

# СИНЕРГІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ІНДУСТРІЇ 4.0 У ПІСЛЯВОЄННІЙ МОДЕРНІЗАЦІЇ УКРАЇНИ

©2024 СИДОРЕНКО О. М.

УДК 330.341.1(477):620.9:004.9  
JEL Classification: O32; O33; Q43; Q55

Сидоренко О. М.

## Синергія енергоефективності та Індустрії 4.0 у післявоєнній модернізації України

Мета статті полягає в обґрунтуванні стратегічної важливості та практичних механізмів синергії енергоефективності та Індустрії 4.0 у післявоєнній модернізації України. Розглянуто перспективи використання технологій ШІ, хмарних обчислень, великих даних, промислового інтернету речей, кіберфізичних систем і їхнього впливу на зменшення енергоспоживання, покращення показників продуктивності та підвищення рівня енергетичної безпеки. Доведено, що поєднання енергоефективних рішень із цифровими платформами та системами управління ресурсами сприяє формуванню прозорих і надійних виробничих процесів, які характеризуються помітним скороченням негативного впливу на довкілля. Наголошено на важливості переходу до відновлюваних джерел енергії, оскільки їхня інтеграція у промисловість і комунальний сектор може бути підсилена цифровими інструментами для відстеження та прогнозування показників споживання, що допомагає формувати ефективні бізнес-моделі та прискорювати повоєнну модернізацію. У результаті дослідження встановлено, що синергія енергоефективності та Індустрії 4.0 виступає каталізатором сталого розвитку, оскільки дозволяє одночасно знижувати витрати на енергоносії, скорочувати викиди парникових газів і відкривати нові напрями залучення інвестицій. Обґрунтовано, що впровадження технологій 5G, супутникового інтернету, безпілотних систем і рішень на основі віртуальної і доповненої реальності доповнює цифровий потенціал, особливо в умовах масштабних руйнувань інфраструктури та необхідності швидкого відновлення. Побудовано матрицю впливу Індустрії 4.0 на енергоефективність та сталий розвиток, що є практичним інструментом для аналізу та пріоритизації технологій, які мають найбільший потенціал для розвитку енергоефективності, і дозволяє визначити стратегічні напрями для інвестицій. Перспективами подальших досліджень є розробка інтегрованих моделей впровадження енергоефективних рішень із максимальним застосуванням цифрових технологій і визначення оптимальної взаємодії між державним і приватним секторами. На концептуальному рівні доцільно поглибити дослідження економічної ефективності застосування інструментів Індустрії 4.0, а також механізмів їх стимулювання через відповідні законодавчі та фінансові інструменти. Здійснення таких заходів дасть можливість посилити національну конкурентоспроможність, підвищити соціальну та екологічну стійкість, а також прискорити інтеграцію України у глобальні процеси формування «розумної» економіки та забезпечення енергетичної безпеки.

**Ключові слова:** енергоефективність, Індустрія 4.0, післявоєнна модернізація, цифрові технології, сталий розвиток, енергетична безпека.

**DOI:** <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-4-108-116>

**Рис.:** 4. **Табл.:** 5. **Бібл.:** 16.

**Сидоренко Олександр Михайлович** – кандидат економічних наук, доцент кафедри міжнародного менеджменту, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

**E-mail:** o.sydorenko@ukr.net

UDC 330.341.1(477):620.9:004.9  
JEL Classification: O32; O33; Q43; Q55

## Sydorenko O. M. Synergy of Energy Efficiency and Industry 4.0 in the Post-War Modernization of Ukraine

The article is aimed at substantiating the strategic importance and practical mechanisms of synergy between energy efficiency and Industry 4.0 in the post-war modernization of Ukraine. The prospects for the use of AI technologies, cloud computing, big data, industrial Internet of Things, cyber-physical systems and their impact on reducing energy consumption, improving performance indicators and increasing the level of energy security are considered. It is proved that the combination of energy-efficient solutions with digital platforms and resource management systems contributes to the formation of transparent and reliable production processes, which are characterized by a noticeable reduction in negative impact on the environment. The importance of the transition to renewable energy sources is emphasized, as their integration into industry and the utility sector can be strengthened by digital tools for tracking and forecasting consumption indicators, which helps to shape efficient business models and accelerate post-war modernization. As a result of the study, it is found that the synergy of energy efficiency and Industry 4.0 acts as a catalyst for sustainable development, as it allows you to simultaneously reduce energy costs, limit greenhouse gas emissions and open up new areas of attracting investments. It is substantiated that the introduction of 5G technologies, satellite Internet, unmanned systems and solutions based on virtual and augmented reality complements the digital potential, especially in the context of large-scale infrastructure destruction and the need for rapid recovery. A matrix of the impact of Industry 4.0 on energy efficiency and sustainable development is built, proposing a practical tool for analyzing and prioritizing technologies that have the biggest potential for the development of energy efficiency, and allowing for determining strategic directions for investments. Prospects for further research are the development of integrated models for the implementation of energy-efficient solutions with the maximum use of digital technologies and the determination of optimal interaction between the public and private sectors. At the conceptual level, it is advisable to deepen the study of the economic efficiency of the use of Industry 4.0 tools, as well as the mechanisms for their stimulation through the relevant legislative and financial instruments. The implementation of such measures will make it possible to strengthen national competitiveness, increase social and environmental sustainability, as well as accelerate Ukraine's integration into the global processes of forming a smart economy and ensuring energy security.

**Keywords:** energy efficiency, Industry 4.0, post-war modernization, digital technologies, sustainable development, energy security.

**Fig.:** 4. **Tabl.:** 5. **Bibl.:** 16.

**Sydorenko Oleksandr M.** – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor of the Department of International Management, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Berestejskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

**E-mail:** o.sydorenko@ukr.net

**Вступ.** Необхідність відновлення економіки України в умовах війни та адаптація до глобальних викликів сталого розвитку вимагає ґрунтовних напрацювань щодо підвищення енергоефективності з імплементацією передових досягнень Індустрії 4.0. Руїнування енергетичної інфраструктури внаслідок воєнних дій вимагає впровадження інноваційних технологій для відновлення та модернізації енергетичного сектора. Індустрія 4.0 відкриває широкі можливості для зниження енергоспоживання, підвищення ефективності виробництва та зменшення викидів парникових газів. Водночас розвиток відновлюваних джерел енергії у поєднанні з цифровими інструментами сприяє досягненню кліматичної нейтральності та енергетичної безпеки. Крім того, інтеграція енергоефективних технологій у канві Індустрії 4.0 є важливим інструментом для зміцнення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств та забезпечення їхнього сталого розвитку у післявоєнний період. Таким чином, синергія енергоефективності та Індустрії 4.0 є стратегічним напрямом формування нової моделі української економіки, здатної відповідати викликам сучасного світу.

Останні наукові напрацювання за напрям підвищення енергоефективності крізь призму Індустрії 4.0 акцентують увагу на необхідності їх синергії як ключового чинника сталого розвитку. Однак питання післявоєнної імплементації є малодослідженим, що тільки підсилює актуальність дослідження. Так, у дослідженні [1] розглядається вплив «теалових організацій» (гнучкі компанії, орієнтовані на інновації) на підвищення енергоефективності, де основними атрибутами є інновації, технології та екологічна стійкість, що дозволяє досягати кліматичної нейтральності у контексті Green Deal. Автори Чен М. та ін. [2] звертають увагу на необхідність структурних змін в економіці для досягнення енергоефективності, наголошуючи на проблемах, пов'язаних із тіньовою економікою, яка ускладнює впровадження інноваційних рішень у країнах, що розвиваються. Нота Г. та його колеги [3] пропонують практичний підхід до оптимізації енергоспоживання у виробничих процесах через аналіз загальної ефективності обладнання (ОЕЕ), підкреслюючи важливість використання кіберфізичних систем та IoT для виявлення втрат енергії у реальному часі. У роботі Віанні В., Фрейтаса Р. [4] та інших проведено бібліометричний аналіз технологій Індустрії 4.0, таких як Великі Дані, машинне навчання, Штучний Інтелект та хмарні обчислення, що сприяють підвищенню енергоефективності у різних секторах промисловості. Цікавим є дослідження Тан Чинг Нг, Мортеза Г. [5], яке зосереджене на розробці інтерпретаційної структурної моделі (ISM) енергетичної сталості, яка використовується для вивчення взаємозв'язків і ієрархії функцій Індустрії 4.0, що сприяють енергетичній сталості. Дослідження Тимошенко М. [6] та ін. зосереджене на моделюванні енергетичних сценаріїв для країн, що розвиваються, з акцентом на інтеграції відновлюваних джерел

енергії та цифрових технологій, які забезпечують стабільність енергетичної системи. Також Лук'яненко Д. та інші [6] вказують на необхідність інтеграції цифрових інструментів в енергетичний сектор для підвищення конкурентоспроможності України, підкреслюючи важливість міжнародного співробітництва та залучення іноземних інвестицій.

Проведений аналіз наукового доробку свідчить про зростаючий інтерес дослідників до інтеграції технологій Індустрії 4.0 у енергоефективні рішення, що сприятиме створенню стійких енергетичних та економічних систем. Такі роботи формують наукове підґрунтя для напрацювання ефективних рішень у післявоєнній модернізації України.

**Мета статті** полягає в обґрунтуванні стратегічної важливості та практичних механізмів синергії енергоефективності та Індустрії 4.0 у післявоєнній модернізації України.

#### **Викладення основних результатів дослідження.**

Сучасні виклики, пов'язані з війною, глобальними кліматичними змінами та необхідністю післявоєнного відновлення економіки України, вимагають пошуку інноваційних підходів до модернізації енергетичного сектору. Енергоефективність, яка вже визнана ключовим фактором сталого розвитку, у поєднанні з технологіями Індустрії 4.0 створює синергетичний ефект, який дозволяє одночасно зменшувати енергоспоживання, скорочувати викиди парникових газів та підвищувати продуктивність підприємств [5; 8]. Індустрія 4.0 відкриває широкі можливості для цифровізації виробничих процесів, впровадження Інтернету речей (IoT) в тому числі індустріального Інтернету речей (IIoT), кіберфізичних систем, ШІ та Великих Даних, що дозволяє створювати «розумні фабрики» (smart factory) та оптимізувати управління енергоресурсами у реальному часі [5; 9; 10]. Ці інновації сприяють побудові енергоефективної економіки, що є критично важливим для післявоєнної модернізації України, зважаючи на значні руїнування інфраструктури та підвищення залежності від імпорту енергоресурсів [6; 8]. Водночас розвиток енергоефективності відповідає глобальним цілям сталого розвитку, визначеним ООН, зокрема SDG 7 (доступна та чиста енергія) та SDG 9 (інновації та інфраструктура). У контексті України, інтеграція технологій Індустрії 4.0 є важливим інструментом для створення нової економічної моделі, яка забезпечує енергетичну безпеку, конкурентоспроможність та екологічну сталість [2; 6].

На сьогодні енергоефективність є одним із ключових елементів сталого розвитку, що визначає здатність економічних систем мінімізувати енергоспоживання, одночасно забезпечуючи високу продуктивність та екологічну безпеку. У сучасних умовах досягти енергоефективності можливо через оптимізацію виробничих процесів, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та впровадження цифрових технологій для моніторингу та управління енергетикою

[8; 9]. Визначено, що основними підходами до покращення енергоефективності є:

- впровадження енергоменеджменту, який базується на аналізі витрат енергії та їх мінімізації;
- застосування IoT для моніторингу енергоспоживання у реальному часі;
- інтеграція ШІ для прогнозування та оптимізації енергетичних витрат [3; 9].

Інтернет речей забезпечує можливість моніторингу енергоспоживання у реальному часі, ідентифікуючи надмірні витрати енергії, що дозволяє не лише знижувати витрати, але й адаптувати процеси до зміни попиту. IoT також є основою для смарт-мереж, які інтегрують відновлювані джерела енергії, забезпечуючи стабільність енергетичних систем [7; 9; 10].

Кіберфізичні системи (cyber-physical system, CPS) є ключовим елементом «розумних фабрик», який забезпечує автоматизацію виробничих процесів, оптимізуючи роботу обладнання та зменшення витрат енергії. CPS дозволяють інтегрувати дані від IoT-сенсорів і використовувати їх для прийняття автоматизованих рішень у реальному часі. Системи такого типу не лише підвищують енергоефективність, але й забезпечують стабільність виробничих процесів навіть у волатильних умовах. Наприклад, у німецькому автомобільному секторі застосування CPS дозволило зменшити енерговитрати на 15 % за рахунок оптимізації циклів виробництва [9; 10].

Великі Дані, машинне навчання та ШІ дозволяють аналізувати та прогнозувати критично важливі аспекти функціонування енергетичних систем майбутнього. Великі Дані і машинне навчання дозволяють аналізувати патерни енергоспоживання, визначати пікові навантаження та пропонувати рішення для їх мінімізації. Водночас ШІ забезпечує автоматизовану оптимізацію процесів, прогнозуючи майбутні потреби у споживанні енергії, адаптуючи до них наявні можливості інфраструктури [9].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, стає можливою завдяки смарт-мережам і хмарним обчисленням, які забезпечують стабільність і ефективність роботи енергосистем, знижую-

чи залежність від викопного палива. Використання смарт-мереж також дозволяє знизити витрати на інтеграцію відновлюваних джерел у загальну енергосистему, роблячи їх більш привабливими для інвестицій [11].

Зазначимо, що економічний ефект від впровадження енергоефективних технологій значний. Зниження витрат на енергоресурси досягає 20 %, водночас автоматизація та цифровізація виробництва підвищують продуктивність на 15–30 %. Висока інвестиційна активність за цими напрямками є ключовим аспектом для країн, що розвиваються, зокрема України, оскільки сприятиме формуванню нових бізнес-моделей, таких як «продукт як послуга», які забезпечують ефективність споживання енергії на кожному етапі виробничого циклу [2].

Враховуючи всі особливості зазначених технологій, варто зазначити, що кожна з них відіграє особливу роль у кожному елементі енергоефективності (табл. 1).

Відповідно до оцінок Exponential Climate Action Roadmap [12], цифрові технології можуть сприяти зниженню глобальних викидів парникових газів до 15 % до 2030 року, що становить третину необхідного скорочення, та сприяють досягненню кліматичної нейтральності. На рис. 1 можна побачити реалізоване та заплановане (пунктирна лінія) скорочення викидів парникових газів порівняно з 1990 роком по Україні та країнах ЄС.

Видно, що з 1990 по 2020 рік найбільше скорочення викидів парникових газів було зафіксовано саме в Україні. Причинами цього є занепад промисловості після розпаду СРСР, глибокі економічні кризи та військові дії на Донбасі. На 2030 рік національна мета зі скорочення викидів парникових газів становить 34,8 % від обсягу 1990 року [13]. Зазначимо, що повномасштабне вторгнення призвело до суттєвих руйнувань у промислових районах України, що вплине на скорочення викидів, натомість масштабне використання дизельної техніки, постійні пожежі, підриви від мінування нівелюють цей ефект, що вимагатиме додаткових заходів (гуманітарне розмінування, заліснення, Direct Air Capture [14], BECCS [15]). Водночас визначена на національному рівні мета на 2030 рік оцінюється міжнародними дослідниками як недостатня, а тому суперечить

Таблиця 1

Взаємозв'язок між елементами енергоефективності та технологіями Індустрії 4.0

Елемент енергоефективності	Технологія Індустрії 4.0	Ефект	Приклади
Моніторинг енергоспоживання	IoT	Моніторинг у реальному часі, зниження витрат енергії	Смарт-лічильники у виробничих процесах
Менеджмент процесів	Кіберфізичні системи (CPS)	Оптимізація витрат та продуктивності	Оптимізація промислового обладнання
Аналітика даних	Великі дані та штучний інтелект	Прогнозування та адаптація до змін у споживанні енергії, оптимізація процесів	Аналітика енергоспоживання для мінімізації витрат, використання AI у промислових системах
Інтеграція відновлюваних джерел	Хмарні обчислення, смарт-мережі	Стабільність енергомережі	Управління сонячними та вітровими генераторами

Джерело: узагальнено автором на основі [3; 5; 6; 8–11]

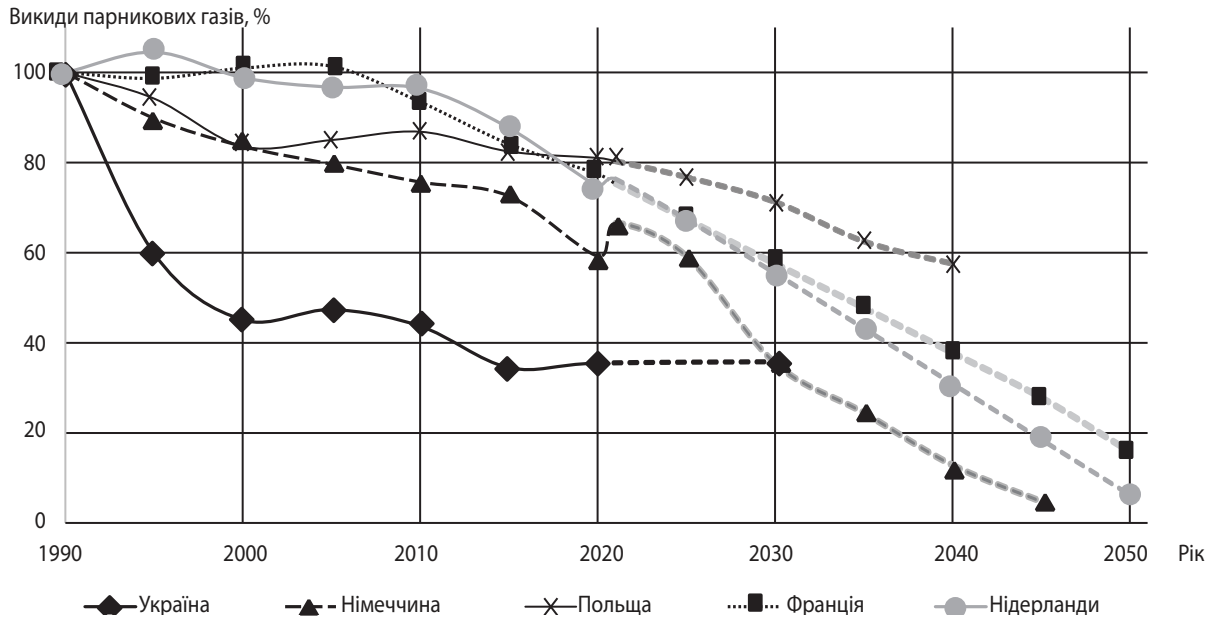


Рис. 1. Відносне скорочення викидів парникових газів в Україні та країнах ЄС

Джерело: [13]

Парижській кліматичній угоді. Якщо, окрім імплементації змін до чинного законодавства, не відбудуться структурні зміни в енергетиці та економіці, припинення бойових дій, значного подальшого скорочення не відбудеться. Такий порядок речей тільки підсилює актуальність синергії технологій Індустрії 4.0 та енергоефективності, оскільки це дозволить форсувати необхідну модернізацію.

Водночас виклики впровадження синергії енергоефективності та Індустрії 4.0 включають високу вартість початкових інвестицій, низький рівень цифрової грамотності

та залежність від викопного палива (табл. 2). Однак їх можливо подолати через активізацію міжнародного співробітництва, впровадження освітніх програм та залучення міжнародних грантів. Наприклад, ініціативи у рамках European Green Deal можуть стати основою для створення політик, які стимулюватимуть інтеграцію енергоефективних рішень та цифрових технологій. Водночас впровадження відповідних ініціатив щодо посилення синергії енергоефективності та Індустрії 4.0 відкриває і ряд можливостей, які мають як екологічний так і економічний ефект [8].

Таблиця 2

**Виклики і можливості посилення синергії енергоефективності та Індустрії 4.0**

Категорія	Виклики	Можливості
Енергетична система	Амортизація, поломки, руйнування інфраструктури	Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)
Фінанси	Високі інвестиційні бар'єри	Залучення міжнародних грантів та іншої донорської допомоги
Кадровий потенціал	Недостатня цифрова грамотність працівників	Розвиток освітніх програм
Зовнішня залежність	Імпорт енергоресурсів	Розширення внутрішніх джерел енергії

Джерело: узагальнено автором [2–6]

За результатами аналізу ключових технологій Індустрії 4.0, які можуть посилити енергоефективність, побудовано матрицю впливу «технології vs ефект» яка демонструє взаємозв'язок між ключовими технологіями Індустрії 4.0 та їх впливом на основні аспекти енергоефективності і сталого розвитку (рис. 2). У матриці враховані ключові технології, такі як Інтернет речей (IoT), кіберфізичні системи (CPS), Штучний Інтелект (AI), Великі Дані, смарт-мережі та хмарні обчислення. Вплив оцінювався за п'ятьма напрямками: енергоефективність, зменшення ви-

кидів, зниження витрат, оптимізація процесів та інтеграція відновлюваних джерел енергії. Для побудови матриці використовувався метод експертної оцінки з такою кількісною шкалою (1–5), де 1 означає низький рівень впливу, а 5 – високий. Дані, отримані з наукових праць та експертного аналізу сучасних технологій, були узагальнені та інтерпретовані для відображення їхнього реального потенціалу у впровадженні енергоефективних рішень. Візуалізація реалізована у вигляді теплової карти з використанням градації відтінків, що дозволяє чітко відобразити рівень

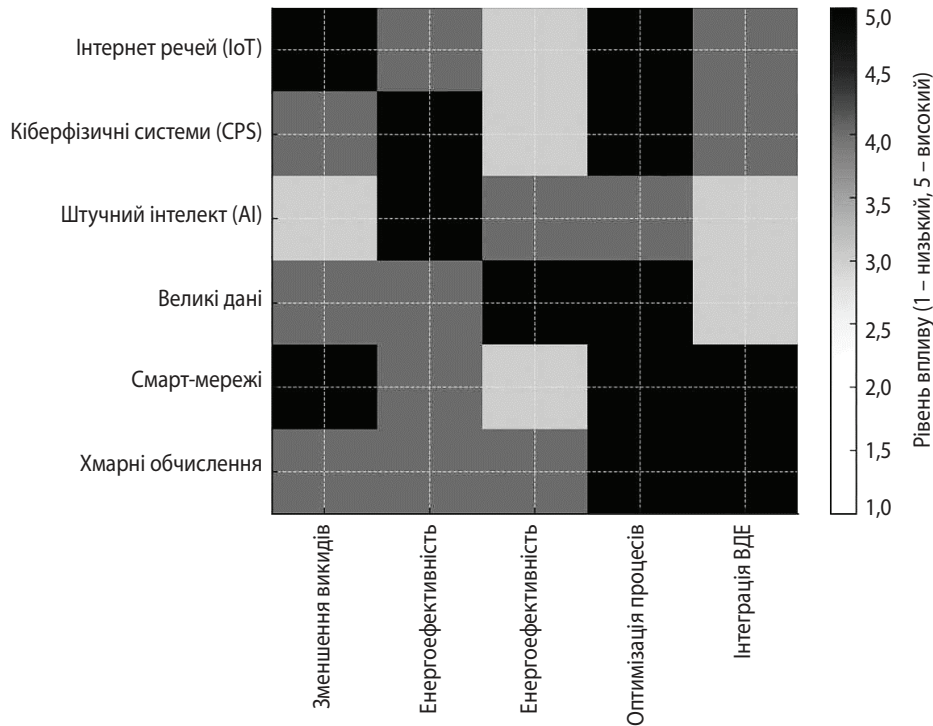


Рис. 2. Матриця впливу технологій Індустрії 4.0 на енергоефективність і сталий розвиток

Джерело: побудовано автором засобами Python (пакет Matplotlib)

впливу кожної технології на окремий аспект сталого розвитку. Матриця слугує практичним інструментом для аналізу та пріоритизації технологій Індустрії 4.0, які мають найбільший потенціал для розвитку енергоефективності, та дозволяє визначити стратегічні напрями для інвестицій і досліджень.

Важливим аспектом дослідження є систематизація світового досвіду впровадження технологій Індустрії 4.0 у сфері енергоефективності для успішної адаптації най-

кращих практик до українських реалій. Досліджені кейси Німеччини, Нідерландів, Франції та інших країн доводять, що технологічна модернізація енергетики країни підвищує енергетичну безпеку, сприяє енергоефективності та досягненню цілей сталого розвитку (табл. 3).

Враховання передового досвіду є критично важливим для України, яка знаходиться у складних умовах воєнного часу, де ефективність використання енергетичних ресурсів має вирішальне значення.

Таблиця 3

## Світовий досвід синергії енергоефективності та Індустрії 4.0

Країна / Регіон	Приклад впровадження	Технології	Очікуваний ефект
Німеччина	Розвиток «розумних фабрик»	CPS, IoT, автоматизація	Оптимізація виробництва, зниження енергоспоживання
Нідерланди	Використання смарт-мереж для інтеграції відновлюваної енергії	IoT, хмарні обчислення	Підвищення стабільності енергосистем, скорочення залежності від викопного палива
Франція	Перехід до бізнес-моделей «продукт як послуга»	Великі Дані, AI	Скорочення викидів, оптимізація ресурсів у життєвому циклі продуктів
США	Впровадження систем моніторингу енергоспоживання у промисловості	IoT, аналітика Великих Даней	Ідентифікація та зниження енерговитрат у реальному часі
Китай	Масове використання відновлюваної енергетики з інтеграцією цифрових рішень	Смарт-мережі, AI	Забезпечення стабільності енергосистем, зменшення викидів CO <sub>2</sub>
Польща	Модернізація виробництва через автоматизацію	CPS, IoT	Зниження витрат на енергоресурси, підвищення продуктивності
Японія	Використання робототехніки у виробництві для підвищення енергоефективності	Робототехніка, AI	Скорочення втрат енергії, автоматизація складних процесів

Джерело: узагальнено автором на основі [1; 2; 6; 8; 10]

Імплементція найкращих світових практик потребує розуміння стану та тенденцій підвищення енергоефективності в Україні. Зазначимо, що після повномасштабного вторгнення у 2022 році моніторинг стану ключових показників в Україні призупинено міжнародними організаціями, однак аналіз даних до 2021 року дозволить окреслити загальні тенденції вітчизняного рівня енергое-

фективності. Класично для оцінки рівня енергоефективності країни використовують комплекс показників, які дозволяють проаналізувати ефективність використання енергоресурсів, рівень електрифікації економіки, залежність від викопного палива та відновлюваних джерел, а також енергетичну самодостатність відповідної юрисдикції (табл. 4).

Таблиця 4

Ключові показники енергоефективності

Показник	Сутність	Характеристика значення
Енергоємність	Відношення обсягу спожитої енергії до виробленого ВВП, вимірюється в МДж/долар	Низьке значення свідчить про ефективне використання енергоресурсів, високе – про значні втрати або енергоємність виробництва
Частка ВДЕ у виробництві енергії	Частка енергії, отриманої з відновлюваних джерел (сонячна, вітрова, гідроенергія тощо) у загальному обсязі виробництва	Високе значення демонструє екологічну стійкість, сприяє зменшенню викидів CO <sub>2</sub> та залежності від викопного палива
Частка викопних джерел енергії в енергопостачанні	Частка енергії, отриманої з викопних джерел (вугілля, нафта, природний газ), у загальному енергопостачанні країни	Низьке значення свідчить про перехід на більш екологічні та стійкі джерела енергії
Енергетична самодостатність	Частка виробництва енергії всередині країни та її загальним енергоспоживанням	Високе значення забезпечує енергетичну незалежність країни, низьке – вказує на залежність від імпорту енергоносіїв
Частка електроенергії у загальному кінцевому споживанні	Частка електроенергії у загальному обсязі енергоспоживання кінцевими споживачами	Високе значення відображає високий рівень електрифікації, що може сприяти енергоефективності та екологічності економіки

Джерело: узагальнено автором [16]

Як видно з рис. 3, за період 2001–2021 рр. показник енергоємності знизився на 52,6 %, що свідчить про поступове покращення енергоефективності, але все ще залишається суттєво вищим за середньосвітовий рівень (7,611 проти 4,685 МДж/долар у 2021 році). Основними причинами високої енергоємності є спадщина енергоємної радянської промисловості, неефективна інфраструктура та залежність від викопного палива. Суттєве зниження показника досягнуто завдяки структурним змінам в економіці, модернізації енергетичного сектора, впровадженню програм енергозбе-

реження, скороченню виробництва у важкій промисловості долучення до міжнародних стандартів і угод.

Щодо інших показників енергоефективності, то протягом 2000–2021 рр. показники енергетичного сектора України демонструють змішані тенденції (рис. 4).

Частка ВДЕ у виробництві енергії поступово зростала з 6,6 % у 2000 році до 13,0 % у 2021 році, що свідчить про певний прогрес у переході до зеленої енергетики, особливо після 2019 року. Водночас частка викопних джерел енергії в загальному енергопостачанні зменшилася з 84,3 % лише

Рівень енергоємності, МДж / ВВП

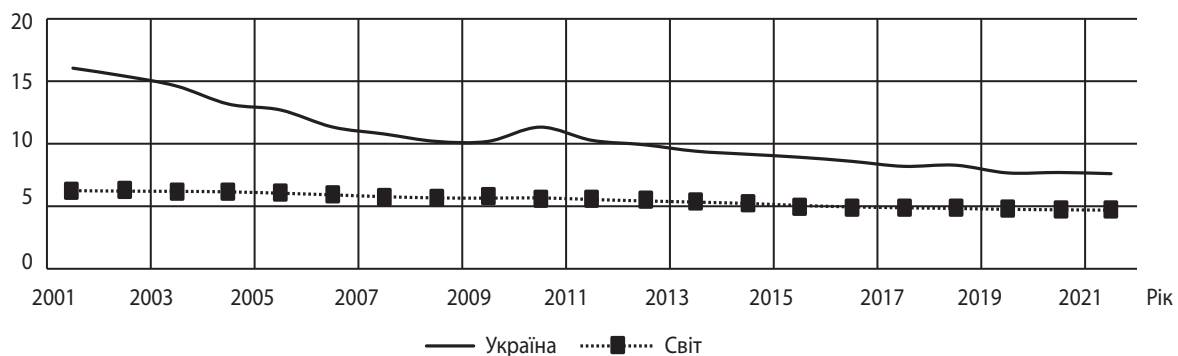


Рис. 3. Рівень енергоємності України та Світу

Джерело: [16]

Показники енергоефективності України, %



Рис. 4. Показники енергоефективності України

Джерело: [16]

до 67,8 % і є високою, що вказує на значну залежність від традиційних енергоресурсів. Показник енергетичної самодостатності є волатильним, що пов'язано з економічними спадами, зменшенням внутрішнього виробництва енергії та зростанням потреб в імпорті. Позитивна, однак повільна динаміка вказує на ініціативи уряду України з інтеграції енергоефективних технологій, а також сигналізує про виклики, пов'язані з залежністю від викопного палива та складнощами забезпечення енергетичної незалежності. Ситуація погіршується постійними обстрілами енергетичної інфраструктури, окупацією територій з покладами енергоресурсів та сезонністю підвищеного споживання енергії. Для покращення ситуації необхідне посилення інвестицій у ВДЕ, модернізація енергетичної інфраструктури та збіль-

шення частки електроенергії у споживанні через синергію енергетичного сектора та технологій Індустрії 4.0.

Комплексний аналіз основних технологій Індустрії 4.0, які можуть бути імплементовано у вітчизняну практику варто доповнити підсилюючими, додатковими технологіями які можуть суттєво посилити синергію енергоефективності та Індустрії 4.0 у післявоєнний період в Україні (табл. 5).

Швидкісний інтернет, особливо мережі 5G, відіграють важливу роль у цифровізації виробничих і енергетичних процесів завдяки високій пропускну здатності (до 10 Гбіт/с) та низькій затримці передачі даних (до 1 мілісекунди). Також супутниковий інтернет (наприклад Starlink) є важливим компонентом забезпечення стабільного

Таблиця 5

## Додаткові технології підвищення енергоефективності в Україні

Технологія	Основні можливості	Ключові переваги
Швидкісний інтернет (5G)	Моніторинг та управління енергетичною інфраструктурою у реальному часі, оптимізація енергоспоживання	Висока пропускну здатність, низька затримка передачі даних
Безпілотні системи	Моніторинг стану енергетичних об'єктів, оптимізація логістики	Швидке реагування на пошкодження, зниження витрат
Супутниковий інтернет	Забезпечення стабільного зв'язку у віддалених регіонах, підтримка IoT-рішень	Безперебійна робота систем, незалежність від наземної інфраструктури
VR/AR	Моделювання сценаріїв, дистанційне обслуговування, підготовка персоналу	Оптимізація процесів, підвищення продуктивності
Блокчейн	Прозорий моніторинг енергетичних транзакцій, децентралізоване управління смарт-контрактами	Підвищення прозорості, безпеки даних, забезпечення надійності у роботі смарт-мереж

Джерело: узагальнено автором [1; 6–10]

і швидкого зв'язку у віддалених і постраждалих від війни регіонах зі слабким чи відсутнім мобільним покриттям. Як і супутниковий, мобільний інтернет 5G спроможний забезпечувати швидкісний цифровий моніторинг і управління енергетичною інфраструктурою через IoT, смарт-мережі та кіберфізичні системи в режимі реального часу [7; 8; 9]. Водночас безпілотні системи ефективні для фізичного моніторингу та управління енергетичними об'єктами. Вони можуть бути використані для обстеження відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, з метою виявлення пошкоджень і оптимізації їхньої роботи. Як показав досвід воєнних дій в Україні, дрони здатні підтримувати логістичні операції в умовах пошкодженої інфраструктури, сприяючи швидшому відновленню виробничих процесів і зниженню витрат [10].

Нові можливості для навчання і роботи персоналу в епоху Індустрії 4.0 відкриває технологія VR/AR, яка дозволяє моделювати і проводити управління складними промисловими процесами та візуалізувати дані. Наприклад, VR/AR продукти можуть розроблятися для моделювання енергетичних сценаріїв, оптимізації роботи енергосистем і швидкої підготовки фахівців у післявоєнний період. Водночас AR може допомагати дистанційно обслуговувати об'єкти енергетичної інфраструктури та підвищувати продуктивність працівників [1; 6].

У контексті підвищення енергоефективності блокчейн дозволяє впроваджувати смарт-контракти для автоматизації розрахунків за енергоресурси, інтеграції децентралізованих енергетичних систем та управління локальними енергетичними ринками. До прикладу, технологія може використовуватися для створення платформ «peer-to-peer» торгівлі енергією, де споживачі, які виробляють надлишкову енергію (наприклад, від сонячних панелей), можуть продавати її іншим користувачам безпосередньо через блокчейн, що сприяє більш ефективному використанню відновлюваних джерел енергії та зменшенню втрат у енергомережах.

Резюмуючи, впровадження підсилюючих технологій по типу безпілотних систем для обстеження інфраструктури, а також супутникових технологій, дозволяє зберігати операційну стабільність у критичних секторах енергетики. Таким чином, інтеграція передових рішень Індустрії 4.0 з урахуванням світового досвіду є важливим кроком у забезпеченні енергетичної стабільності України під час війни та у період післявоєнного відновлення.

**Висновок.** Доведено, що синергія енергоефективності та Індустрії 4.0 є ключовим фактором сталого розвитку України в умовах воєнного стану та післявоєнної модернізації. Ключові технології Індустрії 4.0 створюють нові можливості для оптимізації енергоспоживання, зниження витрат у енергомережах, інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищення продуктивності. Водночас підсилюючі технології, зокрема 5G, супутниковий інтернет, безпілотні системи, VR/AR та блокчейн, забезпечують критично важливу інфраструктуру, сприяючи прозорості, безпеці та гнучкості енергетичних систем.

За результатами аналізу світового досвіду підтверджено, що інтеграція енергозберігаючих технологій із цифровими інструментами є ефективним шляхом досягнення

кліматичних цілей і підвищення енергоефективності. Для України це особливо актуально в контексті модернізації промисловості, зменшення залежності від викопного палива та розвитку зеленої енергетики. Окрім зниження енергоемності економіки, технології Індустрії 4.0 створюють умови для більш раціонального використання ресурсів, зменшення викидів парникових газів та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Загалом каталізація синергії енергоефективності та Індустрії 4.0 в Україні має стати стратегічним пріоритетом державної політики, що забезпечить не лише підвищення конкурентоспроможності економіки і досягнення цілей сталого розвитку, але й сприятиме енергетичній безпеці та екологічній стійкості. Перспективами подальших досліджень у цьому напрямі є зосередження на глибокій оцінці впливу окремих технологій Індустрії 4.0 на енергоефективності, створенні економічно обґрунтованих моделей імплементації та адаптації світового досвіду до вітчизняних реалій.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Miśkiewicz R. and etc. Energy Efficiency in the Industry 4.0 Era: Attributes of Teal Organisations. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 20. P. 6776.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206776>
2. Chen M. and etc. Impact of technological innovation on energy efficiency in industry 4.0 era: Moderation of shadow economy in sustainable development. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 164. P. 120521.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120521>
3. Nota G. and etc. Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 16. P. 6631.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166631>
4. Vianna V., Celeste W., Freitas R. Energy efficiency in the context of Industry 4.0. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*. 2019. Vol. 6, No. 12. P. 1–16.  
DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.612.1>
5. Ng T., Ghobakhloo M. Energy sustainability and industry 4.0. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 463. P. 012090.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012090>
6. Тимошенко М. та ін. Вплив Індустрії 4.0 на моделювання сценаріїв енергетичного розвитку економік країн, що розвиваються. *Financial and credit activity problems of theory and practice*. 2023. Т. 1. № 48. С. 336–350.  
DOI: <https://doi.org/10.55643/fcapter.148.2023.3941>
7. Лук'яненко Д., Павловський Д., Сидоренко О. Цифровий імператив розвитку глобальної економіки. *Міжнародна економічна політика*. 2023. № 39. С. 7–26.  
DOI: <https://doi.org/10.33111/iep.2023.39.01>
8. Kenneth Ifeanyi Ibekwe and etc. Energy efficiency in industrial sectors: a review of technologies and policy measures. *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. No. 1. P. 169–184.  
DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i1.742>
9. Salonitis K. Manufacturing Energy Efficiency and Industry 4.0. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 5. P. 2268.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052268>



10. Shrouf F., Ordieres J., Miragliotta G. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, m. Selangor Darul Ehsan, Malaysia, 9–12 Dec. 2014. 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ieem.2014.7058728>

11. Arana-Landín G. and etc. The Contribution of Lean Management–Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 5. P. 2124.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052124>

12. Digital technology can cut global emissions by 15 %. Here's how // The World Economic Forum. URL: [http://www.weforum.org/stories/2019/01/why-digitalization-is-the-key-to-exponential-climate-action/?utm\\_source=chatgpt.com](http://www.weforum.org/stories/2019/01/why-digitalization-is-the-key-to-exponential-climate-action/?utm_source=chatgpt.com)

13. Mysak S., Shapoval S., Martynyak-Andrushko M. Analysis of greenhouse gas and pollutant emission reduction in Ukraine and European Union countries. *Energy engineering and control systems*. 2023. Vol. 9. No. 1. P. 1–8.

DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.01.001>

14. DOE Explains...Direct Air Capture // U.S. Department of Energy (DOE). URL: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsdirect-air-capture>

15. Bioenergy with Carbon Capture and Storage – Energy System – IEA // IEA. URL: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>

16. Energy End-uses and Efficiency Indicators Data Explorer – Data Tools – IEA // IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-end-uses-and-efficiency-indicators-data-explorer>

## REFERENCES

Arana-Landin, G. et al. "The Contribution of Lean Management-Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency". *Energies*, vol. 16, no. 5 (2023): 2124.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052124>

"Bioenergy with Carbon Capture and Storage - Energy System - IEA". IEA. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>

Chen, M. et al. "Impact of technological innovation on energy efficiency in industry 4.0 era: Moderation of shadow economy in sustainable development". *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 164 (2021): 120521.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120521>

"Digital technology can cut global emissions by 15 %. Here's how". The World Economic Forum. [http://www.weforum.org/stories/2019/01/why-digitalization-is-the-key-to-exponential-climate-action/?utm\\_source=chatgpt.com](http://www.weforum.org/stories/2019/01/why-digitalization-is-the-key-to-exponential-climate-action/?utm_source=chatgpt.com)

"DOE Explains Direct Air Capture". U.S. Department of Energy (DOE). <https://www.energy.gov/science/doe-explainsdirect-air-capture>

"Energy End-uses and Efficiency Indicators Data Explorer - Data Tools - IEA". IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-end-uses-and-efficiency-indicators-data-explorer>

Kenneth, I. I. et al. "Energy efficiency in industrial sectors: a review of technologies and policy measures". *Engineering Science & Technology Journal*, vol. 5, no. 1 (2024): 169-184.

DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i1.742>

Lukianenko, D., Pavlovskiy, D., and Sydorenko, O. "Tsyfrovyy imperativ rozvytku hlobalnoi ekonomiky" [The Digital Imperative for the Development of the Global Economy]. *Mizhnarodna ekonomichna polityka*, no. 39 (2023): 7-26.

DOI: <https://doi.org/10.33111/iep.2023.39.01>

Miskiewicz, R. et al. "Energy Efficiency in the Industry 4.0 Era: Attributes of Teal Organisations". *Energies*, vol. 14, no. 20 (2021): 6776.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206776>

Mysak, S., Shapoval, S., and Martynyak-Andrushko, M. "Analysis of greenhouse gas and pollutant emission reduction in Ukraine and European Union countries". *Energy engineering and control systems*, vol. 9, no. 1 (2023): 1-8.

DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.01.001>

Ng, T., and Ghobakhloo, M. "Energy sustainability and industry 4.0". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 463 (2020): 012090.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012090>

Nota, G. et al. "Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes". *Sustainability*, vol. 12, no. 16 (2020): 6631.

DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166631>

Shrouf, F., Ordieres, J., and Miragliotta, G. "Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm". *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Selangor Darul Ehsan, Malaysia, 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ieem.2014.7058728>

Salonitis, K. "Manufacturing Energy Efficiency and Industry 4.0". *Energies*, vol. 16, no. 5 (2023): 2268.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052268>

Tymoshenko, M. et al. "Vplyv Industrii 4.0 na modeliuvania stsenariiv enerhetychnoho rozvytku ekonomik krain, shcho rozvyvaiutsia" [The Influence of Industry 4.0 on the Modeling of Scenarios of Energy Development of the Economies of Developing Countries]. *Financial and credit activity problems of theory and practice*, vol. 1, no. 48 (2023): 336-350.

DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.48.2023.3941>

Vianna, V., Celeste, W., and Freitas, R. "Energy efficiency in the context of Industry 4.0". *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 6, no. 12 (2019): 1-16.

DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.612.1>

Стаття надійшла до редакції 03.12.2024 р.

Статтю прийнято до публікації 25.12.2024 р.