

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-106>

УДК 338.2

ОЦІНЮВАННЯ КРАЩИХ ПРАКТИК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ІНТЕГРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

EVALUATION OF BEST PRACTICES IN ENERGY STORAGE, ENERGY EFFICIENCY, AND INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Колосок Світлана Іванівнакандидат економічних наук, доцент,
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-9878>**Шимошенко Анастасія Олександрівна**студентка,
Сумський державний університет
ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-1846-0781>**Сагер Людмила Юріївна**кандидат економічних наук, доцент,
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5628-5477>**Kolosok Svitlana, Shymoshenko Anastasiia, Saher Liudmyla**
Sumy State University

Для подальшого інтегрування відновлюваних джерел енергії є необхідність у розвитку потужності зберігання енергії. Це питання набуває істотного значення серед країн, що прагнуть зменшити рівень негативних викидів та зберегти навколишнє природне середовище. Загострення енергетичної кризи, суспільні виклики, руйнування енергетичних об'єктів, виклики національної безпеки потребують трансформації економічної політики та імплементації оптимальні рішень, нових підходів та практик, а також різноманітних технологій для зберігання енергії та збільшення енергоефективності. Метою статті є дослідження та оцінка досвіду різних країн у сфері зберігання енергії, підвищення енергоефективності та інтегрування відновлювальних джерел енергії. У статті розглянута сучасні тенденції зберігання енергії та заходи з підвищення енергоефективності, висвітлено ключові виклики і перспективи для майбутнього розвитку енергетичного сектору.

Ключові слова: відновлюванні джерела енергії, економічна політика, енергоефективність, зберігання енергії, національна безпека.

Modern society faces the challenge of preserving and restoring the environment. Against the backdrop of ever-increasing energy demand and limited resources, finding innovative and efficient methods of integrating renewable energy sources is undoubtedly important. In this context, it is essential to pay attention to technological solutions and find new balanced practices that can consider most of the aspects necessary for society. Energy storage capacity must be developed appropriately to integrate renewable energy sources further. This issue is becoming increasingly important for countries seeking to reduce harmful emissions and preserve the environment. The aggravation of the energy crisis, social challenges, destruction of energy facilities, and national security challenges require the transformation of economic policy and the implementation of optimal solutions, new approaches and practices, as well as various technologies for energy storage and energy efficiency. The article aims to study and evaluate the experiences of different countries in energy storage, energy efficiency, and the integration of renewable energy sources. The article discusses current trends in energy storage and energy efficiency measures and highlights key challenges and prospects for the future development of the energy sector. Based on the material studied, it can be concluded that energy conservation plays a vital role in the global context. This article allowed us to explore key aspects of these processes and highlight the latest technological solutions for energy storage. The results of the work showed that countries with a high share of variable renewable generation are actively implementing

mechanisms to balance the power system and have significantly developed their energy potential through the use of renewable energy sources. In recent decades, significant developments have occurred in using renewable energy sources. Energy storage facilities can stabilize the grid while increasing the flexibility of the power system, thus playing a crucial role in integrating renewable energy sources.

Keywords: renewable energy sources, economic policy, energy efficiency, energy storage, national security.

Постановка проблеми. В останні десятиліття загострилися критично важливі проблеми зберігання енергії та раціонального використання ресурсів. Також сучасне суспільство стоїть перед викликом збереження та відновлення навколишнього середовища. При цьому також слід задовольнити потреби суспільства в енергетичних ресурсах та ефективному їх розподілі. На фоні постійного зростання потреб в енергії, а також обмеженості ресурсів, безумовно важливим є пошук інноваційних та ефективних методів інтегрування відновлюваних джерел енергії. У цьому контексті важливо звертати увагу не лише на технологічні рішення, а також знаходити нові збалансовані практики, що можуть врахувати більшість важливих для суспільства аспектів. Постає питання щодо оцінки кращих практик зберігання енергії, енергоефективності, інтегрування відновлювальних джерел енергії для формування зеленої економічної політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження енергетичного спрямування мають широке тематичне охоплення, від пошуку техніко-технологічних рішень оптимізації виробництва, передачі, зберігання та споживання енергії до удосконалення національної та міжнародної енергетичної політики. З урахуванням сучасних реалій актуальними є дослідження, у яких автори вивчають способи нівелювання негативних ефектів від нестабільності сонячної та вітрової енергії, що призводить до додаткових витрат та технічних складнощів під час інтеграції відновлюваних джерел до енергосистеми [1]. У дослідженні [2] ця проблема вивчається на прикладі гідроелектростанцій різної потужності. На основі подібних досліджень у праці [3] пропонується оптимізаційна модель розвитку електроенергетики, яка має викликати практичний інтерес у операторів систем розподілу під час планування застосування технологій зберігання енергії для розвитку відновлюваної енергетики на місцевому та регіональному рівнях, сприяючи розвитку гібридних енергетичних систем [2]. Однак автори даного дослідження не розглядають фінансово-економічні аспекти масштабування перспективних проектів інтеграції відновлюваної енергії до енергомережі, хоча протягом десятиліть наукові, політичні

та суспільні дискусії довкола цього питання не вщухають. У своїй роботі Кудря С. О., Кузнецов М. П. та Яценко Л. В. [4] наголошують на важливості формування економічного підґрунтя для розширення міжнародного співробітництва з розробок, впровадження та трансферу нової техніки і технологій шляхом створення пілотних та демонстраційних об'єктів за рахунок спільних інвестицій. Над пошуком практичних підходів до прискорення розвитку відновлюваної енергетики, окрім груп науковців, працюють приватні та міжнародні організації та компанії [5]. Все вищеведене обумовлює необхідність подальшого дослідження кращих практик у сфері енергетики та енергоефективності.

Формулювання цілей статті. Метою статті є дослідження та оцінка досвіду різних країн у сфері зберігання енергії, підвищення енергоефективності та інтегрування відновлювальних джерел енергії. Поглиблене вивчення та оцінка кращих практик у цих сферах може сприяти ефективнішому використанню ресурсів, зниженню енергетичних втрат і формуванню стійких та інноваційних енергетичних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні на усіх рівнях економіки та суспільства приділяється значна увага енергоефективності у сфері відновлюваної енергетики, оскільки вона має ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки, підвищенні доступності енергії та прискоренні переходу до використання чистої енергії. У ЄС в останні роки було ухвалено більш суворі правила для підвищення енергоефективності. Встановлено цільовий показник енергозбереження в ЄС, що зростає до 11,7% до 2030 року. Це повинно забезпечувати в середньому до 1,49% щорічного заощадження енергії країн ЄС [6; 7].

У 2023 році збільшення світової потужності у відновлюваній електроенергетиці досягло приблизно 507 ГВт, що майже на 50% більше, ніж у 2022 році. Завдяки безперервній політичній підтримці у сфері чистої енергії у понад 130 країнах світу, трансформуються глобальні тенденції економічного зростання. Всесвітнє прискорення відновлюваної енергетики у 2023 році було зумовлене в основному

щорічним зростанням ринку сонячної фотоелектричної (+116%) і вітрової (+66%) енергетики у КНР [6; 7]. Очікується, що у наступні 5 років збільшення потужності відновлювальних джерел енергії продовжуватиме зростати (рис. 1).

Оскільки витрати на виробництво відновлюваної енергії є нижчими, ніж для викопних і невикопних альтернатив у більшості країн, то зрозумілою є політика, що зосереджена на їх підтримку. Прогнозується, що до 2028 року кількість фотоелектричної та вітрової енергії зросте більш ніж удвічі порівняно до 2022 року, та досягне майже 710 ГВт. КНР генерує 56% світового зростання потужності відновлюваної електроенергії. Протягом 2023-2028 років прогнозується, що Китай розгорне майже у чотири рази більше відновлюваної потужності в енергетиці порівняно до ЄС, і у п'ять раз більше, – порівняно до США. Ці дві країни залишаться другим і третім найбільшими ринками зростання відновлюваної енергетики [6].

Зростаючий попит на вітрову та сонячну енергію вимагає ефективних рішень щодо фінансування установок зберігання енергії. За допомогою технологій накопичення енергії можна ефективно збалансувати генерацію

та піковий попит, максимізуючи використання відновлюваних ресурсів. Очікується, що КНР, США та Європа, будуть основними каталізаторами глобального зростання на ринку накопичувачів енергії, та інтегрують 84% нових установок у 2024 році [8]. Більшість країн світу, що інвестують у сучасну енергетику (рис. 2), мають потужні програми у сфері енергоефективності.

У 2023 році було інвестовано в енергетику близько 2,8 трлн доларів США. Понад 1,7 трлн доларів США пішло на чисту енергетику, у т.ч., відновлювану та атомну енергію, енергетичні мережі, установки зберігання, паливо з низьким рівнем викидів, підвищення ефективності та відновлювані джерела енергії та електрифікацію. Аналіз у роботі [8] підкреслив, що США є головним споживачем великомасштабних установок зберігання енергії у 2024 році.

Очікується, що загальний попит на установки зберігання енергії буде підтримувати стабільний темп зростання у 2024 році. Огляд вибраних технологій зберігання енергії наведено у таблиці 1.

Розв'язання проблем, пов'язаних із використанням вітрової та сонячної енергії, стало загальним завданням багатьох країн. В Україні

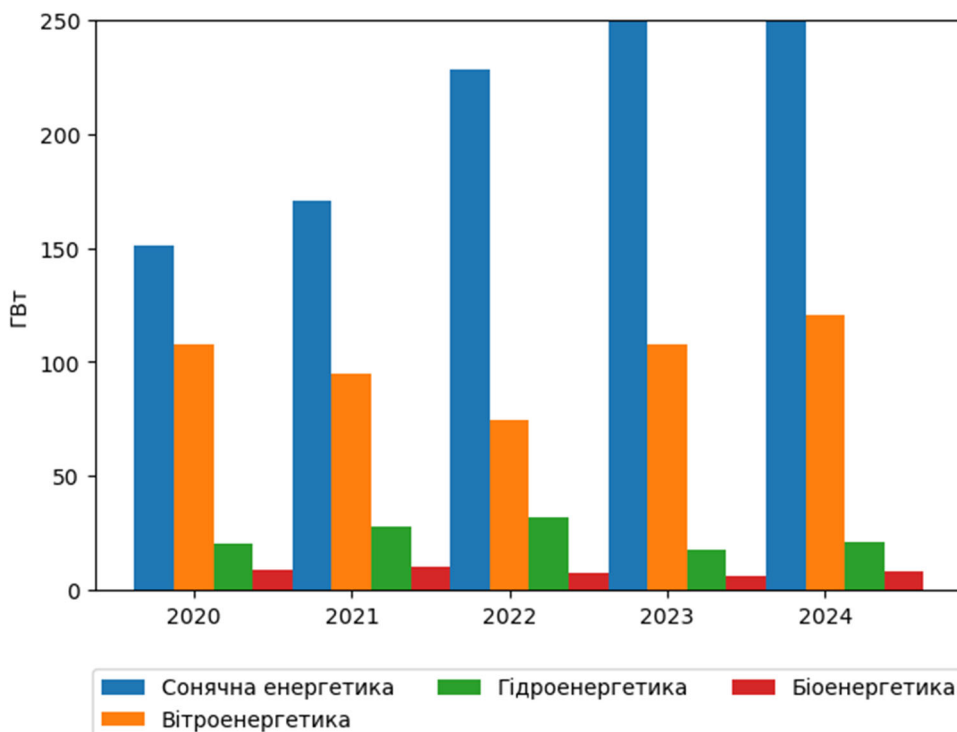


Рис. 1. Збільшення потужності відновлюваної енергетики за технологіями та сегментами, 2020–2024

Джерело: побудовано авторами за матеріалами IEA [6] і автори несуть виключну відповідальність за цю роботу

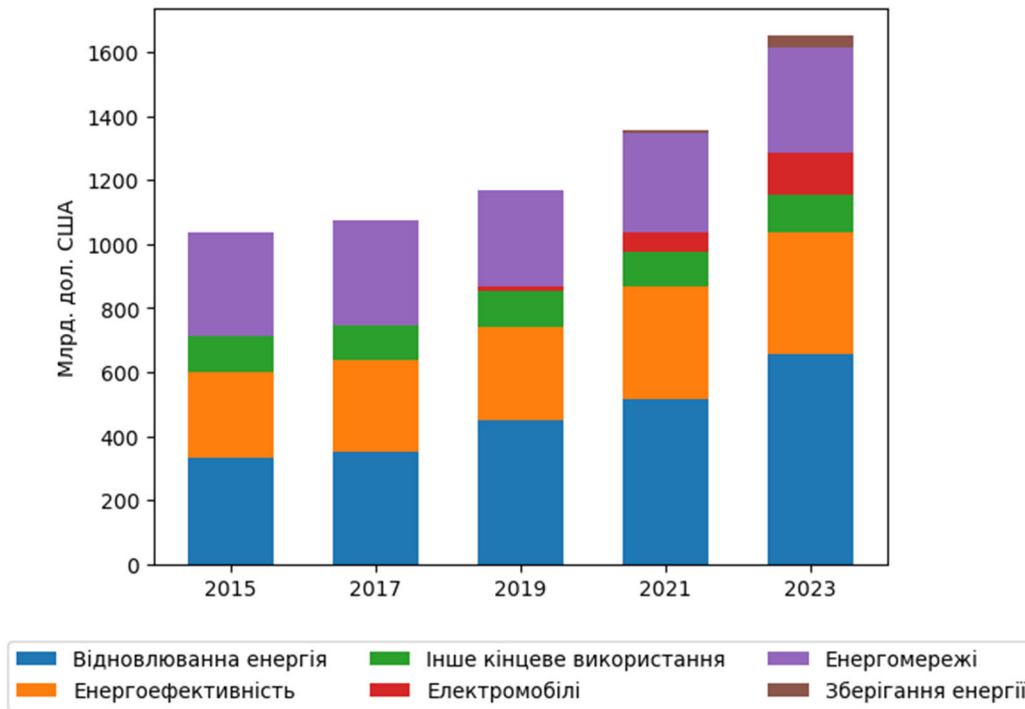


Рис. 2. Інвестиції у сфері зберігання енергії, енергоефективності та відновлювальних джерел енергії, млрд. дол. США

Джерело: побудовано авторами за матеріалами IEA [6] і автори несуть виключну відповідальність за цю роботу

Таблиця 1

Огляд ефективності технологій зберігання енергії

Технологія	Вартість енергетичної потужності	Ефективність
Літій-іонні акумулятори	320 \$/кВт	86%
Утилізація природного газу з уловлюванням та зберіганням вуглецю	-	48%
Акумуляування теплової енергії	-	52%
Накопичення енергії стисненого повітря	18–27 \$/кВт	55–65%
Змінна відновлювана енергія, перетворена та збережена у вигляді водню	1–14.8 \$/кВт	37%

Джерело: складено на основі [9]

планується, що до 2030 року генерація енергії з відновлюваних джерел збільшиться до 43894 ГВ·год. При цьому, для балансування енергетичного ринку будуть введені нові установки зберігання енергії в обсязі 656 МВт, на які потрібно буде витратити 502 млн. доларів США [10]. Проте треба визначити наскільки збалансованою буде така політика.

Розрахунок потреб до потужності та енергії зберігання для України на 2025–2030 роки можна розпочати з визначення пікового наван-

таження (P_{max}), що є найвищим рівнем споживання енергії за певний період (1):

$$P_{max} = \max(E_i), \tag{1}$$

де E_i – це споживання енергії за період i , ГВт·год.

До цього додається резерв потужності (M), що обчислюється як добуток пікового навантаження на коефіцієнт резерву для забезпечення буферу у випадках неочікуваних стрибків у споживанні (2):

$$M = P_{max} \times x, \tag{2}$$

де x – коефіцієнт потужності.

Наступним кроком є визначення загальної потужності генерації без викидів вуглецю ($G_{zero-carbon}$), яка розраховується як сума потужності всіх джерел, що не спричиняють викиди вуглецю (3):

$$G_{zero-carbon} = \sum_{j=1}^n G_j, \tag{3}$$

G_j – потужність j -го джерела генерації без викидів вуглецю у ГВт·год.

На основі цього дані обчислюється потужність зберігання ($P_{storage}$) шляхом віднімання потужності генерації без викидів вуглецю (4):

$$P_{storage} = P_{max} + M - G_{zero-carbon}, \tag{4}$$

Далі визначається загальний попит (D_{total}), який є сумою споживання енергії за усі періоди N (5):

$$D_{total} = \sum_{i=1}^N E_i, \tag{5}$$

Для оцінки загальної генерації без викидів вуглецю використовується добуток потужності генерації без викидів вуглецю та кількості годин у році.

Нарешті, енергія зберігання визначається як різниця між загальним попитом на енергію та загальною генерацією без викидів вуглецю. Такий підхід забезпечує розрахунок необхідної потужності і енергії зберігання для безперебійного постачання електроенергії.

Для виконання обчислень припустимо, що пікове навантаження в Україні становить 18.5 ГВт, а резерв потужності – 15% від пікового навантаження. Тоді використовуючи під-

хід до розрахунків вище, можливо спрогнозувати необхідну потребу в енергії зберігання для України (рис. 3).

З огляду на виконані розрахунки, введення нових установок зберігання енергії в обсязі 656 МВт (відповідно до Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року) видається буде недостатнім для балансування української енергосистеми та інтеграції запланованої нової потужності відновлюваних джерел енергії до 2030 року. Все вищезазначене показує необхідність більш активного розвитку балансуєчої потужності та установок зберігання енергії для переходу до екологічної безпечної енергетики в Україні та захищеності суспільства.

Висновки. На основі дослідженого матеріалу можна зробити висновок, що енергозбереження відіграє важливу роль у глобальному контексті. Ця стаття дозволила дослідити ключові аспекти цих процесів, висвітлити новітні технологічні рішення зберігання енергії. Результати роботи показали, що країни з високою часткою змінної відновлюваної генерації активно впроваджують механізми для балансування енергосистеми та значно розвинули свій енергетичний потенціал за рахунок використання відновлюваних джерел енергії. В останні десятиліття відбувається значний розвиток у сфері використання відновлюваних джерел енергії. Установки зберігання енергії можуть стабілізувати мережі, одночасно підвищуючи гнучкість енергетичної системи, таким чином

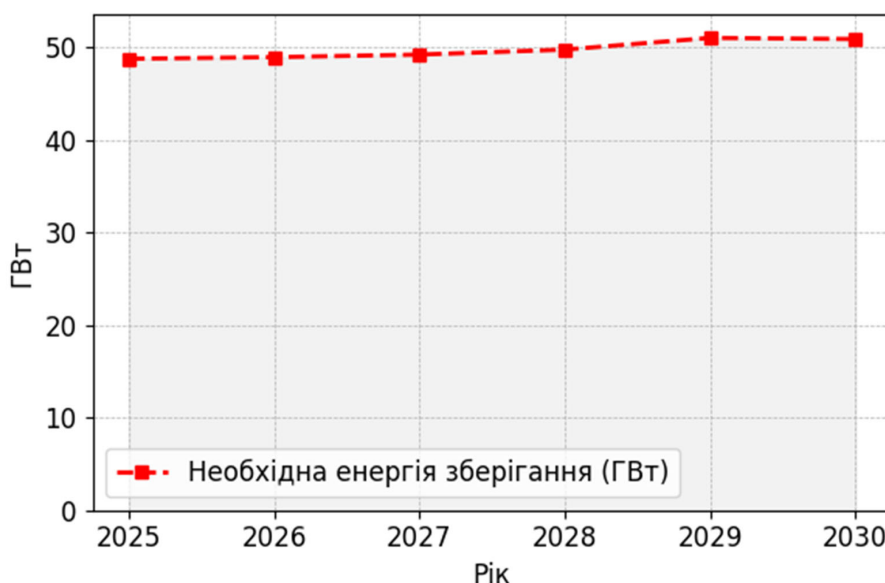


Рис. 3. Прогноз необхідної енергії зберігання (ГВт) в Україні

Джерело: побудовано на основі даних [10]

відіграючи вирішальну роль для інтеграції відновлюваних джерел енергії. У цілому, зазначений аналіз вказує на перспективність інтеграції відновлювальних джерел енергії, розвиток нових технологій зберігання та використання енергії, що є важливими ком-

понентами стратегії переходу до сталого енергетичного майбутнього та захищеності суспільства.

Фінансування роботи. Це дослідження було профінансовано Міністерством освіти і науки України (номер гранту: 0123U101920).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Worku M. Y. Recent Advances in Energy Storage Systems for Renewable Source Grid Integration: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2022. № 14(10). 5985. <https://doi.org/10.3390/su14105985>
2. Panda A., Dauda A. K., Chua H., Tan R. R., Aviso K. B. Recent advances in the integration of renewable energy sources and storage facilities with hybrid power systems. *Cleaner Engineering and Technology*. 2023. № 12. 100598. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100598>
3. Rabe M., Droždž W., Widera K., Łopatka A., Lezynski P., Streimikiene D., Bilan Y. Assessment of energy storage for energy strategies development on a regional scale. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022. № 27(1). P. 163–177. <http://dx.doi.org/10.46544/AMS.v27i1.12>
4. Кудря, С. О., Кузнецов, М. П., & Яценко, Л. В. Інституту відновлюваної енергетики НАН України – 20 років. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 4(75). С. 6–10. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).6-10](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).6-10)
5. Insights G. Energy Storage: Harnessing and Optimizing Power. *Gray Group International*. URL: <https://shorturl.at/WyYFT> (дата звернення: 14.02.2024).
6. IEA. *Renewables 2023*. IEA. Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (дата звернення: 14.02.2024).
7. IEA. *Electricity 2024*. IEA. Paris. URL: <https://shorturl.at/xFohf> (дата звернення: 14.02.2024).
8. EnergyTrend. *Anticipating a Surge: Global New Installations in 2024 Projected to Reach 71GW/167GWh, Marking a Robust Year-on-Year Growth of 36% and 43%*. URL: <https://shorturl.at/2HuiU> (дата звернення: 14.02.2024).
9. Selännemi, A., Hellström, M., & Björklund-Sänkiaho, M. Long-Duration Energy Storage. A Literature Review on the Link between Variable Renewable Energy Penetration and Market Creation. *Energies*. 2024. № 17(15). 3779. <https://doi.org/10.3390/en17153779>
10. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: розпорядження Кабінету міністрів України від 13.08.2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-p> (дата звернення: 09.09.2024).

REFERENCES:

1. Worku, M. Y. (2022). Recent Advances in Energy Storage Systems for Renewable Source Grid Integration: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 14(10), 5985. <https://doi.org/10.3390/su14105985>
2. Panda, A., Dauda, A. K., Chua, H., Tan, R. R., & Aviso, K. B. (2023). Recent advances in the integration of renewable energy sources and storage facilities with hybrid power systems. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100598. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100598>
3. Rabe, M., Droždž, W., Widera, K., Łopatka, A., Lezynski, P., Streimikiene, D., & Bilan, Y. (2022). Assessment of energy storage for energy strategies development on a regional scale. *Acta Montanistica Slovaca*, 27(1), 163–177. <http://dx.doi.org/10.46544/AMS.v27i1.12>
4. Kudrya, S., Kuznietsov, M., & Yatsenko, L. (2024). Institute of Renewable energy of the NAS of Ukraine – 20 years. *Vidnovluvana Energetika*, (4(75), 6-10. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).6-10](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).6-10)
5. Insights G. Energy Storage: Harnessing and Optimizing Power. *Gray Group International*. URL: <https://shorturl.at/WyYFT> (accessed February 14, 2024).
6. IEA. (2023). *Renewables 2023*. IEA. Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (accessed February 14, 2024).
7. IEA. (2024). *Electricity 2024*. IEA. Paris. URL: <https://shorturl.at/xFohf> (accessed February 14, 2024).
8. EnergyTrend (2023). *Anticipating a Surge: Global New Installations in 2024 Projected to Reach 71GW/167GWh, Marking a Robust Year-on-Year Growth of 36% and 43%*. URL: <https://shorturl.at/2HuiU> (accessed February 14, 2024).
9. Selännemi, A., Hellström, M., & Björklund-Sänkiaho, M. (2024). Long-Duration Energy Storage. A Literature Review on the Link between Variable Renewable Energy Penetration and Market Creation. *Energies*, 17(15), 3779. <https://doi.org/10.3390/en17153779>
10. National renewable energy action plan until 2030 and the action plan for its implementation: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine on 13.08.2024 p. № 761-p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-p> (accessed September 9, 2024).