Big Data та цифрові двійники для управління своїми ВДЕ-об'єктами. Малі та середні підприємства часто відстають через високі витрати на цифрові технології. По-друге, це регулювання та екологічна політика країни. У ЄС діє Європейський Зелений Курс, який стимулює цифровізацію ВДЕ через дотації та законодавчі вимоги. У країнах з менш розвинутою екологічною політикою цифрові технології застосовуються повільніше (Васильківський & Сисюк, 2024). По-третє, інфраструктура та доступ до технологій. У США, ЄС, Китаї розвинена цифрова інфраструктура, тому корпорації активно використовують блокчейн, AI та IoT. У країнах, де 5G і Smart Grid ще не розвинені, корпорації змушені покладатися на традиційні методи управління. По-четверте, вартість та окупність інвестицій. Технології Big Data, AI та цифрові двійники вимагають значних інвестицій, тому їх першими впроваджують фінансово потужні компанії. Деякі компанії не поспішають з цифровізацією, поки ці технології не стануть більш доступними. Але все ж таки розвиток цифрових технологій у ВДЕ зростає, і найближчими роками все більше компаній будуть їх застосовувати, особливо через посилення екологічних стандартів та політики сталого розвитку.

Дійсно, на даний момент усі цифрові перетворення зосереджені на операціях та пошуку цільових рішень. Світова економіка знаходиться на початку шляху, який має призвести до радикального переосмислення енергетичного сектору. Проте вже зараз можна спостерігати чіткі тенденції, які довели свою ефективність практично. Простежимо основні світові тенденції у цифровізації енергетичного сектору (рис. 2) і розглянемо деякі з них докладніше.

Всі світові тенденції відповідають глобальним ініціативам щодо екологізації економіки та реалізації принципів сталого розвитку, що затверджено у документах ООН та Європи.

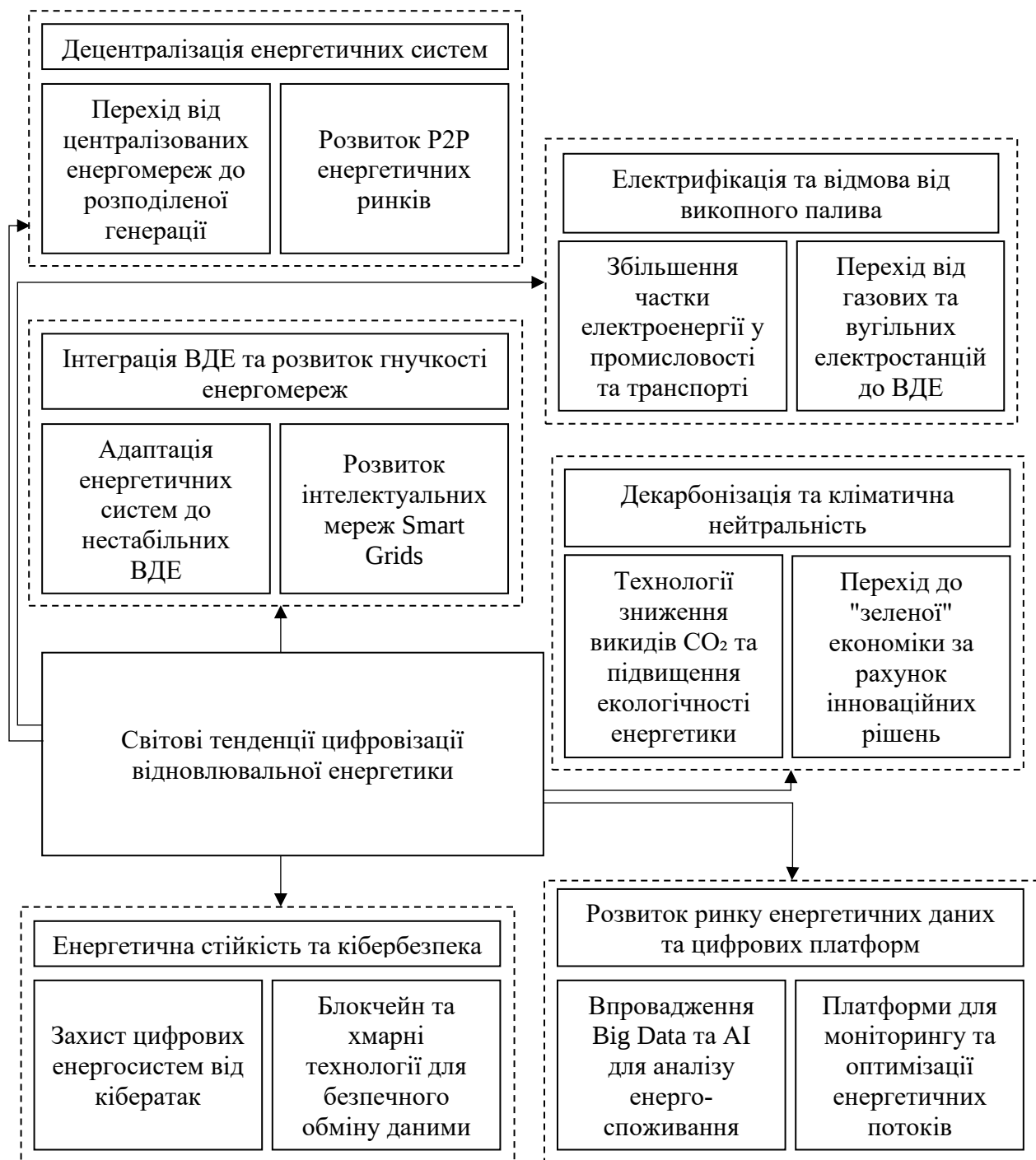


Рис. 2. Світові тенденції у цифровізації енергетичного сектору

Це, наприклад, цілі сталого розвитку ООН у Agenda 2030 – стратегічному плані для забезпечення сталого розвитку в економічній, екологічній та соціальній сферах та Європейський зелений курс, European Green Deal – стратегія ЄС, спрямована на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року та перехід до циркулярної економіки. Так, якщо взяти напрям декарбонізації та кліматичної нейтральності, то тут простежуються принципи екологізації у впровадженні технологій для зниження викидів CO₂ та підвищенні екологічності енергетики, переході до "зеленої" економіки за рахунок інноваційних рішень. Звісно, що ЄС планує досягти нульових викидів до 2050 року за прийнятою стратегією Net Zero (European Commission, 2023). Те ж саме простежується у напрямі електрифікації та відмови від викопного палива, де передбачається збільшення частки електроенергії у промисловості та

транспорті та перехід на електромобілі, електробуси, зарядні станції, а також перехід від газових та вугільних електростанцій до відновлюваних джерел енергії. Звісно, що за планом REPowerEU ЄС передбачає 75% електрифікації до 2050 року (World Economic Forum, 2022). Набирає обертів напрям стосовно децентралізації енергетичних систем та перехід від централізованих енергомереж до розподіленої генерації за участю децентралізованих електростанцій, малих сонячних та вітрових електричних станцій, домашніх батарейних міні-станцій. За статистичними даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA, 2024), 30% світових інвестицій в енергетику у 2023 році було спрямовано на проекти децентралізованої енергетики.

Головна перевага в тому, що децентралізовані енергосистеми стійкіші до збоїв, і у разі виникнення проблем в якійсь частині мережі при, наприклад, аварії на великій електростанції, втрати можуть бути компенсовані за рахунок численних дрібніших джерел. Дрібні та мали децентралізовані електростанції виробляють енергію та споживають її на місці, що знижує витрати на інфраструктуру та втрати при передачі. Але є і негативні наслідки, які виявляються у нерівності в доступі для певних регіонів та груп населення. Вже зараз існує помітний розрив між тими, хто може дозволити собі встановлення сонячних панелей або вітряних турбін, і тими, хто покладається на традиційне виробництво енергії.

Здається вигідним для споживачів розвиток peer-to-peer (P2P) енергетичних ринків для торгівлі електроенергією між споживачами. Так, Німеччина активно впроваджує концепцію "енергетичних громад", де домогосподарства виробляють та продають електроенергію (50Hertz Transmission GmbH, 2023). А Данія використовує вітроенергетику, забезпечуючи понад 50% своєї електроенергії завдяки розвитку інтелектуальних мереж Smart Grids для ефективного балансування попиту та пропозиції, що вже відповідає напряму інтеграції ВДЕ та розвитку гнучкості енергомереж через адаптацію енергетичних систем до нестабільних видів відновлювальної енергетики – сонячної та вітрової енергії. Також для покращення умов споживання електричної енергії сектору ВДЕ у Великій Британії працює Національна цифрова енергетична платформа для управління споживанням через створення відкритих платформ для моніторингу та оптимізації енергетичних потоків та впровадження Big Data та AI для аналізу енергоспоживання. Це вже напрям розвитку ринку енергетичних даних та цифрових платформ. Не варто забувати про небезпеку, яка йде поряд з цифровими технологіями. Тому здається доцільним згадати про напрям енергетичної стійкості та кібербезпеки. Він реалізується через захист цифрових енергосистем від кібератак та використання блокчейну та хмарних технологій для безпечного обміну даними. Так, наприклад, у США запровадили Програму кібербезпеки енергетичного сектору (CESER) для захисту критичної інфраструктури.

Як зрозуміло, основні світові тенденції цифровізації відновлювальної енергетики охоплюють децентралізацію, декарбонізацію, електрифікацію, підвищення стійкості та розвиток цифрових рішень. Головна мета всіх напрямів – це створення більш ефективної, безпечної та сталої енергетичної системи.

Отже, цифрові технології відіграють важливу роль у трансформації відновлюваної енергетики, відкривають нові економічні можливості для ефективного виробництва, розподілу та споживання енергії. Використання штучного інтелекту, Інтернету речей, блокчейн-рішень та прогнозової аналітики дозволяє оптимізувати роботу енергосистем, знижувати витрати та створювати нові бізнес-моделі. Це сприяє не лише зростанню частки відновлюваних джерел енергії, а й підвищенню конкурентоспроможності енергетичних компаній у сучасних умовах цифрової економіки.

Один із основних напрямів цифровізації – це застосування прогнозової аналітики на основі штучного інтелекту. Відновлювані джерела енергії, особливо нестійкі, такі як сонячна та вітрова енергія, залежать від погодних умов. Алгоритми машинного навчання аналізують метеорологічні дані та прогнозують виробництво енергії, що дозволяє оптимізувати генерацію за своєчасним плануванням навантаження та зменшувати дисбаланс між попитом і

пропозицією; зменшувати витрати на резервні потужності, адже оператори мереж можуть заздалегідь готувати альтернативні сценарії.

Щодо розумного управління мікро мережами, то цифрові технології дозволяють створювати мікро мережі – локальні енергосистеми, які можуть працювати незалежно або бути підключеними до загальної мережі. Основні переваги таких рішень дуже суттєві. Це і автоматичне балансування попиту та пропозиції в межах локальних спільнот, і швидке реагування на перебої в електропостачанні, що підвищує енергетичну безпеку, і інтеграція різних джерел енергії, зокрема сонячних батарейних міні станцій, вітрових турбін та акумуляторних систем.

Інтелектуальні, або розумні мережі, Smart Grids – це інфраструктура, яка поєднує традиційні енергетичні системи з цифровими технологіями. Smart Grids використовують IoT-сенсори та блокчейн для моніторингу стану мереж у режимі реального часу, тобто виявлення перевантажень та аварій; автоматичного перерозподілу навантаження для мінімізації втрат; збільшення частки відновлюваної енергетики в енергетичному балансі. Цифрові технології відіграють важливу роль в оптимізації виробництва та розподілу відновлюваної енергії. Завдяки прогнозній аналітиці, мікро мережам та інтелектуальним мережам стає можливим гнучке управління енергосистемами, що не лише підвищує їх ефективність, а й сприяє зниженню витрат та розвитку нових бізнес-моделей (Power Ledger, 2021).

Використання прогнозної аналітики у відновлювальній енергетиці таж має велике значення для відновлювальної енергетики. Прогнозна аналітика є одним з основних інструментів цифрової трансформації у відновлювальній енергетиці. Вона базується на штучному інтелекті, машинному навчанні та аналізі великих даних, що дозволяє операторам енергосистем передбачати виробництво, споживання та потенційні ризики.

Найбільш широко використовуваним відновлювальним джерелом енергії залишається Гідроенергетика. Загальна потужність встановленої гідро електрики у світі перевищує 1 295 ГВт, що становить понад 18% загальної потужності з виробництва електроенергії та понад 54% світової потужності з виробництва відновлюваної енергії (AP News, 2024).

Цифрові технології відіграють ключову роль у модернізації гідроенергетики, підвищуючи її ефективність і стійкість. Використання штучного інтелекту (AI) та Інтернету речей (IoT) дозволяє здійснювати моніторинг стану турбін у реальному часі, що знижує ризик аварій та мінімізує витрати на обслуговування. Також великі дані (Big Data) та прогнозна аналітика сприяють оптимізації виробництва електроенергії, враховуючи погодні умови та рівень води. Сучасні цифрові системи управління (SCADA) забезпечують автоматизацію процесів та інтеграцію гідроелектростанцій у смарт-мережі (Smart Grid), що дозволяє більш ефективно балансувати енергосистему. Використання цифрових двійників ГЕС дозволяє тестувати нові стратегії експлуатації без ризиків для обладнання (Smith & Brown, 2024).

Щодо прогнозування виробництва електроенергії. Відновлювані джерела енергії, такі як сонячні панелі та вітрові турбіни, мають нестабільний характер через їх залежність від погодних умов. Використання AI-алгоритмів у прогнозуванні генерації електроенергії дозволяє:

- аналізувати метеорологічні дані (температура, хмарність, швидкість вітру);
- визначати оптимальні режими роботи електростанцій для максимального виробітку;
- зменшувати коливання напруги у мережі завдяки своєчасному плануванню балансування операторами.

За прогнозуванням виробництва електроенергії є хороший приклад розробки цифрової технології. Google DeepMind у співпраці з компанією Google Energy розробила алгоритм, що дозволяє прогнозувати виробіток вітрових станцій на 36 годин наперед, збільшуючи ефективність їх використання на 20% (Google DeepMind. 2019).

Щодо прогнозування попиту на електроенергію. Завдяки аналізу споживчих звичок та історичних даних прогнозна аналітика допомагає енергетичним компаніям в наступному:

- передбачати пікові навантаження в різні періоди доби;
- визначати найкращі години для зарядки накопичувачів ;

оптимізувати роботу гнучких тарифів за рахунок зниження вартості електроенергії у години низького попиту.

За прогнозуванням попиту на електроенергію теж є хороший приклад розробки цифрової технології. У Німеччині оператор мереж 50Hertz використовує прогнозну аналітику для регулювання частки відновлювальної енергетики в енергобалансі, забезпечуючи стабільність системи навіть за високої частки сонячної та вітрової генерації, і це доходить до 60% у певні періоди (50Hertz Transmission GmbH, 2023).

Щодо зниження ризиків та підвищення надійності мереж, то прогнозна аналітика також дозволяє виявляти потенційні проблеми та уникати аварій. Завдяки аналізу стану обладнання та попереднім даним про поломки алгоритми можуть виконувати наступні функції:

- виявляти зношені компоненти енергосистем до того, як вони вийдуть з ладу;

- прогнозувати енергетичні кризи, такі як нестачу електроенергії через довготривалу відсутність вітру тощо;

- автоматично перемикаати навантаження між регіонами, щоб уникнути перевантаження мереж.

Хорошим прикладом функціонування прогнозної аналітики є застосування компанією IBM Watson штучного інтелекту для енергомереж у США, що дозволяє операторам прогнозувати ймовірність аварій на 70% точніше, знижуючи витрати на ремонт та модернізацію (IBM Watson, 2020).

Таким чином, прогнозна аналітика змінює принципи управління відновлюваною енергетикою, з більш стабільним функціонуванням, економічно вигідною та прогнозованою. Використання AI та Big Data дозволяє оптимізувати генерацію, балансувати попит і мінімізувати ризики, що сприяє ефективному розвитку цифрової енергетики.

Вище вже було згадано про розумне управління мікро мережами у відновлюваній енергетиці у зв'язку зі світовою тенденцією до децентралізації енергетичних систем, що несе економічну вигоду як для виробників, так і для постачальників. Мікро мережі є локальними енергосистемами, які можуть працювати як у складі централізованої мережі, так і у автономному режимі. Вони інтегрують відновлювані джерела енергії, найчастіше це енергія сонця або вітру, в накопичувачі енергії, а цифрові технології, забезпечують ефективний розподіл електроенергії. Розумне управління мікро мережами базується на використанні штучного інтелекту, Інтернету речей та блокчейн-технологій, що дозволяє автоматизувати процеси виробництва, споживання та балансування енергії.

Щодо автоматизації та балансування енергопостачання, то розумні мікро мережі працюють на основі AI-алгоритмів, які аналізують споживання електроенергії в режимі реального часу. Це дозволяє виконувати наступні функції:

- оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії, коли алгоритми визначають найкращий момент для використання сонячної чи вітрової енергії;

- зменшувати перевантаження в мережі за рахунок автоматичного балансування між виробництвом та споживанням енергії;

- перемикаання між джерелами енергії у випадках, коли виробництво з відновлюваних джерел знижується, тоді система автоматично підключає акумулятори або резервне живлення.

Слід згадати, що мікро мережі можуть поєднувати сонячні станції, вітроелектростанції, біогазові установки та інші відновлювані джерела. Використання розумних інверторів та технологій IoT дозволяє наступне:

- визначати оптимальну комбінацію джерел енергії залежно від погодних умов;

- автоматично накопичувати надлишкову енергію у батареиних міні станціях або передавати її в основну мережу;

- забезпечувати стабільну напругу та частоту струму незалежно від коливань генерації.

Одна з головних переваг мікро мереж – це можливість децентралізованої торгівлі електроенергією між споживачами. Технологія блокчейн та «розумні контракти» дозволяють користувачам купувати та продавати надлишкову електроенергію безпосередньо один

одному, без посередників. Ця цифрова технологія вже працює в багатьох домогосподарствах Європи та Америки. Ланцюжок, який створено за цією технологією, відображено на рис. 3.

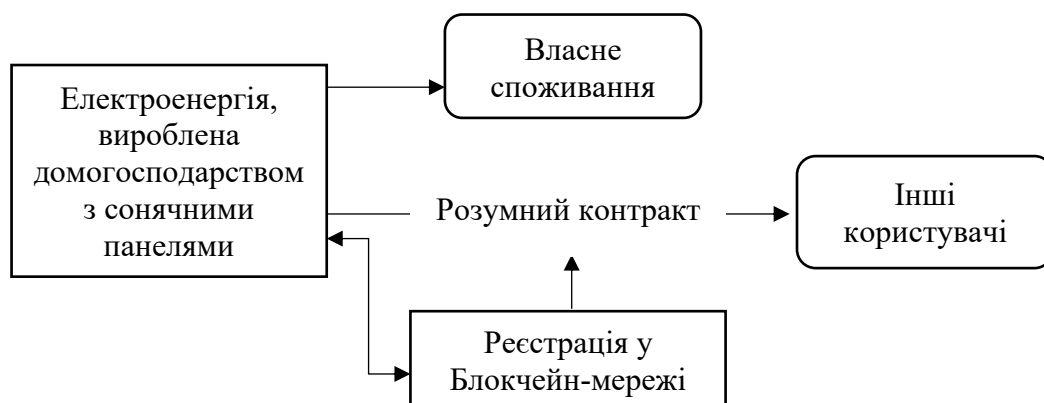


Рис. 3. Модель децентралізованої торгівлі надлишковою електроенергією у мікро мережі через блокчейн і розумні контракти

Домогосподарство з сонячними панелями виробляє більше електроенергії, ніж споживає. Надлишкова енергія реєструється у блокчейн-мережі. Інші користувачі можуть купити її безпосередньо за «розумними контрактами».

Такі проекти, за створенням платформи P2P-енерготоргівлі, що дозволяє домогосподарствам продавати надлишкову сонячну енергію сусідам, скорочує витрати на 20-30% (Power Ledger., 2021). Такий підхід відкриває нові економічні можливості, робить відновлювану енергетику доступнішою та ефективнішою. Розумні мікро мережі відіграють ключову роль у розвитку децентралізованої енергетики. Завдяки штучному інтелекту, IoT та блокчейну вони дозволяють гнучко керувати виробництвом та розподілом електроенергії, знижувати витрати та підвищувати стійкість енергосистем.

Взагалі, інтелектуальні мережі Smart Grids у відновлюваній енергетиці використовують цифрові технології, штучний інтелект, Інтернет речей та автоматизовані системи управління для оптимізації виробництва, розподілу та споживання електроенергії. Завдяки Smart Grid відновлювані джерела енергії, такі, як сонце, вітер, вода, біогаз ефективніше інтегруються в енергосистему, забезпечуючи гнучкість, надійність та економічну ефективність.

Впровадження цифрових технологій у відновлювану енергетику сприяє значному зниженню витрат та підвищенню ефективності функціонування енергосистем. Це досягається за рахунок автоматизації процесів, оптимізації використання ресурсів, зменшення втрат енергії та покращення прогнозування енергоспоживання (табл.2).

Таблиця 2. Економічні ефекти цифровізації у відновлювальній енергетиці

Цифрові технології	Способи зниження витрат та підвищення ефективності	Результати впровадження
Автоматизація та цифрове управління	IoT, SCADA-системи; дистанційний моніторинг; розумні лічильники	Данія: скорочення операційних витрат до 15% (IEA, 2023)
Зниження втрат електроенергії	Оптимізація розподілу, мікро та міні мережі, енергетичні сховища	Smart Grids скорочують втрати у мережах на 8-10% (IEA, 2023)
Прогнозна аналітика та штучний інтелект	Big Data, динамічне ціноутворення, цифрові двійники	Німеччина: зменшення резервних потужностей на 20% (Schneider Electric, 2023)
Зниження витрат на обслуговування	AI для діагностики, дрони для моніторингу, блокчейн у контрактах	США: зниження витрат на обслуговування вітрових турбін до 25% (U.S. Department of Energy, 2022).

Зниження витрат завдяки автоматизації та цифрового управління здійснюються через IoT та розумні лічильники, коли цифрові датчики в режимі реального часу відстежують споживання, виявляючи неефективне використання енергії. Автоматизоване керування енергетичними об'єктами дозволяє оптимізувати виробництво та розподіл електроенергії. Дистанційний моніторинг та управління зменшують потребу у фізичному втручанні персоналу, скорочуючи операційні витрати.

Зниження втрат електроенергії досягається за рахунок оптимізації розподілу енергії через цифрові платформи, що знижує втрати під час транспортування; децентралізовані енергетичні системи (мікро та міні мережі), коли споживачі можуть використовувати локально вироблену енергію без необхідності її транспортування через централізовану мережу, що зменшує втрати; енергетичні сховища та батареї дозволяють накопичувати надлишкову енергію для подальшого використання, мінімізуючи ризик її невикористання.

Підвищення ефективності досягається також за використанням прогнозової аналітики та AI, коли штучний інтелект та Big Data прогнозують рівень споживання та генерації електроенергії, що дозволяє уникати перевантажень і неефективного використання ресурсів; динамічне ціноутворення, де на основі аналізу попиту та пропозиції цифрові системи можуть автоматично змінювати тарифи, стимулюючи більш рівномірне споживання енергії; цифрових двійників, які моделюють роботу енергосистем у віртуальному середовищі для виявлення потенційних проблем та шляхів їх вирішення.

Зниження витрат на обслуговування та ремонт за використанням штучного інтелекту та автоматизованого моніторингу стану обладнання, які дозволяють прогнозувати несправності та проводити вчасне профілактичне обслуговування; дрони та роботизовані системи для обстеження сонячних та вітрових електростанцій скорочують витрати на технічний огляд; блокчейн у контрактах та платіжках зменшує адміністративні витрати за рахунок автоматизації фінансових операцій.

Таким чином, цифрові технології значно підвищують ефективність відновлюваної енергетики, дозволяючи скоротити операційні витрати, зменшити втрати електроенергії та підвищити гнучкість енергосистем, що одночасно вирішує і деякі проблеми інвестування, оскільки використання автоматизації, прогнозової аналітики, штучного інтелекту та розумних контрактів надають можливості зробити енергетичну інфраструктуру більш економічно вигідною та стійкою до змін у попиті та пропозиції.

Доцільним здається згадати, що більшість цифрових бізнес-моделей у відновлюваній енергетиці почали активно розвиватися у 2010-х – 2020-х роках завдяки розвитку блокчейн-технологій, штучного інтелекту, Інтернету речей та децентралізованих енергетичних систем. Розглянемо деякі сучасні бізнес-моделі.

Peer-to-Peer (P2P) енергетичні платформи, їх перші концепції з'явилися у 2015-2017 роках. Традиційно енергетичний ринок контролювався централізованими компаніями, монополіями, державними або приватними. Використання блокчейну дозволило реалізувати прямі операції між виробниками та споживачами, що раніше було технічно неможливо. Наприклад, компанія Power Ledger (Австралія) почала розробку першої P2P-енергетичної платформи ще у 2016 році (Power Ledger., 2021).

Енергетичні кооперативи, концепція щодо втілення енергетичних кооперативів існувала ще у 1980-х, але у сучасному вигляді завдяки цифровим платформам, смарт-лічильникам почала розвиватися у 2010-х. До втілення цієї моделі спільні ініціативи були локальними та залежали від великих енергетичних компаній. Цифрові технології дозволили автоматизувати процеси та ефективно керувати кооперативами через онлайн-платформи. Наприклад, у Німеччині з 2012 року почався активний розвиток енергетичних кооперативів, що використовують смарт-мережі та платформні рішення (50Hertz Transmission GmbH, 2023).

Електроенергія зі підпискою Energy-as-a-Service – ця модель вперше почала застосовуватися великими компаніями у 2018-2020 роках. Традиційно компанії просто продавали електроенергію, але тепер вони пропонують енергоефективні рішення у вигляді підписки. Використання штучного інтелекту та IoT дозволяє компаніям управляти

споживанням енергії клієнтів, мінімізуючи витрати. Наприклад, компанія Schneider Electric запустила перші великі EaaS-проекти у 2019 році (Schneider Electric, 2022).

Концепції віртуальних електростанцій VPPs були розроблені у 2010-2015 роках, але масштабне впровадження почалося після 2018 року. Традиційні електростанції потребували великих капіталовкладень та були централізованими. Цифрові платформи дозволили об'єднувати розподілені малі генератори (домашні сонячні панелі, акумулятори) в єдину систему без будівництва нових електростанцій. Наприклад, у Великій Британії у 2020 році Компанія Centrica створила першу масштабну VPP на основі домашніх сонячних панелей (World Economic Forum, 2022).

Ці бізнес-моделі вважаються новими, оскільки вони стали можливими лише завдяки цифровим технологіям блокчейну, штучного інтелекту, IoT, Big Data тощо. Раніше ринок електроенергії був централізованим, а тепер з'являється децентралізація та активна участь малих виробників. Автоматизація та цифрові платформи дозволяють зменшити витрати та підвищити ефективність управління енергією (табл.3).

Отже, сучасні бізнес-моделі у відновлювальній енергетиці ґрунтуються на цифровізації, децентралізації та інтеграції зі споживачами. Модель PPA (Power Purchase Agreement) залишається ключовою для довгострокових контрактів між виробниками та споживачами, що забезпечує стабільність інвестицій. Енергетичні кооперативи дозволяють громадам фінансувати та управляти власними електростанціями, стимулюючи локальну економіку. Модель "Energy-as-a-Service" (EaaS) передбачає надання доступу до енергії без капіталовкладень, де постачальник відповідає за встановлення та обслуговування обладнання. Важливу роль відіграють Peer-to-Peer (P2P) платформи, які дозволяють продавати надлишкову енергію напряму іншим споживачам через блокчейн. Також розвиваються віртуальні електростанції (VPP), що об'єднують розподілені джерела енергії та оптимізують їхню роботу за допомогою штучного інтелекту.

Таблиця 3. Сучасні бізнес-моделі у відновлювальній енергетиці

Бізнес-модель	Сутність моделі	Цифрові технології, що лежать в основі	Приклади впровадження
P2P-енергетичні платформи	Продаж надлишкової енергії між користувачами напряму	Блокчейн; розумні контракти	Power Ledger (Австралія)
Енергетичні кооперативи	Спільне інвестування та розподіл енергії між членами громади	Децентралізовані мережі; смарт-лічильники	1 700+ кооперативів у Німеччині
Енергія як послуга	Підписка на енергетичні послуги замість купівлі електроенергії	IoT; штучний інтелект; хмарні обчислення	Schneider Electric
Віртуальні електростанції	Об'єднання розподілених генераторів у єдину систему	Big Data; штучний інтелект; хмарні платформи	Centrica (Велика Британія)

Впровадження цифрових технологій сприяє зміні традиційних бізнес-моделей у сфері відновлюваної енергетики. Децентралізація, автоматизація та використання блокчейн-технологій дозволяють створювати нові джерела доходу та оптимізувати взаємодію між виробниками й споживачами електроенергії.

Енергетичні платформи Peer-to-Peer, або P2P працюють таким чином, щоб споживачі, які виробляють надлишкову енергію, наприклад, домогосподарства, які є власниками сонячних панелей, можуть продавати її іншим споживачам напряму через цифрові платформи (рис. 3). За технологією Блокчейн забезпечуються прозорі та автоматизовані транзакції через розумні контракти. Завдяки чому зменшуються залежності від великих енергетичних компаній, є гнучкість у ціноутворенні. Та справедливий розподіл прибутків між виробниками та споживачами.

Енергетичні кооперативи створюються з групи споживачів, які об'єднуються для спільного інвестування у відновлювані джерела енергії та розподілу виробленої електроенергії. При цьому використовують технології децентралізованих системи управління, смарт-мереж мікро- та міні рівнів, блокчейн. До основних переваг можна віднести спільне фінансування, що зменшує початкові витрати, зниження витрат при транспортуванні і, головне, отримання енергетичної незалежності від великих корпорацій.

Моделі "Енергія як послуга" працюють так, що споживачі не купують електроенергію як товар, а підписуються на комплексні енергетичні рішення – генерація, зберігання, розподіл. Цифрові сучасні технології – це Інтернет речей, штучний інтелект, хмарні обчислення. До переваг цієї моделі можна віднести оптимізацію витрат на електроенергію, гнучкість та персоналізацію послуг, інтеграцію енергозберігаючих технологій.

Сутність моделі віртуальних електростанцій складається з того, що декілька розподілених генераторів електроенергії – при чому це можуть бути домашні сонячні панелі, вітрові турбіни, акумулятори тощо об'єднуються у єдину віртуальну систему, що керується централізовано через цифрову платформу за технологіями Big Data, штучного інтелекту, хмарних платформ. Переваги такої моделі складаються з балансування попиту та пропозиції, оптимізації використання електромережі і можливості продажу надлишкової енергії на ринку.

Розвиток цифрових технологій дозволяє створювати нові бізнес-моделі, які сприяють децентралізації енергетичних ринків, розширенню можливостей для споживачів і підвищенню ефективності розподілу енергії. Споживачі енергії від відновлюваних джерел у всьому світі чекають появи нових концепцій та розробок моделей енергопостачання, енерговикористання, зберігання, розподілу, за якими відновлювана енергетика стане більш прибутковою та доступною. Використання P2P-платформ, блокчейну, Smart Grids, AI та IoT робить

Цифрова трансформація у відновлюваній енергетиці вимагає значних початкових інвестицій, що є одним із головних бар'єрів для її впровадження. Головних причин чотири. По-перше, витрати пов'язані з розвитком інфраструктури. Впровадження смарт-лічильників, IoT-пристроїв, датчиків та систем моніторингу потребує суттєвих фінансових ресурсів. За даними International Energy Agency (IEA, 2024), інвестиції у «розумні» мережі зросли з \$150 млрд у 2015 році до понад \$300 млрд у 2023 році, а у 2022 році світові інвестиції в енергетику зросли на 8% і досягли 2,4 трильйона доларів США, що значно перевищує рівень інвестицій до пандемії COVID-19. По-друге, це висока вартість цифрових технологій, особливо на початку їх впровадження. Використання штучного інтелекту, блокчейну, машинного навчання для аналізу енергоспоживання та прогнозування потребує значних вкладень у НДДКР. Наприклад, створення віртуальних електростанцій коштує від \$10 до \$50 млн залежно від масштабу проекту (IEEE Smart Grid Initiative, 2021). По-третє, довготривалим періодом окупності та супутніми бізнес-ризиками. Інвестори доволі часто вважають, що цифрові технології у відновлюваній енергетиці мають довгий період окупності – від 5 до 10 років. А через нестабільність ринків та можливі зміни у регуляторному середовищі компанії побоюються вкладати великі кошти в інновації. По-четверте, недостатність фінансових стимулів. У багатьох країнах досі немає достатніх податкових пільг та фінансової підтримки для компаній, що впроваджують цифрові рішення у відновлювану енергетику. Так, у США діють гранти та програми підтримки, тоді як у деяких країнах ЄС фінансування обмежене. За даними мережевого оператора Ofgem, економічна вигода від підвищення гнучкості в англійській енергосистемі оцінюється в 17-40 мільярдів фунтів стерлінгів у період з 2020 по 2050 роки.

Подолання зазначених бар'єрів має важливе значення для розвитку відновлювальної енергетики, і можна виділити деякі шляхи подолання цих бар'єрів:

- державна підтримка у вигляді субсидій та податкових пільг;

- приватне інвестування через механізми державно-приватного партнерства;

- зниження вартості технологій завдяки масовому впровадженню та вдосконаленню виробничих процесів;

гнучкі фінансові моделі для розширення доступу до цифрових рішень та розвиток фінансових інструментів.

Оскільки ми вже говоримо про виклики та ризики цифрової трансформації у сфері відновлювальної енергетики, то здається доцільним відмітити, що у сучасних розподілених енергосистемах, що активно інтегрують відновлювані джерела енергії, питання кібербезпеки та захисту даних набувають критичного значення. Цифровізація енергетичних мереж підвищує їх ефективність, але водночас робить їх вразливими до кібератак. До основних викликів відносять зростання кіберзагроз. Збільшення кількості підключених до мережі пристроїв розширює потенційні точки доступу для злоумисників. За даними досліджень, системи моніторингу повинні бути надійними і забезпечувати безперервну роботу навіть у випадку збоїв або відмов (Кушнеренко, 2024). Щодо захисту критичної інфраструктури, то енергетичні системи є основою національної безпеки, тому їх компрометація може призвести до масштабних наслідків. В Україні питання кібербезпеки енергетичного сектору є пріоритетним, про що свідчать регулярні обговорення цього питання сучасними вченими та практиками (OECD, 2024). Якщо мати на увазі українські виклики, то додається небезпечна ситуація з боку воєнного стану внаслідок повномасштабного вторгнення, і, як наслідок, з-за порушення важливих локаційних енергетичних споруд. До того ж, до викликів в Україні потрібно віднести і відсутність єдиних стандартів для захисту даних у розподілених енергосистемах, що теж ускладнює впровадження ефективних заходів безпеки. До речі, ще у 2021 році в Україні було затверджено Концепцію забезпечення національної системи стійкості, яка включає аспекти кібербезпеки (OECD, 2024). Забезпечення кібербезпеки та захисту даних у розподілених енергосистемах є ключовим фактором для стійкого розвитку відновлюваної енергетики та національної безпеки загалом. Через співпрацю з Міжнародним енергетичним агентством в Україні активно розроблюються та впроваджуються національні стандарти кібербезпеки та створюється нормативно-правова база для забезпечення захисту енергетичних систем від кібератак (Череп & Сарбей, 2023). Таким чином, інтеграція систем виявлення загроз, антивірусних рішень та захисту мереж служить для забезпечення цілісності та конфіденційності даних. Як зазначається в аналітичній доповіді Національного інституту стратегічних досліджень (Васильківський & Сисюк, 2024), застосування штучного інтелекту в енергетиці може підвищити ефективність виявлення та реагування на кіберзагрози.

Розглянемо перспективи розвитку цифрових технологій у відновлювальній енергетиці. При цьому звернемо основну увагу на ті технології, розробка яких вже наближається до можливості масового впровадження.

У 2024 році відновлювана енергетика зазнала значних технологічних проривів, що формують майбутнє світової енергетики. Простежимо деякі найновіші розробки та перспективи.

Нові проривні технології зберігання енергії: твердотільні батареї та гравітаційні системи зберігання енергії. Твердотільні батареї – це інноваційні накопичувачі, що забезпечують вищу енергетичну щільність та триваліший термін служби порівняно з традиційними літій-іонними накопичувачами. Їх впровадження сприяє більш ефективному зберіганню енергії та стабільності енергомереж. Твердотільні акумулятори пропонують більшу щільність енергії, покращену термічну стабільність і довший термін служби порівняно з традиційними літій-іонними накопичувачами. У 2025 році вони наблизяться до комерційної доступності для електромобілів та портативної електроніки. Розробка гравітаційних систем зберігання енергії набирає обертів, пропонуючи альтернативні методи накопичення енергії без використання хімічних компонентів (Амбарцумян, 2024).

Технології для розвитку водневої енергетики виводять водень як енергетичний носій на важливе місце у сфері відновлювальної енергетики. Воднева енергетика стала стратегічним інструментом у переході до низьковуглецевої економіки. Водень здатний забезпечувати чистою енергією транспорт, промисловість і навіть домогосподарства. Україна, наприклад, має амбітний план стати водневим хабом Європи до 2050 року, виробляючи «зелений» водень з відновлюваних джерел (Амбарцумян, 2024). Воднева енергетика набуває все більшого

значення у глобальному переході до відновлюваних джерел енергії. Водень розглядається як універсальний енергоносіє, здатний забезпечити декарбонізацію різних секторів економіки. До глобальних тенденцій у водневій енергетиці відносять зростання виробництва та споживання водню. Очікується, що до 2050 року водень забезпечить до 18% світових енергетичних потреб, сприятиме зниженню викидів парникових газів та підвищенню енергетичної безпеки (BloombergNEF, 2020). Світові інвестиції у водневі технології зростають, а міжнародні ініціативи та партнерства сприяють розвитку водневої інфраструктури та стандартів. Так, в Україні за вже згаданою стратегією розвитку водневої енергетики вироблення «зеленого» водню з відновлюваних джерел енергії розробляються проекти з виробництва водню в Одеській та Закарпатській областях, інтегруючи відновлювані джерела енергії та сприяючи розвитку водневої економіки (Амбарцумян, 2024). Розвиток водневої енергетики в Україні та світі відкриває нові можливості для сталого розвитку, енергетичної незалежності та зменшення впливу на клімат.

Особливе місце займають цифрові трансформаційні інновації в сонячній енергетиці. Це тонкоплівкові сонячні панелі, які можуть бути встановлені на різних поверхнях, що відкриває нові можливості для виробництва зеленої енергії та інтеграції сонячних панелей у будівельні матеріали. Ці тонкоплівкові сонячні панелі мають назву перовскітних сонячних панелей (Perovskite Solar Cells, PSCs). Перовскітні панелі набули значного поширення завдяки своїм перевагам над традиційними кремнієвими аналогами. Вони є легшими, дешевшими у виробництві та забезпечують вищу ефективність перетворення сонячної енергії. У 2025 році очікується суттєве збільшення їх виробництва та використання, що може змінити правила гри на ринку сонячної енергетики. Перовскітні сонячні панелі – це новий тип фотогальванічних елементів, які використовують матеріали з перовскітною структурою для поглинання світла та перетворення його в електроенергію. Основними перевагами таких панелей є вища ефективність у порівнянні з традиційними кремнієвими панелями, низька вартість виробництва через простішу технологію нанесення матеріалів, гнучкість та легкість, що дозволяє інтегрувати їх у будівлі, транспорт або ручні пристрої. Останні розробки у сфері tandem perovskite-silicon solar cells показують рекордну ефективність понад 30%, що робить цю технологію перспективною для масового застосування (Амбарцумян, 2024). Це дійсно прорив у технологіях для розвитку відновлювальної енергетики та масового її використання.

В даному дослідженні вже вище було згадано про використання блокчейн-технологій і децентралізовані енергетичні мережі та про їх безперечні перспективи для подальшого впровадження в економіку. Подальші розробки проводяться в напрямку інтеграції з блокчейн-технологіями, коли сонячні електростанції починають активно впроваджувати блокчейн для обліку та управління виробленою енергією (OECD, 2024). Це дозволяє власникам станцій продавати надлишкову енергію в реальному часі, підвищуючи прозорість та ефективність енергетичних транзакцій. Щодо децентралізованих енергетичних мереж, то традиційні централізовані електромережі поступово поступаються місцем децентралізованим системам. У 2025 році очікується зростання кількості домогосподарств та підприємств, які самостійно виробляють, зберігають та продають енергію. Це зменшує навантаження на національні мережі та підвищує стійкість до збоїв (OECD, 2024)..

Цікаві цифрові технології у секторі знову сонячної енергетики, такі, як сонячна "шкіра" та плаваючі електростанції. Інновації, такі як сонячна "шкіра" та плаваючі сонячні електростанції, роблять сонячну енергетику ще більш популярною. Ці технології дозволяють ефективніше використовувати доступні площі та інтегрувати сонячні панелі в різні поверхні, розширюючи можливості для генерації відновлюваної енергії. І, що важливо, ці інновації сприяють подальшому розвитку сонячної енергетики, підвищують її ефективність та доступність для широкого кола споживачів – як підприємств, так і домогосподарств.

Дійсно, як вже згадувалося в даному дослідженні, великими перешкодами масового впровадження відновлювальної енергетики заважає його вартість, і тому потрібно зменшення витрат на будівництво генеруючих потужностей. Завдяки новим технологіям, витрати на будівництво сонячних та вітрових електростанцій постійно знижуються. А до нових розробок

можна віднести продемонстровані компанією Tesla сонячні панелі, які виглядають як звичайна покрівля, забезпечуючи естетичний вигляд будинку. Ці панелі ефективно генерують електроенергію, інтегруючись з іншими продуктами Tesla для забезпечення енергетичних потреб будинку (Reuters, 2024). Їх собівартість значно дешевша за звичайні традиційні модулі та значно дешевші за традиційну черепицю.

В Україні продовжує розвиватися відновлювана енергетика. Попри виклики, зумовлені війною, Україна продовжує інвестувати в розвиток відновлюваних джерел енергії. У 2023 році компанія DTEK підключила понад 1 400 нових об'єктів відновлюваної енергетики, ввівши в експлуатацію 182,3 МВт вітрових та близько 500 МВт сонячних електростанцій. Ці проекти отримали підтримку через державно-приватні партнерства з міжнародними компаніями, такими як GE Vernova та Honeywell (AP News, 2024). Крім того, Україна має інвестиційні плани на майбутнє. У серпні 2024 року Україна затвердила інвестиційний план на \$20 мільярдів з метою збільшення частки відновлюваної енергетики до 27% енергетичного балансу країни до 2030 року. Цей план передбачає введення 10 000 МВт нових потужностей відновлювальної генерації, зокрема вітрових та сонячних електростанцій (Reuters, 2024).

У листопаді 2024 року компанія DTEK оголосила про отримання 107 мільйонів євро від Європейської комісії та США для відновлення енергетичних об'єктів, пошкоджених внаслідок російських атак. Ці кошти спрямовані на постачання необхідного обладнання для ремонту та захисту інфраструктури, що забезпечує надійне електропостачання для понад 2 мільйонів українців (Reuters, 2024).

Ці досягнення підкреслюють важливість інвестицій та міжнародної підтримки для розвитку відновлюваної енергетики, навіть у складних умовах.

Цифрові технологічні досягнення демонструють значний потенціал для подальшого розвитку відновлюваної енергетики, цікавість всього світу до відновлюваних джерел енергій та їх масового використання та переходу до більш стійких енергетичних систем у майбутньому.

Варто сказати, що для прискореного впровадження цифрових технологій у сфері відновлюваної енергетики важливу роль відіграє державна підтримка. Державна підтримка здається тим більш важливою в умовах невизначеності з-за воєнного стану в Україні і соціально-політичних коливань у всьому світі. Фінансові стимули, створення сприятливого регуляторного середовища, інвестиції у дослідження та розробки, а також міжнародне співробітництво – всі ці механізми принесуть стійкості у розвиток цифрових технологій та відновлювальну енергетику. Також важливо розробити механізми державно-приватного партнерства, які дозволять поєднати державні ресурси з досвідом і капіталом бізнесу для реалізації масштабних проєктів. Державна підтримка розвитку відновлювальної енергетики, зокрема субсидії, податкові пільги та державні гранти, сприяють залученню інвестицій у цифрову інфраструктуру та розширенню використання інноваційних рішень.

Крім того, ефективна цифровізація енергетичного сектора вимагає адаптації законодавчої бази. Регуляторні зміни повинні сприяти розвитку «розумних» енергетичних мереж, децентралізованих платформ торгівлі енергією та використанню блокчейн-технологій для забезпечення прозорості операцій.

Не менш важливим є підтримка наукових досліджень та освітніх ініціатив, що сприятимуть підготовці висококваліфікованих фахівців та розробці передових цифрових рішень. Держави також можуть сприяти міжнародному обміну досвідом і співпраці у сфері цифрової трансформації енергетики, що дозволить впроваджувати найкращі світові практики та технології.

Отже, активна участь держави у стимулюванні цифровізації відновлюваної енергетики є важливою умовою для прискореного переходу до стійких та ефективних енергетичних систем майбутнього.

Як висновок, можна сказати, що цифрова трансформація сприяє підвищенню ефективності відновлювальної енергетики, зниження ризиків та загроз, відповідає тенденціям ринку та очікуванням споживачів; сприяє модернізації існуючих процесів в секторі

відновлюваних джерел енергії; допомагають створити перспективну модель сталої відновлювальної енергетики; поліпшити аналітику для комплексного прогнозування попиту на енергію; забезпечити прозорість та безпеку енергетичних угод; сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля. Водночас цифрова трансформація стикається з низкою викликів, серед яких – значні інвестиційні витрати, ризики кібербезпеки та необхідність адаптації регуляторного середовища. Для ефективного впровадження інновацій потрібна підтримка з боку держави, стимулювання інвестицій у цифрову інфраструктуру та вдосконалення законодавчих норм. Отже, цифрові технології є стратегічно важливими для розвитку відновлюваної енергетики, і їх подальша інтеграція дозволить досягти стійкого енергетичного майбутнього, зменшити залежність від викопних ресурсів та підвищити загальну ефективність енергосистем.

Література:

1. Амбарцумян, А. (2024, March 7). Технологічні прориви: які гаджети стали хітами 2024 року. Comments.ua. Retrieved from https://it.comments.ua/ua/news/technology/tehnologichni-prorivi-yaki-gadzheti-stali-hitami-2024-roku-753652.html?utm_source=ukrnet&utm_medium=ukrnet2
2. Борзенко, О., & Глазова, А. (2024). Теоретичні підходи до цифровізації світової економіки та сучасні тенденції цифрової трансформації. *Український журнал економічних досліджень*, 10(2), 25–35.
3. Васильківський, Д., & Сисюк, В. (2024). Європейські механізми підвищення енергоефективності економіки та перспективи їх впровадження в Україні. *Економіка та суспільство*, (66). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-44>
4. Іванцов, С. В. (2024). Стратегічні засади та напрями розвитку цифрової економіки України в контексті європейської інтеграції. *Економічний вісник*, 32(1), 138–146.
5. Кушнеренко, С. М. (2024). Вплив цифровізації на ефективність інвестиційної діяльності в основних секторах економіки України. *Бізнес Інформ*, (6), 57–63.
6. Таранюк, К., & Касьян, О. (2024). Вплив диджиталізації на впровадження принципів безвуглецевої економіки в Україні. *Економіка та суспільство*, (66). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-109>
7. Череп, А. В., & Сарбей, Л. С. (2023). Цифровізація як інструмент відбудови економіки України в повоєнний період. *Економіка та держава*, (7), 50–56.
8. 50Hertz Transmission GmbH. (2023). *Renewable energy integration in Germany's power grid*. Retrieved from <https://www.50hertz.com>
9. AP News. (2024, March 9). Ukraine has seen success in building clean energy, which is harder for Russia to destroy. Retrieved from https://apnews.com/article/1f226213742cc057f9f65208167e6f38?utm_source=chatgpt.com
10. BloombergNEF. (2020). Водень як вихід з економічної та кліматичної кризи. *Економічна правда*. Retrieved from <https://epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/06/24/662145/>
11. Booth, A., de Jong, E., & Peters, P. (2018). *Accelerating digital transformations: A playbook for utilities*. McKinsey & Company.
12. Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). *The role of renewable energy in the global energy transformation*. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
13. European Commission. (2022). *AI in renewable energy systems: Reducing costs and increasing efficiency*. Retrieved from <https://ec.europa.eu>
14. Helms, T., Loock, M., & Bohnsack, R. (2016). Timing-based business models for flexibility creation in the electric power sector. *Energy*, 101, 605–614. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.079>
15. IBM Watson. (2020). *AI-driven energy analytics for predictive maintenance*. Retrieved from <https://www.ibm.com>

16. IEEE Smart Grid Initiative. (2021). *The role of artificial intelligence in smart grids*. Retrieved from <https://smartgrid.ieee.org>
17. IBM Energy Solutions. (2020). AI-driven smart grids: Optimizing renewable energy distribution. Retrieved from <https://www.ibm.com>
18. International Energy Agency (IEA). (2023). *Decentralized energy systems and business models in the renewable sector*. Retrieved from <https://www.iea.org>
19. International Energy Agency (IEA). (n.d.). *Digital transformation and green energy: Opportunities and challenges*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
20. International Energy Agency (IEA). (n.d.). *Net zero emissions by 2050 scenario*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>
21. International Energy Agency (IEA). (2023). *Smart Grids and the future of energy efficiency*. Retrieved from <https://www.iea.org>
22. European Commission. (2023). Smart Grids and renewable energy integration. Retrieved from <https://ec.europa.eu>
23. European Commission. (2023). Virtual Power Plants: The future of energy flexibility. Retrieved from <https://ec.europa.eu>
24. Lee, S., & Kim, H. (2022). Global potential of carbon emission reduction through digitalization. *Global Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s40974-022-00015-3>
25. Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1(4), 16032. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.32>
26. Richter, M. (2013). Business model innovation for sustainable energy: German utilities and renewable energy. *Energy Policy*, 62, 1226–1237. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.038>
27. Statista. (2025). *Global total primary energy supply by source in 2022 with a forecast for 2030 to 2050 in a 1.5°C scenario*. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/801881/global-total-energy-supply-by-source/>
28. Google DeepMind. (2019). *Predicting wind power to optimize energy use*. Retrieved from <https://deepmind.com>
29. OECD. (2024). *Підвищення стійкості шляхом прискорення цифрової трансформації бізнесу в Україні*. Звіти OECD.
30. Power Ledger. (2021). *Peer-to-peer energy trading using blockchain technology*. Retrieved from <https://www.powerledger.io>
31. Reuters. (2024, August 13). *Ukraine approves \$20 billion plan to increase renewable energy production by 2030*. Retrieved from https://www.reuters.com/sustainability/ukraine-approves-20-bln-plan-increase-renewable-energy-production-by-2030-2024-08-13/?utm_source=chatgpt.com
32. Reuters. (2024, November 25). *Ukraine's DTEK to receive 107 mln euros from EU, US to rebuild power facilities*. Retrieved from https://www.reuters.com/business/energy/ukraines-dtek-receive-107-mln-euros-eu-us-rebuild-power-facilities-2024-11-25/?utm_source=chatgpt.com
33. Reuters. (2024, December 31). *Tesla's Shanghai energy storage gigafactory begins trial production*. Retrieved from https://www.reuters.com/technology/teslas-shanghai-energy-storage-gigafactory-begins-trial-production-2024-12-31/?utm_source=chatgpt.com
34. Schneider Electric. (2022). *Microgrid solutions for sustainable energy management*. Retrieved from <https://www.se.com>
35. Schneider Electric. (2023). *Energy-as-a-Service: The next evolution of energy management*. Retrieved from <https://www.se.com>
36. Schneider Electric. (2023). *The role of predictive analytics in energy management*. Retrieved from <https://www.se.com>
37. U.S. Department of Energy. (2022). *Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project: Final Report*. Retrieved from <https://www.energy.gov>

38. World Economic Forum. (2021). *Digital transformation of energy systems: Cost savings and efficiency gains*. Retrieved from <https://www.weforum.org>
39. World Economic Forum. (2022). *Blockchain and peer-to-peer energy trading: Transforming the electricity market*. Retrieved from <https://www.weforum.org>