

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВІД НЕТРАДИЦІЙНИХ ТА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Отримано 19 лют. 2025 р.; рекомендовано до публікації 27 черв. 2025 р.  
Доступно онлайн 30 черв. 2025 р.

**Коровушкін В. О.<sup>1</sup>, Босак А. В.<sup>2</sup>**

Автор для кореспонденції: Коровушкін Віталій,  
e-mail: vitalijkorovuskin@gmail.com

<sup>1</sup> аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-7571-7124>

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>

<sup>1, 2</sup>, Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», м. Київ,  
Україна

*У статті наведено та проаналізовано чинне законодавство в частині регулювання якості електроенергії. Акцентовано на дотриманні стандартів. Серед основних вимог*

*– допустимі відхилення напруги, обмеження гармонічних спотворень, контроль флікера та складових зворотної послідовності. Пристрої регулювання напруги мають підтримувати її рівень у межах 100–105 % номінального значення залежно від навантаження.*

*Було охарактеризовано особливості сонячної та вітрової енергетики. Так, сонячні системи (ФЕС) поділяються на мережеві, автономні й гібридні. Генерація залежить від інсоляції, кута падіння променів, ККД панелей та погоди. Типовий профіль виробництва має піки вдень, що не збігається з вечірніми максимумами споживання.*

*Вітрові установки класифікуються за типом осі ротора (HAWT, VAWT). Потужність вітрогенераторів визначають за формулою, що враховує швидкість вітру, густину повітря та коефіцієнт потужності  $C_p$  (0,2–0,5 для HAWT). Генерація відрізняється високою мінливістю, особливо в умовах нестабільних вітрів. Крім того, було запропоновано технології підвищення надійності, зокрема накопичувачі енергії, та проаналізовано способи прогнозування генерації.*

*Інтеграція ВДЕ вимагає адаптації інфраструктури до їхньої мінливості.*

**Ключові слова:** сонячна енергія, вітрова енергія, накопичувачі енергії, якість електроенергії, енергоефективність, генерування, енергосистема.

## IMPROVING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY FROM NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

Received Feb. 19, 2025; accepted Jun. 27, 2025  
Available online Jun. 30, 2025

**Korovushkin V.<sup>1</sup>, Bosak A.<sup>2</sup>**

Author for correspondence: Korovushkin Vitalii,  
e-mail: vitalijkorovuskin@gmail.com

<sup>1</sup> Postgraduate student

<https://orcid.org/0000-0002-7571-7124>

<sup>2</sup> Cand. of Sciens (Eng.), Assoc. Prof.

<https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>

<sup>1, 2</sup> National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
Kyiv, Ukraine

*The article presents and analyzes the current legislation in the field of electricity quality regulation. The emphasis is on compliance with standards. The main requirements include: permissible deviations of voltage, frequency, limitation of harmonic distortion, control of flicker and reverse sequence components. Voltage control devices should maintain its level within 100-105% of the nominal value depending on the load.*

*The features of solar and wind energy were characterized. Thus, solar systems (SPPs) are divided into grid-connected, stand-alone, and hybrid. Generation depends on insolation, angle of incidence, panel efficiency, and weather. A typical production profile has peaks during the day, which does not coincide with evening consumption peaks.*

*Wind turbines are classified by the type of rotor axis (HAWT, VAWT). The power of wind turbines is calculated using a formula that takes into account wind speed, air density and power factor  $C_p$  (0.2-0.5 for HAWT). Generation is highly variable, especially in unstable wind conditions.*

*In addition, technologies to improve reliability have been proposed, in particular: energy storage (lithium-ion batteries, gravity (GES) and pumped storage (PSH) systems, hydrogen storage).*

*The methods of generation forecasting are analyzed: sustainability models, physical models, machine learning and hybrid methods.*

*Integration of renewable energy sources requires infrastructure adaptation to their variability. The key areas are the introduction of high-efficiency storage, the development of hybrid forecasting models, and compliance with energy quality standards. Prospects are associated with the improvement of hydrogen technologies, longer battery life, and automation of grid management.*

**Keywords:** solar energy, wind energy, energy storage, power quality, energy efficiency, generation, power system.

#### Використані скорочення та позначення

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ГАЕС – гідроаккумуляційна електростанція

ДСТУ – Державний стандарт України

ККД – коефіцієнт корисної дії

НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг

ФЕМ – фотоелектричний модуль

ФЕС – фотоелектрична станція

HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine (горизонтально-осьова вітрова турбіна)

VAWT – Vertical Axis Wind Turbine (вертикально-осьова вітрова турбіна)

**Вступ.** Сучасний розвиток енергетики супроводжується зростанням попиту на відновлювані джерела енергії (ВДЕ), які є екологічно чистими й невичерпними. Використання таких джерел, як сонячна, вітрова, гідро- та біоенергія, сприяє зменшенню викидів парникових газів, зниженню залежності від викопних ресурсів та зміцненню енергетичної безпеки. Крім того, активна інтеграція ВДЕ в сучасні електроенергетичні системи є важливим кроком на шляху до сталого розвитку, досягнення кліматичних цілей, децентралізації електропостачання.

Проте зростання частки відновлюваних джерел у виробництві електроенергії супроводжується низкою викликів, серед яких мінливість генерації, суттєва залежність від погодних умов, необхідність створення адаптивної інфраструктури та забезпечення стабільності електропостачання. Для розв'язання цих проблем потрібні комплексні підходи, спрямовані на підвищення надійності та стійкості енергосистем, що використовують нетрадиційні та відновлювані джерела енергії.

**Постановка завдання.** Аналіз існуючих рішень та технологій, що дозволяють підвищити надійність енергопостачання від ВДЕ. Реалізація таких підходів сприятиме ефективному використанню потенціалу ВДЕ та їх подальшій інтеграції в енергетичну інфраструктуру України.

**Рівні та регулювання якості електропостачання.** Для електричних мереж слід передбачати технічні заходи щодо забезпечення якості напруги електричної енергії відповідно до вимог ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення». Крім того, відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, затвердженого постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (далі – КСР), параметри якості

електроенергії в точках приєднання споживачів у нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT).

Пристрої регулювання напруги мають забезпечувати підтримання напруги на тих шинах напругою від 6 до 20 кВ електростанцій та підстанцій, до яких приєднано розподільні мережі, у межах не нижче ніж 105 % номінального в період найбільших навантажень і не вище ніж 100 % номінального – у період найменших навантажень цих мереж [1].

Основні показники якості електричної енергії визначені у пунктах 11.4.7 – 11.4.12 глави 11.4 розділу XI КСР [2].

Стандартна номінальна напруга  $U_n$  для мереж низької напруги загального призначення має значення 220 В між фазним і нульовим проводом або між фазними проводами:

- для трифазних чотирипроводних мереж:  $U_n = 220$  В між фазним та нульовим проводом;
- для трифазних трипроводних мереж:  $U_n = 220$  В між фазними проводами.
- Зміна напруги не повинна перевищувати  $\pm 10$  % від величини номінальної напруги.
- Частота напруги електропостачання для мереж низької напруги має бути в межах:
- для систем, які синхронно приєднані до ОЕС України, –  $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$  протягом 99,5 % часу за рік та  $50 \text{ Гц} + 4 \%$  ( $- 6 \%$ ) протягом 100 % часу;
- для систем без синхронного приєднання до ОЕС України –  $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$  протягом 99,5 % часу за рік та  $50 \text{ Гц} \pm 15 \%$  протягом 100 % часу.

Показник довготривалого флікера (мерехтіння), спричиненого коливанням напруги, для мереж низької напруги має бути меншим або рівним 1 для 95 % часу спостереження.

95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької

напруги мають бути в межах від 0 до 2 % від складника напруги прямої послідовності.

95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути меншими або рівними значенням, наведеним у табл. 1.

**Таблиця 1. Вимоги до середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги**

**Table 1. Requirements for RMS values of voltage of each harmonic, averaged over a 10-minute period, for low voltage networks**

| Непарні гармоніки |                    |          |                    | Парні гармоніки |                    |
|-------------------|--------------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|
| не кратні 3       |                    | кратні 3 |                    |                 |                    |
| порядок           | відносна амплітуда | порядок  | відносна амплітуда | порядок         | відносна амплітуда |
| 5                 | 6,0 %              | 3        | 5,0 %              | 2               | 2,0 %              |
| 7                 | 5,0 %              | 9        | 1,5 %              | 4               | 1,0 %              |
| 11                | 3,5 %              | 15       | 0,5 %              | 6...24          | 0,5 %              |
| 13                | 3,0 %              | 21       | 0,5 %              | -               | -                  |
| 17                | 2,0 %              | -        | -                  | -               | -                  |
| 19                | 1,5 %              | -        | -                  | -               | -                  |
| 23                | 1,5 %              | -        | -                  | -               | -                  |
| 25                | 1,5 %              | -        | -                  | -               | -                  |

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги електропостачання, ураховуючи всі гармоніки до 40-ї включно, для мереж низької напруги має бути меншим чи рівним 8 %.

Показники якості електричної енергії для мереж середньої та високої напруги, методи випробування та інші характеристики якості електроенергії наведені в ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2022, IDT).

**Особливості деяких відновлюваних джерел енергії.** Впровадженню ВДЕ в енергосистему перешкоджає здебільшого мінливість навантаження та нерегулярність генерації від ВДЕ. Так, сонячна генерація має піки близько полудня, а вітрові електростанції – у нічні години. Типовий графік добового навантаження наведений на рис. 1.

**Сонячна енергетика.** У сонячній енергетиці можна виділити два основних практичних напрями використання сонячної енергії:

1) перетворення сонячної енергії на електричну енергію, в тому числі:

- фотоелектричний метод перетворення (електромагнітне випромінювання Сонця перетворюється на електроенергію постійного струму);
- термодинамічний метод перетворення (сконцентрована сонячна енергія використовується для одержання пари, яка, обертаючи турбогенератор, виробляє електроенергію);

2) перетворення сонячної енергії на теплову енергію, в тому числі:

- опалення;
- гаряче водопостачання.

Загальне позаземне випромінювання, що досягає атмосфери Землі  $I_0$  коливається в межах  $\pm 3,3$  % навколо середнього значення  $1360 \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$ , що пов'язано з рухом Землі навколо Сонця [3].

Ключові параметри для визначення кількості сонячного випромінювання, що поступає на довільно зорієнтовану поверхню, такі [4]:

- географічне положення поверхні;
- положення панелі у просторі;
- поточні погодні умови;
- час доби та пора року.

Кількість електроенергії, що виробляється ФЕМ, безпосередньо залежить від надходження сонячного випромінювання у вибраних географічних умовах експлуатації та визначається формулою (1):

$$E_{\text{уст}} = E_{\text{інс}} \cdot S \cdot \cos(\theta) \cdot \eta, \quad (1)$$

де  $E_{\text{уст}}$  – енергія, яку виробляє установка, кВт·год;  $E_{\text{інс}}$  – питома енергія, сонячних променів, що падають на поверхню, кВт·год/м<sup>2</sup>;  $S$  – площа фотоелементів;  $\cos(\theta)$  – коефіцієнт положення,  $\theta$  – кут між напрямком випромінювання до поверхні та нормаллю до цієї поверхні;  $\eta$  – ККД системи, що складається з ККД

перетворювачів енергії та ККД фотоелементів. ККД промислових зразків варіюється від 15 до 24 % [5].

Фотоелектрична система – сукупність спеціальних елементів, за допомогою яких відбувається перетворення потоку сонячного випромінювання на електричну енергію. Загалом можна виділити три типи ФЕС:

- автономна;
- резервна (гібридна);
- мережева.

**Мережева** – базова сонячна установка; потребує мережевого інвертора. Така ФЕС не має акумуляторної батареї для накопичення енергії, тож придатна до генерації і використання тільки в денний час. Ця система є економічно ефективною, простою в проектуванні, легкою керувати і майже не вимагає обслуговування.

**Автономна** – корисна для споживачів, які не можуть бути підключені до електромережі, або де таке підключення ускладнене різними факторами. Акумулятори використовуються в автономних сонячних фотоелектричних системах для зберігання виробленої в денний час електроенергії та використання її в майбутньому (наприклад, похмурий день, збільшене споживання, блекаут тощо), а також вночі.

**Гібридна** – може бути корисною для споживачів, які вже підключені до електромережі й хочуть мати певний резерв електроенергії у випадках, коли є ризик відключення централізованого електропостачання.

При цьому генерація від ФЕС сильно залежить від поточних погодних умов (рис. 2).

На рис. 2 видно, що генерація майже відсутня в ранкові та вечірні пікові години споживання. У пікові години генерації має місце надлишок електроенергії.



Рис. 2. Типовий добовий профіль виробництва електроенергії від сонячних панелей залежно від погодних умов

Fig. 2. Typical daily profile of electricity generation from solar panels depending on weather conditions

**Вітрова енергетика.** Залежно від положення осі обертання ротора турбіни розрізняють турбіни з горизонтальною віссю (HAWT) і вертикальною віссю (VAWT). У цей час найчастіше використовуються великі вітрогенератори з горизонтальною віссю, висота яких може досягати 100 м. Потужність вітроелектростанцій залежить від конструкції вітрогенераторів і швидкості вітру. Турбіни з вертикальною віссю обертання дедалі частіше використовуються в

урбанізованих районах, де їх встановлюють безпосередньо на будівлях. Лопаті такої конструкції генерують менше шуму, а їхньою головною перевагою є незалежність від зміни напрямку вітру, оскільки вони не потребують використання механізмів для налаштування проти напрямку вітру, на відміну від турбін з горизонтальною віссю. Цей тип конструкцій може працювати при низьких значеннях швидкості вітру й характеризується простою, легкою в обслуговуванні конструкцією [6].

Значення згенерованої потужності  $P$  можна оцінити за такою формулою (2):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \cdot C_p, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_w$  – швидкість вітру,  $\text{м/с}$ ;  $A$  – площа, охоплена лопатями,  $\text{м}^2$ ; а  $C_p$  – коефіцієнт потужності.

Наближені коефіцієнти потужності для різних типів турбін наведені на рис. 3.

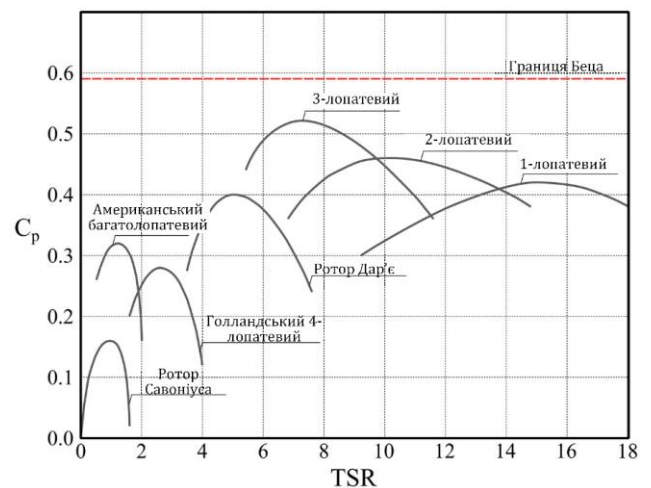


Рис. 3. Залежність коефіцієнта потужності від коефіцієнта швидкості кінчика турбіни (tip speed ratio – TSR) [7]

Fig. 3. Dependence of the power factor on the tip speed ratio (TSR) [7]

TSR знаходять із формули (3):

$$TSR = \frac{V_t}{V_w}, \quad (3)$$

де  $V_t$  – тангенціальна швидкість кінчика турбіни,  $V_w$  – швидкість вітру.

Ключові параметри для визначення кількості енергії вітру, що може бути використана, такі:

- географічне положення вітряка;
- коефіцієнт шорсткості (менший для відкритих чи водних просторів і більший для лісів та забудови);
- поточні погодні умови;
- час доби та пора року.

Генерація від вітроустановки більш мінлива і також здебільшого залежить від поточних погодних умов (рис. 4).

Способи підвищення надійності електропостачання від ВДЕ.

**Технології накопичення енергії.** Експлуатація електричних мереж завжди вимагає забезпечення раціонального балансу між генерацією та споживанням енергії. Це зумовлено необхідністю постійного контролю пропозиції відповідно до попиту, адже ці дві складові мають бути максимально точно узгоджені. Попит на електроенергію можна частково прогнозувати (зростання ввечері, зниження вночі), що вимагає від електросистем високої гнучкості. Таку гнучкість забезпечують системні оператори, які регулюють вихідну потужність залежно від змін у рівні споживання. Класифікацію накопичувачів енергії наведено на рис. 5.

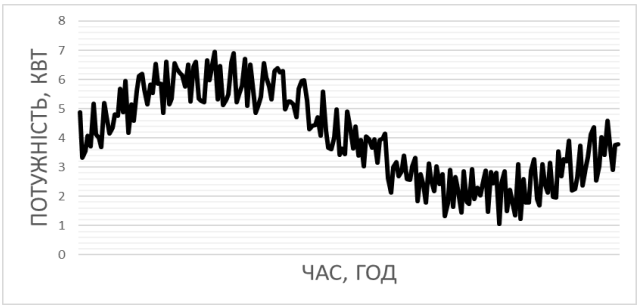


Рис. 4. Типовий добовий профіль виробництва електроенергії від вітроелектростанції

Fig. 4. Typical daily profile of electricity generation from a wind farm

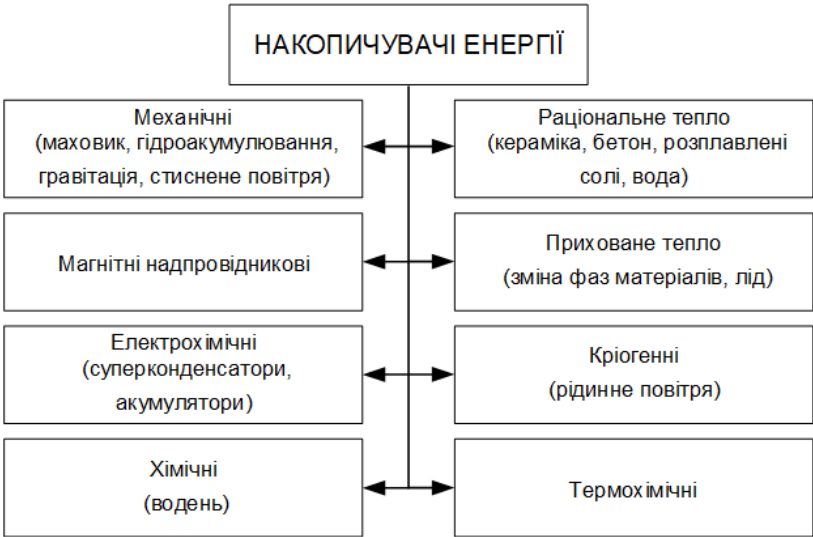


Рис. 5. Класифікація накопичувачів енергії

Fig. 5. Classification of energy storage devices

Кожна з описаних технологій накопичення енергії має специфічні характеристики, що визначають доцільність її застосування в різних умовах. Узагальнені технічні дані накопичувачів наведено в табл. 2 [8].

Таблиця 2. Зведені характеристики накопичувачів енергії

Table 2. Summary characteristics of energy storage devices

| Тип накопичувача                    | Щільність енергії, Вт·год/кг | Потужність   | Час розрядження | Термін зберігання | Термін експлуатації, років | ККД, % |
|-------------------------------------|------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|----------------------------|--------|
| Маховик                             | 2,5–1200                     | 0–250 кВт    | 1 мс–15 хв      | 1 с–1 рік         | ±15                        | 85–95  |
| ГАЕС                                | 0,5–1,5                      | 100–5000 МВт | 1–24 год        | год–місяць        | 40–60                      | 66–75  |
| GES (Gravity Energy Storage)        | 1,06                         | 40–150 МВт   | 30 с–1 год      | год–місяць        | 30+                        | 75–80  |
| ARES (Advanced Rail Energy Storage) | —                            | 100–3000 МВт | 30 с–1 год      | год–місяць        | 40+                        | 75–80  |
| Стиснене повітря                    | 30–60                        | 10–500 МВт   | 1–24 год        | год–місяць        | 20–60                      | 50–65  |
| Водень                              | 800–10000                    | 0–50 МВт     | 1 хв–1 доба     | рік+              | 10–20                      | 25–45  |
| Суперконденсатор                    | 2,5–15                       | 0–300 кВт    | 1 мс–60 хв      | 1 с–1 год         | 1–15                       | 85–98  |
| Акумулятори (Li-ion)                | 100–180                      | 0–100 кВт    | 1 хв–1 год      | 0–24 год          | 8–15                       | 85–90  |

**Впровадження систем прогнозування генерації.** Безпека мережі, регулювання напруги, потужності та управління резервами забезпечується за допомогою короткострокового прогнозування. На основі середньострокового прогнозування приймають рішення щодо зобов'язань та планування технічного обслуговування

електромережі. Довгострокове планування допомагає органам влади планувати виробництво, передачу та розподіл електроенергії разом зі структуруванням та функціонуванням ринків електроенергії.

Порівняльні характеристики методів прогнозування наведено в табл. 3.

**Таблиця 3. Загальні характеристики методів прогнозування потужності ВДЕ**

**Table 3. General characteristics of RES capacity forecasting methods**

| Назва підходу                                                  | Переваги                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Недоліки                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Моделі сталості (Persistence approach)</b>                  | Відносно легкі в реалізації<br>Можуть бути застосовані для визначення ефективності інших методів                                                                                                                                                                                                   | Точність сильно знижується при зміні хмарності відносно поточного стану<br>Неточні при прогнозуванні більш як на годину наперед                                                                                              |
| <b>Фізичні моделі (Physical approach)</b>                      | Не потребують наборів історичних даних<br>Можна адаптувати для створення вхідних змінних статистичних моделей                                                                                                                                                                                      | Чутливі до різких змін значень метеорологічних параметрів<br>Потребують детальних моделей систем з ВДЕ і локальних вимірювань<br>Складність отримання вхідних даних<br>Потребують частих калібрувань записувальних пристроїв |
| <b>Статистичні моделі (Statistical approaches)</b>             | Надійні для короткострокового прогнозування, оскільки використовують доступні метеорологічні дані<br>Зазвичай перевершують фізичні моделі<br>Простіші в реалізації                                                                                                                                 | Вимагають значної кількості попередніх вхідних даних<br>Менш точні для довгострокових прогнозів<br>Не здатні зафіксувати переривчасту поведінку вхідних змінних                                                              |
| <b>Моделі машинного навчання (Machine Learning approaches)</b> | Адаптовані до широкого діапазону параметрів<br>Потребують великого набору навчальних даних і оптимальної моделі<br>Навчаються в процесі навчання (системи на основі знань)<br>Здатність вловлювати високі нелінійності потужності<br>Можуть бути реалізовані для великих систем з більшою точністю | Потребують великого обсягу навчальної інформації<br>Складні в проєктуванні<br>Потребують більше обчислювальної пам'яті та часу для збереження значних обсягів інформації                                                     |
| <b>Гібридні моделі (Hybrid techniques)</b>                     | Спроєктовані для підвищення показників фізичних або статистичних методів<br>Перевершують всі фізичні моделі.                                                                                                                                                                                       | Загалом часові зміни в історичні дані не враховуються<br>Вимагають більшого розміру пам'яті та більше часу для обчислень кількох наборів даних, оскільки поєднують різні методи                                              |

Моделі сталості (persistence) припускають, що прогнозована генерація ФЕС дорівнює фактичній генерації в аналогічний час попереднього дня [9]. У цьому разі продуктивність сильно залежить від погодних умов – що стабільніша погода, то краща точність прогнозу.

Використовуючи ефективну математичну модель, фізичні моделі (physical) створюють зв'язок між вихідною потужністю ФЕС та іншими факторами, включно зі змінними складовими погоди та характеристиками системи. Ці методи своєю чергою поділяються на чисельний прогноз погоди (numeric weather prediction – NWP) та методи на основі зображення (image-based approach).

Останні будуються на основі зображень неба з землі чи з супутника [10].

Статистичні підходи (statistical) здатні встановити кореляцію та моделі змін історичних даних. Методи прогнозування на основі часових рядів були розроблені для фіксації кривих кореляції вихідної потужності енергоустановки, включно з авторегресійним ковзним середнім (autoregressive moving average – ARMA) та авторегресійним інтегрованим ковзним середнім (autoregressive integrated moving – ARIMA). Статистичні методи здебільшого зосереджуються на історичних даних, але ігнорують поточні погодні умови [11].

Прогрес у технології штучного інтелекту дозволив розробити методи програмного обчислення з багатьма змінними, включно з історичними даними та погодними умовами. Ці методи можна розділити на одномодельні (single-model) та гібридні (hybrid-model).

До одномодельних методів належать традиційні алгоритми машинного навчання (machine learning – ML) і алгоритми глибокого навчання (deep learning – DL). Традиційні алгоритми ML охоплюють штучну нейронну мережу (artificial neural network – ANN), метод опорних векторів (support vector machine – SVM), машину екстремального навчання (extreme learning machine – ELM), регресію Гауса (Gaussian process regression – GPR) тощо. Штучна нейронна мережа, яка характеризується самоадаптацією, застосовується для вирішення нелінійного прогнозування потужності енергоустановки. Порівняно з традиційними алгоритмами ML моделі DL більш пристосовані до вивчення функцій вищого порядку та відображення нелінійних зв'язків. Крім того, парадигми навчання функцій моделей DL дозволяють застосовувати як вхідні необроблені дані без будь-якого перетворення.

Вбудована петля зворотного зв'язку рекурентної нейронної мережі (recurrent neural network – RNN) дає їй змогу діяти як механізм прогнозування. На основі структури зворотного зв'язку інший тип RNN, як довготривала короткочасна пам'ять (long short-term memory – LSTM), використовується для визначення часових співвідношень з історичних даних потужності. Покращені структури LSTM пропонуються для підвищення характеристик прогнозування фотоелектричної потужності, включно з фізичними обмеженнями, багатомасштабними налаштуваннями й компенсацією зміщення. Конволюційна нейронна мережа (convolution neural network – CNN), яка вловлює просторову кореляцію між суміжними даними або відповідними змінними, може використовуватися для обробки вхідних даних багатьох змінних (історичні дані та погодні фактори) або вирішити проблему відсутності деяких вхідних даних у процесі прогнозування.

Існують деякі фактори, що впливають на підвищення точності методів програмного обчислення. По-перше, високий рівень стохастичності кривої потужності обмежує ефективність окремих моделей. По-друге, складно отримати оптимальну модель, використовуючи параметри, встановлені на основі самих лише емпіричних даних. Останнім часом було розроблено велику кількість гібридних моделей для подолання згаданих вузьких місць, які можна розділити на три основні категорії: декомпозиція даних (data decomposition), алгоритми оптимізації (optimization algorithm) та ансамблеве прогнозування (ensemble forecasting).

Стохастичні дані можна розділити на низькочастотні та високочастотні компоненти. Методи декомпозиції спрямовані на розкладання початкових кривих потужності на підпоследовності з певними характеристиками, а потім використання відповідних моделей ML або DL для прогнозування кожного компонента. Зазвичай ви-

користовувані алгоритми декомпозиції складаються з вейвлет-перетворення (wavelet transform – WT), емпіричної модової декомпозиції (empirical mode decomposition – EMD), комплементарного ансамблевого емпіричного модового розкладу (complementary ensemble (empirical mode decomposition – CEEMD) та методу варіаційного розкладання моди (variational mode decomposition – VMD). Застосовуючи вбудований крок декомпозиції, моделі DL демонструють стабільнішу продуктивність, наприклад мережа LSTM, CNN.

Хоча декомпозиція даних може покращити якість вхідних даних, незалежне моделювання кожної підкомпоненти призведе до збільшення складності та трудомісткості мереж прогнозування. Крім того, декомпозиція даних значною мірою покладається на процес обробки сигналів для встановлення прийнятних параметрів [12].

Інтеграція алгоритмів оптимізації є іншою галуззю підходів гібридної моделі. Метаевристичні алгоритми використовуються для визначення гіперпараметрів моделей, як-от номер шару, номер нейронного вузла та функції ядра. Зазвичай використовувані методи оптимізації охоплюють генетичний алгоритм (genetic algorithm GA), оптимізацію рою часток (particle swarm optimization – PSO), у якому ітеративно перевіряють параметри, доки функція призначення не зійдеться до оптимального значення. Ці алгоритми оптимізації можуть бути об'єднані з іншими моделями для прогнозування фотоелектричної потужності [13].

У структурі ансамблевого навчання кілька слабких предикторів навчаються та інтегруються для формування потужного предиктора, який може подолати недоліки алгоритмів, використаних окремо.

Аналогічні результати показують й інші дослідження [14].

## Висновки

Стандарти якості енергії є критично важливими для стабільної роботи мереж з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Дотримання параметрів напруги, частоти, гармонік та інших показників забезпечує сумісність ВДЕ з традиційною інфраструктурою.

Сонячна та вітрова енергетика мають значний потенціал, але їх інтеграцію ускладнює мінливість генерації, залежність від погоди та невідповідність між піками виробництва та споживання. Технології накопичення енергії є ключовими для балансування генерації та споживання. Моделі машинного навчання (LSTM, CNN) демонструють високу точність завдяки здатності аналізувати нелінійні залежності. Водночас гібридні підходи (поєднання фізичних моделей з алгоритмами оптимізації) підвищують надійність прогнозів.

Подальшу роботу варто зосередити на вдосконаленні накопичувачів, збільшенні щільності енергії та терміну служби акумуляторів, розробці водневих систем.

## ПОСИЛАННЯ

1. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання), ред. 2017 року.
2. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Головна | Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi> (дата звернення: 07.02.2025).
3. Extraterrestrial Radiation. PV Performance Modeling Collaborative (PVPMP). URL: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/irradiance-insolation/extraterrestrial-radiation/> (дата звернення: 07.02.2025).
4. Коровушкін В. О., Дубовик В. Г., Босак А. В. Оцінювання параметрів системи одноосової орієнтації фотоелектричного модуля. «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2021. № 4. С. 23–29. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2021.257249> (дата звернення: 07.02.2025).
5. Best Research-Cell Efficiency Chart. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page | NREL. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення: 07.02.2025).
6. Optimization of the Small Wind Turbine Design—Performance Analysis / M. Jaszczur et al. Computation. 2024. Vol. 12, no. 11. P. 215. URL: <https://doi.org/10.3390/computation12110215> (дата звернення: 07.02.2025).
7. The Ragone plots guided sizing of hybrid storage system for taming the wind power / Y. Zhang et al. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. Vol. 65. P. 246–253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.006> (дата звернення: 07.02.2025).
8. Мирутенко П., Листовщик Л. Накопичувачі енергії. основні типи та перспективи використання. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273433> (дата звернення: 07.02.2025).
9. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids / M. Diagne et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 27. P. 65–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.042> (дата звернення: 07.02.2025).
10. Completed Review of Various Solar Power Forecasting Techniques Considering Different Viewpoints / Y.-K. Wu et al. Energies. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 3320. URL: <https://doi.org/10.3390/en15093320> (дата звернення: 07.02.2025).
11. Wang J., Zhou Y., Li Z. Hour-ahead photovoltaic generation forecasting method based on machine learning and multi objective optimization algorithm. Applied Energy. 2022. Vol. 312. P. 118725. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118725> (дата звернення: 07.02.2025).
12. Using PSO-GA algorithm for training artificial neural network to forecast solar space heating system parameters / B. Jamali et al. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 147. P. 647–660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.070> (дата звернення: 07.02.2025).
13. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids / M. Diagne et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 27. P. 65–76. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.042> (дата звернення: 07.02.2025).
14. Boichenko, S., Dubovyk, V., Shkilniuk, I., Korovushkin, V., Khotian, A. (2024). Research on Photovoltaic Power Prediction Using an LSTM Recurrent Neural Network. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 552. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_19) (дата звернення: 07.02.2025).

## REFERENCES

1. Rules for the Installation of Electrical Installations (first revised, revised, supplemented and adapted to the conditions of Ukraine), 2017 edition.
2. National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities. Home | National Energy and Utilities Regulatory Commission. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi> (accessed 07.02.2025).
3. Extraterrestrial Radiation. PV Performance Modeling Collaborative (PVPMP). URL: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/irradiance-insolation/extraterrestrial-radiation/> (accessed 07.02.2025).
4. Korovushkin V. O., Dubovyk V. G., Bosak A. V. Estimated Parameters in the Systems of a Single-Axis Oriented of a Photoelectric Module. "POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology". 2021. № 4. P. 23–29. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2021.257249> (accessed 07.02.2025).
5. Best Research-Cell Efficiency Chart. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page | NREL. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed 07.02.2025).
6. Optimization of the Small Wind Turbine Design—Performance Analysis / M. Jaszczur et al. Computation. 2024. Vol. 12, no. 11. P. 215. URL: <https://doi.org/10.3390/computation12110215> (accessed 07.02.2025).



7. The Ragone plots guided sizing of hybrid storage system for taming the wind power / Y. Zhang et al. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 65. P. 246–253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.006> (accessed 07.02.2025).
8. Mirutenko P., Lystovschyk LENERGY STORAGE DEVICES. MAIN TYPES AND PROSPECTS OF APPLICATION. POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. 2023. № 4. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273433> (accessed 07.02.2025).
9. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids / M. Diagne et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 27. P. 65–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.042> (accessed 07.02.2025).
10. Completed Review of Various Solar Power Forecasting Techniques Considering Different Viewpoints / Y.-K. Wu et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 3320. URL: <https://doi.org/10.3390/en15093320> (accessed 07.02.2025).
11. Wang J., Zhou Y., Li Z. Hour-ahead photovoltaic generation forecasting method based on machine learning and multi objective optimization algorithm. *Applied Energy*. 2022. Vol. 312. P. 118725. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118725> (accessed 07.02.2025).
12. Using PSO-GA algorithm for training artificial neural network to forecast solar space heating system parameters / B. Jamali et al. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 147. P. 647–660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.070> (accessed 07.02.2025).
13. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids / M. Diagne et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 27. P. 65–76 URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.042> (accessed 07.02.2025).
14. Boichenko, S., Dubovyk, V., Shkilniuk, I., Korovushkin, V., Khotian, A. (2024). Research on Photovoltaic Power Prediction Using an LSTM Recurrent Neural Network. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 552. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_19) (accessed 07.02.2025).