

ЦИФРОВІ ПЛАТФОРМИ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ІННОВАЦІЇ ТА ІНВЕСТИЦІЙНІ ПЕРСПЕКТИВИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Годлюк В.В., Голоцукова Т.Г.

ВСТУП

Геополітичні кризи, глобальне потепління, пандемії, вичерпність традиційних ресурсів, нестабільність енергетичних ринків та зростаюча потреба у безпечному й доступному енергопостачанні стимулюють пошук нових підходів до розвитку енергетики. Одним із таких рішень є цифровізація енергетичного сектору – впровадження цифрових технологій (ЦТ), платформ та аналітичних інструментів, що дозволяють зробити систему більш гнучкою, прозорою, ефективною й орієнтованою на цілі сталого розвитку (ЦСР).

Цифрові платформи (ЦП) – це багатофункціональні інтегровані середовища, які об'єднують дані, алгоритми, моделі, інтерфейси користувача та механізми прийняття рішень. В енергетиці виконують роль зв'язуючої ланки між технічними процесами, математичним аналізом, бізнес-моделями та політикою сталого розвитку. Завдяки ЦП з'являється можливість ефективного управління ресурсами, прогнозування навантажень, оцінки ризиків, виявлення втрат та підвищення точності планування на різних рівнях – від окремих домогосподарств до національних енергетичних систем.

Одним із ключових елементів ЦП є математичне моделювання, що дозволяє створювати віртуальні копії енергетичних об'єктів – цифрові двійники, моделювати поведінку систем при змінних параметрах, оптимізувати процеси генерації, передачі та споживання енергії. Завдяки моделюванню можна виявляти слабкі місця системи, прогнозувати надзвичайні ситуації, обґрунтовувати інвестиційні рішення та мінімізувати негативний вплив на довкілля¹. У цьому контексті математичні методи невіддільна частина сучасної енергетики – від класичного чисельного аналізу до машинного навчання та штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI).

¹ Голоцукова Т., Ламонов П. Цифрове підприємство та цифрові двійники: виклики та можливості інтеграції. Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації. Київ : ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. 2024. С. 87–90.

Важливий аспект – технологічні інновації, які знаходять своє практичне втілення через ЦП. Це не лише модернізація енергетичного обладнання, а й розвиток смарт-мереж (Smart Grids, SG), інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), впровадження рішень Інтернету речей (Internet of Things, IoT), енергетичних сховищ, а також блокчейн-технологій (Blockchain Technology, BT) у торгівлі енергією, інтелектуальних систем обліку та керування. Такі інновації формують нову парадигму енергоспоживання та енергозбереження, де споживач стає активним учасником процесу.

Цифрова трансформація енергетики також відкриває нові інвестиційні перспективи. ЦП дозволяють потенційним інвесторам проводити аналіз ефективності проєктів у режимі реального часу, здійснювати моніторинг результативності та контролювати фінансові потоки. Ризики стають більш прогнозованими, а проєкти – більш прозорими. Зокрема, у сфері «зелених» інвестицій цифрові рішення дають змогу оцінювати екологічний слід та вплив кожного проєкту, що сприяє зростанню довіри до стійких ініціатив.

Таким чином, ЦП виступають потужним інструментом трансформації енергетичного сектору в напрямі сталого розвитку. Їх використання сприяє вирішенню низки стратегічних завдань: підвищення енергоефективності, інтеграції ВДЕ, забезпечення енергетичної безпеки, адаптації до змін клімату та підтримки економічного зростання. Поєднання математичного моделювання, технологічних інновацій та інвестиційного аналізу створює основу для формування нової енергетичної культури, в якій ключову роль відіграють знання, дані та взаємодія. У подальших розділах роботи розглядаються сучасні підходи до побудови ЦП, аналізуються приклади їх реалізації в енергетичному секторі, а також визначаються перспективи розвитку з урахуванням глобальних тенденцій.

1. Цифрові платформи як інструмент сталого розвитку

У 2015 році Організація Об'єднаних Націй затвердила Порядок денний сталого розвитку до 2030 року, який визначив 17 ЦСР як основу для трансформації глобальної економіки, суспільства й довкілля. У цьому стратегічному документі особливу увагу було приділено забезпеченню доступу до сучасних, надійних і екологічно чистих джерел енергії, що знайшло відображення в Цілі 7: «Забезпечити доступ усіх людей до доступної, надійної, сталої та сучасної енергії». Зокрема, передбачалося підвищити частку ВДЕ в глобальному енергобалансі, вдосконалити енергоефективність та розширити інвестиції у чисті енерготехнології.

У взаємозв'язку з цим розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) також був визначений як один із пріоритетів сталого розвитку. У межах Цілі 9: «Створення стійкої інфраструктури, сприяння всеохоплюючій і сталій індустріалізації та інноваціям», а також Цілі 17: «Зміцнення засобів реалізації Глобального партнерства в інтересах сталого розвитку та активізація його діяльності», міжнародна спільнота зобов'язалася сприяти розширенню доступу до інтернету, цифрової грамотності та впровадженню ІКТ у ключових секторах економіки. Не менш важливим викликом залишалося зменшення кількості відходів та посилення їх рециркуляції, що стало фокусом Цілі 12: «Забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва»². Такий підхід забезпечив би циркулярну економіку.

Циркулярна економіка допомагає зменшити навантаження на природні ресурси, скоротити викиди парникових газів і створює передумови для економічного зростання без шкоди для довкілля. Вона особливо актуальна в енергетиці, будівництві, особливо у розвитку розумних міст (Smart City) та розумних будинків, де ЦТ дозволяють ефективно керувати ресурсами (енергією, водою, теплом) з урахуванням екологічних і економічних чинників. Розумні системи моніторингу та управління сприяють оптимізації споживання, повторному використанню матеріалів і зменшенню відходів, що відповідає принципам циркулярної моделі.

Проте, незважаючи на часткові успіхи, до 2025 року стало очевидним, що багато з поставлених завдань залишаються невиконаними або досягнуті нерівномірно. Геополітичні кризи, пандемії, зростання нерівності в доступі до енергоресурсів і ЦТ, а також загострення кліматичних ризиків призвели до переосмислення пріоритетів сталого розвитку.

У відповідь на ці виклики міжнародна спільнота вже розпочала розробку нової глобальної рамки – Post-2030 Agenda, яка має замінити або оновити наявні цілі. Одним із ключових векторів майбутнього стає цифрова трансформація: обговорюється інтеграція таких тем, як AI, кібербезпека, етичне використання даних, забезпечення цифрової справедливості та посилення технологічної резильєнтності у світлі нових загроз.

Особливу увагу також приділяють інтеграції кліматичної адаптації в ЦП, розвитку SG, управлінню відходами за допомогою IoT-рішень,

²Генеральна Асамблея Організації Об'єднаних Націй. Резолюція. Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року. 2015. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Agenda2030_UA.pdf

а також впровадженню ВТ для прозорого контролю за ресурсами³. Ці нові напрямки формують основу для ЦСР нового покоління.

У контексті енергетики ЦП відіграють ключову роль у переході до моделі сталого розвитку, сприяючи децентралізації, підвищенню енергоефективності та зменшенню екологічного навантаження. Розглянемо основні функції енергетичних ЦП:

моніторинг та управління енергоспоживанням. Завдяки інтеграції з пристроями IoT та системами AI, ЦП забезпечують постійний збір, аналіз і візуалізацію даних про енергоспоживання. Це дозволяє користувачам оперативно реагувати на перевитрати енергії, формувати індивідуальні режими споживання та зменшувати вуглецевий слід.

оптимізація розподілу енергетичних ресурсів. Використання алгоритмів оптимізації (наприклад, лінійного програмування або моделей на основі теорії ігор) дає змогу платформам автоматизовано перерозподіляти навантаження між споживачами та джерелами енергії. Це особливо актуально в умовах пікового споживання або інтеграції нестабільних джерел, таких як сонячна чи вітрова енергетика.

підтримка децентралізованих енергосистем. У сталих енергетичних моделях важливе місце займає інтеграція ВДЕ та мікрогенерації (сонячні панелі, біогазові установки, міні-ГЕС тощо). ЦП виступають як координатори між численними дрібними виробниками енергії, балансуючи генерацію і споживання в режимі реального часу.

автоматизація транзакцій та обліку. Використання ВТ дозволяє фіксувати енергетичні угоди, забезпечуючи прозорість, незмінність даних та захист від шахрайства. Учасники платформи можуть здійснювати енергетичний обмін (наприклад, у моделі peer-to-peer (P2P) energy trading) без необхідності в централізованому посереднику.

Доповнюючи ці функції, ЦП також виконують роль інтеграторів даних та аналітики, формуючи нові бізнес-моделі у сфері енергетики, сприяють залученню інвестицій у «зелені» технології та створюють умови для інноваційного розвитку енергетичних стартапів.

У різних країнах ЦП вже довели свою ефективність як інструмент модернізації енергетичної інфраструктури та переходу до моделі сталого розвитку. Застосування ЦТ у поєднанні з політикою енергетичного переходу створює передумови для глибокої трансформації національних енергосистем. Так у країнах Європейського Союзу реалізується низка проєктів з розбудови SG⁴. Такі мережі дають змогу адаптуватися до змін

³ Cernev, T., & Fenner, R. Beyond 2030: structures for achieving sustainable development. *Frontiers in climate*. 2024. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1453366>

⁴ Dileep, G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable energy*. 2020. 146, P. 2589–2625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>

у навантаженні, оперативно реагувати на несприятливі умови та забезпечувати інтеграцію ВДЕ, які мають нестабільний характер генерації. Платформи, які керують цими мережами, базуються на алгоритмах балансування попиту і пропозиції, автоматизації підстанцій та прогнозній аналітиці. Французька компанія Enedis реалізувала проєкт масового впровадження розумних лічильників (Smart Meters, SM) Linky⁵ що дають змогу дистанційно моніторити, обліковувати й аналізувати споживання електроенергії. Завдяки ЦП Enedis отримує зворотний зв'язок у реальному часі, виявляє перевантаження мережі та автоматично перерозподіляє потоки електроенергії. Це сприяє прозорості, енергоефективності та підвищенню обізнаності споживачів. У США активно впроваджуються платформи для управління мікромережами (microgrids) та розподіленими енергетичними ресурсами⁶. Такі рішення дозволяють локальним спільнотам забезпечувати себе електроенергією в автономному режимі, зменшувати залежність від централізованих постачальників та використовувати ВДЕ (наприклад, сонячні панелі на дахах). ЦП таких типів часто інтегрують засоби автоматизації, AI та предиктивну аналітику.

Українська національна платформа декарбонізації, ініційована за підтримки міжнародних партнерів, спрямована на впровадження цифрових рішень у сфері енергетики та клімату⁷. Її мета – створити цифрову інфраструктуру, яка дозволить відстежувати викиди, планувати заходи з енергоефективності та підтримувати «зелені» інвестиційні проєкти. В умовах енергетичної кризи та викликів воєнного часу така платформа стає важливим інструментом для побудови сталого енергетичного майбутнього.

2. Математичні моделі цифрових енергоплатформ

ЦП, які функціонують у сфері енергетики, є складними динамічними системами з великою кількістю взаємозалежних учасників і технологічних елементів. Для ефективного проєктування, аналізу та оптимізації таких систем застосовуються різноманітні математичні методи.

⁵ Karsenti, L., & Réda, K. Enedis IoT smart grid solutions for more efficiency. CIRED 2021 – The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. IET Conference Proceedings. 2021. Vol. 6. P. 1390–1394. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1479>

⁶ Muhtadi, A., Pandit, D., Nguyen, N., & Mitra, J. Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. IEEE Transactions on Industry Applications. 2021. Vol. 57(3). P. 2223–2235. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3065329>

⁷ Хмара В., Кошова С. Використання енергозберігаючих технологій як механізм підвищення рівня економічної безпеки в містах України. Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення. 2023. № 5. С. 141–149. DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2023-5-141-149>

Серед них ключову роль відіграють теорія графів, методи оптимізації та імітаційне моделювання.

Теорія графів – використовується для моделювання структури взаємодії між елементами енергетичної платформи: виробниками, споживачами, акумуляторами, мережевими вузлами. У такій моделі вузли графа відповідають за функціональні об'єкти (генератори, користувачі, накопичувачі), а ребра – за зв'язки між ними, що можуть означати фізичні канали передачі енергії, інформаційні зв'язки або фінансові транзакції.

Нехай платформа моделюється як орієнтований граф

$$G = (V, E),$$

де V – множина вузлів, що представляють виробників (P), споживачів (C), акумулятори (A) та мережеві вузли (N):

$$V = P \cup C \cup A \cup N$$

E – множина ребер, яка описує взаємозв'язки між елементами системи, тобто потоки енергії, інформаційні зв'язки та фінансові транзакції:

$$E = (v_i, v_j) | v_i, v_j \in V$$

Кожен вузол $v_i \in V$ має набір параметрів

$$v_i = \text{тип, потужність, статус, координати}$$

де Тип: $v_i \in \{P, C, A, N\}$ – виробник, споживач, акумулятор, мережевий вузол

Потужність: p_i – вимірюється у кВт

Статус: s_i – активний або неактивний вузол

Координати: (x_i, y_i) – географічне розташування вузла

Кожне ребро $e_i \in E$ визначає тип зв'язку між вузлами:

$$f(e_i) = \text{енергетичний потік, інформаційний потік, фінансова транзакція}$$

де Енергетичний потік: P_i – кількість енергії, переданої від v_i до v_j :

$$P_i = \eta_i \cdot p_i$$

де η_i – коефіцієнт ефективності передачі енергії

Інформаційний потік: I_i – обсяг даних, переданих між вузлами

Фінансова транзакція: F_i – вартість передачі енергії або послуги

Завдання оптимального розподілу енергії формулюється як задача лінійного програмування:

$$\max \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} P_{ij}$$

при обмеженнях на баланс енергії:

$$\sum_j P_{ij} - \sum_k P_{ki} = 0, \quad \forall v_i \in V$$

Ця математична модель описує структуру енергетичної ЦП, взаємодію між її елементами та механізми передачі ресурсів.

Завдяки аналізу графів можна:

- ідентифікувати критичні вузли системи;
- оптимізувати енергетичні потоки;
- виявляти вузькі місця в мережевій інфраструктурі;
- оцінювати стійкість системи до збоїв або атак.

Особливо корисним є застосування напрямлених зважених графів для моделювання втрат у мережі, тарифних зон або пріоритетів розподілу ресурсів.

Методи оптимізації – дозволяють формалізувати завдання розподілу енергетичних ресурсів і знайти рішення, які мінімізують витрати або максимізують ефективність роботи системи.

У сфері ЦП використовуються:

1. Лінійне та цілочислове програмування – для задач балансування енергетичних потоків, формалізує задачу оптимального розподілу енергії через мінімізацію витрат або максимізацію ефективності.

Постановка задачі виглядає так:

$$\min_x \sum_i c_i x_i$$

за умов:

$$\sum_i a_{ij} x_i \leq b_j, \quad \forall j$$
$$x_i \geq 0, \quad \forall i$$

де x_i – рішення (наприклад, кількість енергії, що постачається споживачам),

c_i – витрати на одиницю ресурсу,

a_{ij} – коефіцієнти споживання ресурсів,

b_j – обмеження доступності ресурсів.

Для цілочислового програмування обмеження на змінні приймають дискретні значення:

$$x_i \in Z$$

що важливо у випадку обмежень на генерацію енергії або режимів роботи обладнання.

2. Еволюційні алгоритми (наприклад, генетичні алгоритми) – для оптимізації в умовах невизначеності або за великої кількості змінних.

Алгоритм складається з таких етапів:

Ініціалізація початкової популяції рішень P_0 .

Визначення функції пристосованості $f(x)$.

Вибір кращих рішень за критерієм:

$$P_{t+1} = \text{selection}(P_t)$$

Оператори мутації та схрещування:

$$x' = x + \Delta x$$

$$x_{\text{new}} = \text{crossover}(x_1, x_2)$$

Перевірка умов зупинки.

Моделі стохастичної оптимізації – для врахування непередбачуваних факторів, таких як зміни погоди у випадку сонячної або вітрової генерації:

$$\min_x E [F(x, \xi)]$$

де ξ – випадкова величина (наприклад, варіація потужності генерації сонячної енергії),

$E[F(x, \xi)]$ – очікуване значення функції вартості або втрат.

Стохастична модель може мати форму:

$$\sum_i p_i F(x, \xi_i) \leq B$$

де p_i – ймовірність конкретного стану ξ_i ,

B – заданий бюджет або межа витрат.

Ці підходи дають змогу забезпечити адаптивне управління енергоспоживанням, враховуючи часову змінність попиту, нестабільність генерації з ВДЕ, а також фінансові обмеження.

Імітаційне моделювання (зокрема агентне або дискретно-подійне) дозволяє прогнозувати поведінку енергосистеми у складних динамічних умовах, які аналітично описати неможливо. Наприклад, моделювання SG або P2P енергетичних ринків може показати: як змінюється навантаження мережі в умовах пікового попиту; як впровадження нової технології (наприклад, домашніх акумуляторів) впливає на загальний баланс; як реагує система на перебої постачання або зміни тарифів. Таке моделювання широко застосовується у дослідницьких проєктах, пілотних програмах цифровізації та плануванні розвитку регіональних енергетичних систем.

Енергетична ЦП розглядається як множина агентів $A = a_1, a_2, \dots, a_n$, кожен з яких має власну стратегію π_i функцію корисності $U_i(s, a_i, t)$, та змінні стану $x_i(t) \in R^m$.

Функціонування мережі описується переходами між станами:

$$x_i(t + \Delta t) = f_i(x_i(t), a_i(t), \theta_i, \xi_t)$$

де θ_i – параметри агента (технологічні обмеження, потужність, реакція на ціну),

ξ_t – стохастичні збурення (попит, погодні умови),

f_i – динаміка, задана правилами платформи.

Сценарне моделювання включає пікове навантаження, аналіз максимального сумарного споживання:

$$P_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t), \quad p_i(t) \in [0, P_{\text{imax}}]$$

впровадження нових технологій (наприклад, накопичувачі), оцінка зміни профілю навантаження:

$$\Delta E(t) = E_{\text{до}}(t) - E_{\text{після}}(t), \quad \text{де } E(t) = \int_0^t P_{\text{total}}(\tau) d\tau$$

реакція на тарифні сигнали, залежність дій агентів від функції тарифу:

$$a_i(t) = \arg \max_a E [U_i(s, a, t) - C_i(p(t), a)]$$

3. Цифрові технології в енергетичних платформах: сучасні підходи та інноваційні рішення

Стрімкий розвиток ЦТ відкриває нові можливості для трансформації енергетичного сектору. Такі ЦП формують нову інфраструктуру взаємодії між виробниками, споживачами та операторами мереж. Наприклад, використання технологій IoT та SM відіграє ключову роль у сучасній енергетичній інфраструктурі. Ці інструменти забезпечують збір даних у режимі реального часу, що значно покращує процес моніторингу енергоспоживання та дозволяє автоматизувати управління енергетичними потоками. Завдяки високій точності вимірювань та здатності оперативно реагувати на зміни у мережі, SM сприяють раціональному використанню ресурсів та зменшенню експлуатаційних витрат. Інтеграція таких технологій у SG створює адаптивні енергосистеми, здатні ефективно регулювати енергопотоки в режимі реального часу, підтримувати баланс і надійність мережі, а також оптимізувати розподіл енергії, включаючи ВДЕ та енергоефективні рішення⁸.

ВТ дозволяє створювати децентралізовані системи обліку, в яких усі транзакції з енергоресурсами (наприклад, купівля-продаж електроенергії між споживачами та виробниками) фіксуються в незмінному цифровому реєстрі. Це забезпечує відкритість даних і неможливість маніпуляцій з обліком споживання чи генерації.

Ключовим елементом таких рішень є смарт-контракти (Smart Contracts, SC) – програмовані алгоритми, які автоматично виконують умови енергетичних угод без потреби в посередниках. Вони дозволяють автоматизувати процеси оплати, балансування навантажень, перевірки

⁸ Golotsukova, T. The U.S. Energy Market: Structure, Regulation, And Industry Economics. y Transfer pricing in Ukraine: a system of analytical, digital, and control management. Riga, Latvia: Baltija Publishing. 2025. P. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-553-2-1>

відповідності обсягів переданої енергії, а також забезпечують прозорість і надійність у системах P2P торгівлі⁹.

BT стимулює розвиток локальних енергетичних ринків (Local Energy Markets, LEMs), де споживачі можуть не лише споживати, а й продавати надлишок виробленої електроенергії (наприклад, з сонячних панелей) без посередників. Це сприяє енергетичній децентралізації, активному залученню громад та поширенню ВДЕ¹⁰.

Інтеграція BT з IoT-пристроями (лічильники, сенсори) дозволяє в реальному часі синхронізувати дані з багатьох джерел, що сприяє оперативному прийняттю рішень, зменшенню втрат та оптимізації енергопотоків. Завдяки криптографічному захисту, BT забезпечує високий рівень кібербезпеки, що особливо важливо для критичної інфраструктури енергетичних систем.

Розглянемо методи AI, які також стали ключовим інструментом у трансформації розподілених енергетичних систем, сприяючи підвищенню операційної ефективності та оптимізації використання ресурсів. На Рис. 1 наведено діаграму перспективних напрямків використання AI в системах SG.

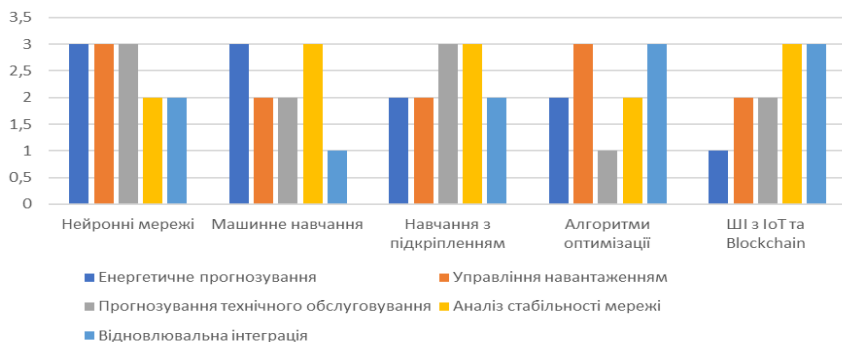


Рис. 1. Перспективні напрями впливу AI в системах SG¹¹

⁹Голоцукова Т. Сучасні проблеми моделювання соціально-економічних систем. Бізнес-логіка в розробці Smart Contracts. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця. 2025. URL: <https://mpsesm.hneu.edu.ua/book/2025/pages/sections/section05/page1428.html>

¹⁰Горбачук В. М., Барладим Т. О., Дунаєвський М. С., Годлюк В. В., Рибачок Д. О. Основи децентралізованих ринків електроенергії. Використання блокчейн технологій в енергетиці – 2025. Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2025. С. 15–18.

¹¹ Arévalo, P., & Jurado, F. Impact of Artificial Intelligence on the Planning and Operation of Distributed Energy Systems in Smart Grids. *Energies*. 2024. Vol. 17(17), P. 4501. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174501>

До основних AI-методів належать:

– алгоритми машинного навчання, які застосовуються для аналізу великих масивів даних з метою виявлення закономірностей та прогнозування майбутнього попиту на енергію. Особливо ефективно ці моделі працюють у сфері управління попитом: вони допомагають енергетичним компаніям прогнозувати пікові навантаження та відповідним чином керувати енергоспоживанням;

– методи глибокого навчання, зокрема нейронні мережі, застосовуються до більш складних завдань – таких як аналіз потоків потужності або виявлення аномалій у несиметричних розподільчих мережах. Варто виокремити згорткові нейронні мережі (CNN) та радіальні базисні функціональні мережі (RBF-мережі), які відзначаються високою здатністю до моделювання нелінійних залежностей у системі. Це робить їх незамінними для моніторингу та діагностики несправностей у реальному часі;

– алгоритми оптимізації, зокрема генетичні алгоритми та метод рою частинок, широко застосовуються для вирішення складних задач, пов'язаних із розподілом енергії та управлінням ресурсами. Вони дають змогу ефективно проєктувати та експлуатувати мікромережі, забезпечуючи оптимальне використання як ВДЕ, так і традиційних джерел енергії.

В Табл. 1 наведемо результати аналізу сильних та слабких сторін, можливостей та загроз впровадження ЦТ в енергетичні платформи.

Таблиця 1

SWOT-аналіз перспектив впровадження ЦТ

Вид	S (Сильні сторони)	W (Слабкі сторони)	O (Можливості)	T (Загрози)
1	2	3	4	5
Блокчейн технологія	– Прозорість транзакцій – Висока безпека – Смарт-контракти – Зниження витрат – Прямі P2P-розрахунки	– Високе енергоспоживання (деякі платформи) – Відсутність повної правової бази – Складність для користувачів – Обмежена масштабованість – Інтеграція в існуючу енергосистему	– Розвиток децентралізованих ринків – Інтеграція з SM – Підвищення довіри споживачів – Нові бізнес-моделі (мікроугоди) – Підтримка цифрових енергоініціатив	– Кіберзагрози та баги в смарт-контрактах – Супротив традиційних енергокомпаній – Регуляторні обмеження – Технічна нестабільність – Залежність від інтернету/інфраструктури

1	2	3	4	5
Штучний інтелект	– Оптимізація розподілу енергії в режимі реального часу – Аналіз великих обсягів даних для прогнозування споживання – Адаптивне ціноутворення – Автоматизація транзакцій та управління мережею – Підвищення енергоефективності через інтелектуальні алгоритми	– Залежність від якості вхідних даних – Непрозорість алгоритмів – Висока вартість впровадження та обслуговування – Необхідність висококваліфікованого персоналу – Проблеми етичного та правового характеру	– Інтеграція з SG, IoT – Підтримка децентралізованих енергетичних ринків – Моделювання поведінки споживачів – Адаптація до зміни клімату через прогнозування попиту – Удосконалення енергетичного планування на макrorівні	– Зловживання даними, порушення приватності – Кібератаки на інтелектуальні системи – Регуляторна невизначеність – Витіснення робочих місць через автоматизацію – Надмірна залежність від технологій, інфраструктури
IoT та Smart Grids	– Моніторинг споживання енергії – Автоматизація управління мережею – Підвищення енергоефективності та надійності – Інтеграція ВДЕ – Зменшення втрат в електромережі	– Уразливість до кібератак – Висока вартість впровадження інфраструктури – Складність управління великими обсягами даних – Неоднорідність стандартів пристроїв – Залежність від стабільності зв'язку	– Розвиток децентралізованих енергосистем – Участь активного споживача – Покращення управління піковими навантаженнями – Інтеграція з AI (прогнозування, оптимізації) – Розширення енергопослуг та бізнес-моделей	– Регуляторні бар'єри та стандартизація – Недовіра користувачів до технологій – Високі витрати на обслуговування інфраструктури – Старіння мережевих компонентів – Технічна складність при масштабуванні

4. Архітектура цифрових енергетичних платформ та перспективи їх впровадження

Розглянемо можливу архітектуру ЦП електронної торгівлі електроенергією на основі ВТ. У відповідь на зростаючий попит на безпечні та ефективні транзакції в галузі електронної торгівлі електроенергією, пропонується багаторівнева архітектура платформи, що інтегрує прикладний рівень, сервісний рівень та рівень даних. Взаємодія між цими рівнями базується на ВТ, яка забезпечує прозорість, незмінність записів та підтримку SC для автоматизованого виконання торгових угод.

Прикладний рівень. Цей рівень виконує ключові функції безпосередньої взаємодії з користувачами ЦП та реалізації бізнес-логіки:

1. Автентифікація учасників – перевірка особистості користувачів для забезпечення безпечного доступу до системи.

2. Управління даними – зберігання, обробка та актуалізація структурованої інформації про учасників та їхню діяльність.

3. Пошук інформації – швидкий доступ до даних, необхідних для прийняття рішень у реальному часі.

4. Кредитний рейтинг – оцінка фінансової надійності учасників для мінімізації ризиків у процесі торгів.

5. Управління ваговими коефіцієнтами – розподіл пріоритетів, обсягів або частки впливу учасників на торговельний процес.

6. Управління клієнтами – функціонал CRM: ведення профілів користувачів, історії транзакцій, статусів участі тощо.

7. Операції з сертифікатами – облік і передача сертифікатів походження, зокрема щодо джерел "зеленої" енергії.

8. Фінансові розрахунки – кліринг угод, що включає узгодження, обробку і завершення фінансових операцій.

9. Облік споживання – реєстрація обсягів спожитої електроенергії кожим учасником.

Сервісний рівень. На цьому рівні реалізується логіка обробки торгів, забезпечується взаємодія між модулями та виконуються ключові сервісні операції:

1. Блокчейн-сервіс – зберігає незмінні записи про транзакції, забезпечує функціонування SC та гарантує прозорість торгових процесів.

2. Сервіс спільного використання платформи – надає механізми обміну даними та ресурсами між різними учасниками: трейдерами, регуляторами, агрегаторами, виробниками та споживачами електроенергії.

3. Сервіси розширення бізнесу – стандартизовані інтерфейси, що забезпечують підтримку транзакційної діяльності через ВТ. Вони дозволяють платформі інтегруватися з зовнішніми бізнес-процесами, розширюючи можливості для проведення та автоматизації комерційних операцій.

Рівень даних. Цей рівень відповідає за збір, обробку та аналітичну підтримку даних, що генеруються під час торгів:

1. Виставлення пропозицій: механізм подання заявок на купівлю або продаж електроенергії, що включає визначення обсягу та цінових параметрів.

2. Моніторинг торгів: відстеження активності учасників у режимі реального часу; перегляд актуальних показників попиту, пропозиції та цін; контроль за дотриманням правил, навантаженнями та виявлення аномалій.

3. Аналітика: аналіз ринкових трендів, динаміки цін та поведінки учасників; прогнозування майбутніх коливань попиту та пропозиції;

формування звітів для регуляторів, адміністрації платформи та користувачів¹².

Запропонована архітектура на основі ВТ дозволяє забезпечити надійність, прозорість і масштабованість електронної платформи торгівлі електроенергією. Поділ на функціональні рівні, створює основу для гнучкого управління системою, інтеграції з зовнішніми структурами та реалізації сучасних моделей енергетичного ринку. Реалізація такої архітектури сприяє досягненню ЦСР ООН, зокрема шляхом оптимізації обміну енергією з ВДЕ, впровадженню інноваційних цифрових рішень, а також через ефективне використання енергоресурсів і підтримку зелених сертифікатів.

Представництво Фонду ім. Гайнріха Бюлля в Україні ініціювало дослідження потенціалу переходу енергетичного сектору України на ВДЕ до 2050 року. Інститут економіки та прогнозування НАН України змодельовував три сценарії розвитку: Консервативний (без технологічних змін), Ліберальний (ринкова конкуренція та зростання ВДЕ до 30%) і Революційний (цільова політика, що дозволяє досягти 91% ВДЕ у кінцевому споживанні). Результати показали, що за умов впровадження ефективної політики та енергоощадних технологій Україна має реальний потенціал забезпечити свої енергетичні потреби за рахунок ВДЕ, що також відкриває можливості для вирішення соціально-економічних і екологічних викликів¹³.

Хоча зазначене дослідження було здійснене у 2017 році, з того часу Україна пройшла через масштабні випробування – пандемію COVID-19, повномасштабну війну, економічні та інфраструктурні втрати, що суттєво змінили контекст функціонування енергетичного сектору. Ці події не лише ускладнили умови розвитку, але й актуалізували потребу в адаптивних, стійких та технологічно гнучких рішеннях. Саме тому дослідження можливих сценаріїв впровадження сучасних ЦП в енергетиці набуває ще більшої ваги. Аналіз цифрових трансформацій в умовах сучасних викликів, з урахуванням стану інфраструктури, законодавства та рівня цифрової готовності, – є критично важливим кроком до побудови ефективної, прозорої та стійкої енергетичної системи майбутнього. Розглянемо можливі сценарії впровадження ЦТ у ЦП в українських умовах:

¹² Zeng, Z., Zhang, S., Chen, Z., Ruan, D., & Lin, H. The distributed trading platform design based on blockchain technology. E3S Web of Conferences. 2023. 466, P. 7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346602010>

¹³ Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук та ін.; ред.: Ю. Огаренко, О. Алієва. Київ : Вид-во ТОВ «АРТ КН.», 2017. 88 с.

1. Базовий сценарій (інерційний розвиток). Впровадження технологій відбувається повільно, локально та переважно за рахунок міжнародної технічної допомоги або окремих проєктів. Наприклад: пілотні проєкти SG у співпраці з ЄС; встановлення IoT-сенсорів на трансформаторних підстанціях у великих містах; використання AI для прогнозування навантажень у обмежених регіонах (наприклад, Київ, Львів). Обмеження такого розвитку: відсутність системної державної політики; низька інвестиційна активність; слабка нормативно-правова база для рішень BT.

Варто зазначити, що у 2022 році урядом України було схвалено Концепцію впровадження SG до 2035 року, а у 2024 році – Дорожню карту реалізації цієї Концепції, що демонструє стратегічне бачення цифровізації енергетичної інфраструктури. Проте на поточному етапі реалізація залишається на рівні базового сценарію.

2. Проміжний сценарій (регіональна цифрова трансформація). Окремі регіони або міста впроваджують цілісні енергетичні ЦП з елементами SG, IoT-моніторингу, блокчейн-ідентифікації джерел енергії та аналітикою AI. Наприклад: регіональні SG з інтеграцією ВДЕ (Одещина з сонячним потенціалом); створення ЦП моніторингу споживання з аналітикою AI для місцевих енергетичних мереж; впровадження BT у системі обліку викидів CO₂ для підприємств з податковими пільгами. Можливостями в такому сценарії будуть: партнерства з міжнародними донорами (USAID, ЄС, GIZ); децентралізоване енергетичне планування в громадах.

3. Інноваційно-стратегічний сценарій. Держава формує стратегічну цифрову енергетичну політику, що стимулює масштабне впровадження смарт-технологій через публічно-приватне партнерство та інвестиції. Наприклад: національна ЦП SG для операторів системи розподілу; обов'язкове встановлення SM з IoT у новобудовах; Blockchain-платформи для торгівлі «зеленими сертифікатами» та р2р-обміну енергією; масштабне використання AI для диспетчеризації мереж, прогнозування дефіцитів та попиту. Для цього необхідні такі умови: законодавча реформа (цифрова енергетика, дані, кібербезпека); інвестиційна підтримка від держави та міжнародних фінансових інституцій; стимулювання ВДЕ та енергоефективності через цифрові механізми.

4. Антикризовий сценарій (під тиском війни та відновлення). Технології впроваджуються в умовах відновлення після руйнувань інфраструктури, з орієнтацією на автономні, стійкі та безпечні рішення. Наприклад: децентралізовані microgrids у зруйнованих громадах із локальними ВДЕ, IoT-контролем та AI-моніторингом; BT для безпечного обліку виробництва та споживання електроенергії в зонах з нестабільним зв'язком; інтеграція в гуманітарні платформи розподілу ресурсів на основі

даних. Ключовими цілями такого сценарію є: резильєнтність енергетичної системи; кіберстійкість; інклюзивне цифрове відновлення.

5. Інвестиційна привабливість та економічна ефективність: виклики та перспективи цифровізації енергетики в Україні

У 2023 році Кабінет Міністрів України затвердив оновлену Енергетичну стратегію України на період до 2050 року, яка замінила попередній документ 2017 року. Стратегія враховує нові геополітичні реалії, наслідки повномасштабної війни, євроінтеграційні зобов'язання та необхідність досягнення кліматичної нейтральності. Деякими ключовими цілями є: оновлення та модернізація енергетичної інфраструктури; розвиток альтернативних джерел енергії, нових продуктів та інноваційних рішень в енергетичному секторі; всебічна інтеграція з ринками Європейського Союзу та ефективне функціонування внутрішніх ринків¹⁴.

Такі цілі обумовили: розширення використання ВДЕ, декарбонізацію, впровадження ЦТ та SG, інтеграцію з європейською енергосистемою ENTSO-E, модернізацію інфраструктури та розвиток гнучких та децентралізованих джерел генерації, включаючи малі модульні ядерні реактори та системи зберігання енергії; можливість залучення приватного капіталу, інноваційних технологій та розвиток механізмів «зеленого» фінансування для реалізації сталого енергетичного переходу до 2050 року.

Впровадження енергоплатформ (зокрема з технологіями: SG, IoT, AI та BT) супроводжується як значними капітальними витратами на модернізацію інфраструктури, так і потенційно високими довгостроковими вигодами. Вартість створення систем варіюється залежно від масштабу впровадження, рівня цифрової зрілості регіону та складності енергетичної інфраструктури.

Загалом, витрати на впровадження ЦП поділяються на CAPEX та OPEX. Початкові капітальні інвестиції (CAPEX):

1. Створення ЦП: розробка програмного забезпечення (ПЗ), архітектури баз даних (БД), користувацького інтерфейсу, впровадження хмарної інфраструктури.

2. Технічне оснащення: встановлення SM, IoT-сенсорів та інших пристроїв збору даних.

3. Інфраструктура дата-центрів: сервери, мережеве обладнання, системи зберігання даних, живлення, охолодження та захист.

¹⁴ Енергетична стратегія. Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0> (дата звернення: 13.06.2025).

4. Забезпечення кібербезпеки: впровадження систем захисту даних, мережових екранів (firewall), систем моніторингу та резервного копіювання, засобів шифрування тощо.

5. Інші необоротні активи.

Операційні витрати (OPEX):

1. Технічна підтримка та обслуговування: підтримка обладнання (лічильники, сенсори, шлюзи), оновлення, діагностика, калібрування пристроїв, оновлення та обслуговування мережевого обладнання та серверів, виїзні бригади з технічного сервісу.

2. Інфраструктура обчислень та зберігання даних: хмарні послуги (IaaS/PaaS): оренда в AWS, Azure, Google Cloud або локальний дата-центр, системи зберігання даних – резервне копіювання (backup), архівація даних, резервування (redundancy), ліцензії на ПЗ, підтримка БД.

3. Енергоспоживання дата-центрів і пристроїв.

4. Кібербезпека та інформаційна безпека: сервіси моніторингу загроз (SIEM, IDS/IPS), аудити, пентести, сертифікація відповідності, зарплати фахівців з безпеки, антивірус, VPN, firewall-сервіси.

5. ПЗ та оновлення: обслуговування ядра платформи (оновлення, модулі, AI-моделі), інтеграція з іншими системами (CRM, ERP, SCADA), підтримка застосунків, API, інтерфейсів користувача.

6. Персонал та навчання: IT-фахівці, DevOps, аналітики, оператори центрів даних, навчання персоналу, підвищення кваліфікації, центри обслуговування користувачів (call center, help desk).

7. Ліцензування, страхування та сертифікація.

8. Інші постійні витрати, необхідні для забезпечення безперервної роботи системи.

Операційні витрати критично важливі для забезпечення надійності, безпеки та масштабованості ЦП. Їх потрібно враховувати як мінімум на 10–15 років після впровадження CAPEX, щоб підтримувати систему в актуальному стані, захищати дані й відповідати змінним вимогам регуляторів та користувачів.

Непрямі витрати: пов'язані з трансформацією процесів управління та зміною регуляторної моделі.

Розглянемо мультиплікатори впливу – показники, які відображають не лише прямий економічний ефект від інвестицій у ЦП, а й їхній широкий соціально-економічний вплив на суміжні сектори, енергетичну систему, екологію та суспільство загалом.

ЦП мають економічний та соціальний мультиплікатори впливу:

- інноваційний ефект: розвиток суміжних секторів (IoT, SG, AI, cybersecurity);

- зайнятість: створення нових високотехнологічних робочих місць;

– екологічний ефект: декарбонізація через оптимальне балансування генерації;

– розвиток ВДЕ: інфраструктура енергетичної ЦП стимулює локальних генераторів (сонячні панелі, мікротурбіни).

Сьогодні інвестори дедалі активніше враховують екологічні, соціальні, управлінські критерії (Environmental, Social, Governance, ESG) у процесі ухвалення інвестиційних рішень з метою підвищення прибутковості та ефективного розподілу капіталу з урахуванням системних ризиків. Відповідно, аналіз ESG-звітності стає для них ключовим інструментом оцінки інвестиційної доцільності¹⁵.

ВТ знаходить практичне застосування у «зелених сертифікатах» або вуглецевому трейдингу, дозволяючи відстежувати й підтверджувати вклад конкретного виробника чи споживача в скорочення викидів – що є важливим для ESG-звітності та сталого фінансування.

У цьому контексті впровадження ESG-звітності дає змогу, з одного боку, у доступнішій та розширеній формі висвітлювати інформацію про екологічні й соціальні аспекти діяльності підприємства, етичні принципи та корпоративну політику, що розширює БД для ухвалення більш обґрунтованих управлінських рішень. З іншого боку, завдяки підвищенню організаційної легітимності та формуванню відкритого діалогу зі стейкхолдерами, ESG-звітність сприяє зниженню зовнішнього тиску, покращенню економічної результативності підприємства та зменшенню вартості залучення додаткових інвестицій¹⁶.

Ключовим елементом ефективної реалізації ESG-звітності є високоякісна система збору, обробки та зберігання даних, що базується на використанні спеціалізованих БД, Big Data технологій та інструментів аналітики. ЦП повинна підтримувати формування інтегрованих дата-мереж, які охоплюють джерела викидів, енергоспоживання, поведінкові патерни користувачів, соціальні метрики, а також параметри корпоративного управління. У контексті архітектури цифрової системи доцільно впроваджувати багаторівневі сховища даних (data lakes, time-series databases), що забезпечують гнучкий доступ до інформації як у реальному часі, так і в рамках ретроспективного аналізу, із застосуванням хмарних технологій для масштабування та безпеки.

Зокрема, використання орієнтованих на події (event-driven) та орієнтованих на час (time-series) БД, таких як InfluxDB, TimescaleDB чи

¹⁵ Що таке звіт ESG? Які основні проблеми в звітуванні ESG? Офіс сталих рішень. 2024. URL: <https://ukraine-oss.com/shho-take-zvit-esg-yaki-osnovni-problemy-v-zvituvanni-esg/>

¹⁶ Lehenchuk, S. F., Oliinyk, O. V., & Zavalii, T. O. Institutional signaling with the help of ESG reporting. Problems of theory and methodology of accounting, control and analysis. 2024. Vol. 2(58). P. 24–31. DOI: [https://doi.org/10.26642/pbo-2024-2\(58\)-24-31](https://doi.org/10.26642/pbo-2024-2(58)-24-31)

Apache Druid, є доцільним для енергетичних платформ, де показники змінюються динамічно. Застосування таких технологій дозволяє не лише забезпечити високу швидкість обробки ESG-метрик, а й автоматизувати генерацію звітності відповідно до міжнародних стандартів і рекомендацій (Global Reporting Initiative, GRI; Task Force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD; European Sustainability Reporting Standards, ESRS).

Таким чином, ESG-модуль, інтегрований у ЦП, може функціонувати як аналітичний вузол, що акумулює екологічні, соціальні та управлінські дані, перетворюючи їх на візуалізовані показники для внутрішнього моніторингу та зовнішньої звітності. Особливо актуально це в контексті нових вимог до нефінансової звітності в ЄС (зокрема, Директиви Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD), що передбачають автоматизований обмін даними з державними реєстрами та банками ESG-інформації.

Отже, ефективна реалізація ESG-звітності на енергетичних ЦП потребує інтеграції розвинутої БД як ключового технічного компонента – основи для прозорості, відтворюваної та масштабованої аналітики, яка слугує не лише внутрішнім цілям управління, а й формує позитивне сприйняття платформи на міжнародному інвестиційному ринку.

Цифровізація енергетики в Україні має низку технічних, організаційних та кадрових викликів, що потребують уваги:

- недостатній рівень цифрової інфраструктури в регіональних енергосистемах;
- відсутність єдиного інформаційного простору для моніторингу та аналізу енергетичних ресурсів. У своїй монографії Євдокімов В.А. підкреслює проблему відсутності єдиної інформаційної системи (ІС), яка б охоплювала усі дані про об'єкти альтернативної енергетики для ефективного моніторингу та аналізу. Це ускладнює розробку регіональних механізмів підтримки «зеленої» енергетики, тому створення такої ІС (повної БД) є актуальним і необхідним кроком¹⁷;
- слабка інтеграція ВДЕ в енергосистему через технологічні та регуляторні бар'єри;
- кібербезпека як ключовий виклик у контексті захисту критичної інфраструктури від кіберзагроз;
- нестача кваліфікованих кадрів і необхідність підвищення цифрової грамотності персоналу;

¹⁷ Євдокімов, В. А. Математичне та інформаційно-технологічне забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення енергоринку. Publishing House «UKRLOGOS Group». 2023. DOI: <https://doi.org/10.36074/Yevdokimov-monograph.2023>

– обмежене фінансування та інвестиційні ризики у впровадженні новітніх технологій.

Попри існуючі виклики, така цифровізація відкриває широкі перспективи:

- розвиток ЦП для трейдингу та балансування енергосистем;
- використання технологій IoT, великих даних (Big Data) і AI для оптимізації енергоспоживання;
- інтеграція BT для прозорості, ефективності енергетичних транзакцій;
- розвиток Smart City і розумних будинків, що дозволяють підвищити енергоефективність і знизити навантаження на мережі;
- підтримка і стимулювання інноваційних проєктів у сфері відновлюваної енергетики;
- можливість залучення міжнародних інвестицій та інтеграції у європейський енергетичний ринок.

ВИСНОВКИ

ЦП трансформують енергетику, та є фундаментом нової енергетичної парадигми, що відповідає глобальним викликам і підтримує ЦСР через ІКТ: AI, IoT, SG і BT. Математичне моделювання та оптимізація забезпечують надійну аналітичну базу для інтелектуальних систем, а багаторівнева архітектура на блокчейні гарантує безпеку і масштабованість торгівлі енергією. Інвестиції в цифровізацію – ключ до модернізації та досягнення нових стратегічних цілей. Комплексний підхід із технічних, організаційних та кадрових аспектів разом із впровадженням ESG-звітності є основою сталого розвитку у контексті євроінтеграції. Отже, розглянемо такі рекомендації для стейкхолдерів:

1. Держава та регулятори: прискорити створення єдиного інформаційного простору для моніторингу енергоресурсів, створити стандарти кібербезпеки, нормативну підтримку впровадження ЦП, SG, IoT, AI, BT; стимулювати ESG-звітність і «зелене» фінансування.

2. Інвестори та фінанси: враховувати ESG-критерії, інвестувати в цифрову інфраструктуру, кібербезпеку, Big Data, підтримувати ВДЕ, декарбонізацію та інновації, зокрема системи зберігання енергії.

3. Енергетичні компанії: впроваджувати ЦП з урахуванням CAPEX і OPEX, розвивати аналітику ESG-даних, підвищувати цифрову грамотність і кібербезпеку, співпрацювати з державою у удосконаленні нормативної бази.

4. Розробники та IT-компанії: створювати масштабовані, безпечні ЦП відповідно до енергетичних і ESG-вимог, впроваджувати сучасні

технології обробки даних і AI, забезпечувати кібербезпеку, співпрацювати з енергетиками.

5. Міжнародні партнери: підтримувати фінансово та технічно проєкти цифровізації енергетики в Україні, з акцентом на «зелені» технології та інновації; сприяти обміну досвідом, технологіями та кращими практиками цифровізації енергетичного сектору та впровадженню ESG-стандартів; допомагати у формуванні нормативно-правової бази відповідно до європейських стандартів.

6. Наука та освіта: розвивати програми з цифровізації, кібербезпеки, Big Data і AI, готувати кваліфіковані кадри, тестувати і впроваджувати інновації, проводити дослідження для розвитку ЦП.

Подальші дослідження мають зосередитись на впливі цифровізації на енергобезпеку, ефективності SG і IoT, протидії кіберзагрозам, зниженні викидів, інтеграції ВДЕ з ЦП, соціально-економічних наслідках і ролі державної політики¹⁸.

АНОТАЦІЯ

Досліджено трансформаційний вплив цифрових платформ на енергетичний сектор у контексті досягнення цілей сталого розвитку. Зокрема завдяки впровадженню сучасних та інноваційних інформаційно-комунікаційних технологій: штучного інтелекту, Інтернету речей, блокчейн-технологій та розумних енергомереж. Проаналізовано перспективи впровадження таких рішень в цифрові платформи. Розкрито значення математичного моделювання, аналітики та кібербезпеки для ефективного функціонування новітніх енергетичних систем. Описано архітектуру цифрової платформи, яка забезпечує взаємодію між компонентами енергетичної системи та підтримує гнучке масштабування і безпечну обробку даних. Надано комплекс рекомендацій для основних зацікавлених сторін. Розглянуто ESG-звітність як інструмент забезпечення прозорості та механізм залучення екологічно орієнтованих інвестицій.

¹⁸ Дослідження здійснено в рамках проєкту «Розвиток розподіленої енергетики в умовах ринку електричної енергії України з використанням технологій та систем цифровізації», що виконується за напрямом використання бюджетних коштів «підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» бюджетної програми КПКВК 6541230 в НАН України.

The research was conducted as part of the project 'Development of Distributed Energy in the Context of the Ukrainian Electricity Market Using Digitalization Technologies and Systems,' implemented under the state budget program 'Support for Priority Scientific Research and Scientific-Technical (Experimental) Developments of National Importance' (CPCEL 6541230) at the National Academy of Sciences of Ukraine.

Література

1. Arévalo, P., & Jurado, F. Impact of Artificial Intelligence on the Planning and Operation of Distributed Energy Systems in Smart Grids. *Energies*. 2024. 17(17), P. 4501. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174501>
2. Cernev, T., & Fenner, R. Beyond 2030: structures for achieving sustainable development. *Frontiers in climate*. 2024. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1453366>
3. Dileep, G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable energy*. 2020. 146, P. 2589–2625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
4. Golotsukova, T. The U.S. Energy Market: Structure, Regulation, And Industry Economics. y *Transfer pricing in Ukraine: a system of analytical, digital, and control management*. Riga, Latvia: Baltija Publishing. 2025. P. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-553-2-1>
5. Karsenti, L., & Réda, K. Enedis IoT smart grid solutions for more efficiency. *CIRE2021 – The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. IET Conference Proceedings. 2021. (6), P. 1390–1394. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1479>
6. Lehenchuk, S. F., Oliinyk, O. V., & Zavalii, T. O. Institutional signaling with the help of ESG reporting. *Problems of theory and methodology of accounting, control and analysis*. 2024. 2(58), P. 24–31. DOI: [https://doi.org/10.26642/pbo-2024-2\(58\)-24-31](https://doi.org/10.26642/pbo-2024-2(58)-24-31)
7. Muhtadi, A., Pandit, D., Nguyen, N., & Mitra, J. Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. 57(3), P. 2223–2235. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3065329>
8. Zeng, Z., Zhang, S., Chen, Z., Ruan, D., & Lin, H. The distributed trading platform design based on blockchain technology. *E3S Web of Conferences*. 2023. 466, P. 7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346602010>
9. Генеральна Асамблея Організації Об'єднаних Націй. Резолюція. *Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року*. 2015. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Agenda2030_UA.pdf
10. Голоцукова, Т. Сучасні проблеми моделювання соціально-економічних систем. *Бізнес-логіка в розробці Smart Contracts*. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця. 2025. URL: <https://mpsesm.hneu.edu.ua/book/2025/pages/sections/section05/page1428.html>
11. Голоцукова, Т., Ламонов, П. Цифрове підприємство та цифрові двійники: виклики та можливості інтеграції. *Безпека енергетики в епоху*

цифрової трансформації. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2024. С. 87–90.

12. Горбачук В.М., Бардадим Т.О., Дунаєвський М.С., Годлюк В.В., Рибачок Д.О. Основи децентралізованих ринків електроенергії. Використання блокчейн технологій в енергетиці – 2025. Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2025. С. 15–18.

13. Енергетична стратегія. Міністрество енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0> (дата звернення: 13.06.2025).

14. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук та ін.; ред.: Ю. Огаренко, О. Алієва. Київ : ТОВ «АРТ КН.», 2017. 88 с.

15. Євдокімов В. А. *Математичне та інформаційно-технологічне забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення енергоринку*. Publishing House «UKRLOGOS Group». 2023. DOI: <https://doi.org/10.36074/Yevdokimov-monograph.2023>

16. Хмара В., Кошова С. Використання енергозберігаючих технологій як механізм підвищення рівня економічної безпеки в містах України. *Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення*. 2023. № 5. С. 141–149. DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2023-5-141-149>

17. Що таке звіт ESG? Які основні проблеми в звітуванні ESG? Офіс сталих рішень. 2024. URL: <https://ukraine-oss.com/shho-take-zvit-esg-yaki-osnovni-problemy-v-zvituvanni-esg/>

Information about the authors:

Viktor Godliuk

PhD Student at the Department of Intelligent Information Technologies,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics
of the National Academy of Sciences
40, Academician Glushkov Avenue, Kyiv, 03187, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4489-7058>

Tamila Golotsukova

Lead software engineer at the Department
of Intelligent Information Technologies,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics
of the National Academy of Sciences
40, Academician Glushkov Avenue, Kyiv, 03187, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5795-4137>