

**Вибір засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії**  
Вінницький національний технічний університет

**Анотація**

*У роботі проведено аналіз проблем балансування електроенергетичних систем, пов'язаних із нестабільною генерацією енергії сонячними та вітровими електростанціями, що залежить від природних умов. Така змінність особливо відчутна під час різких змін погоди, коли продуктивність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) може суттєво коливатися, що впливає на стабільність енергопостачання. Дослідження присвячено питанням резервування потужностей, що є ключовим для надійності енергосистеми, особливо у пікові періоди споживання. Розглянуто використання електрохімічних накопичувачів, водневих установок та біогазових технологій для оптимізації енергії та підвищення стабільності системи. Для оцінки ефективності резервування використовуються математичні моделі, побудовані на основі методу теорії подібності. Вони дозволяють оцінювати технології за такими критеріями, як потужність, вартість, експлуатаційні витрати та швидкість реагування на зміни у виробництві чи споживанні енергії. Критеріальний метод забезпечує точне порівняння технологій, допомагаючи обирати найефективніші варіанти резервування потужностей відповідно до потреб енергосистеми та з урахуванням технічних і економічних умов. Моделі, створені на основі цього підходу, дозволяють адаптувати рішення щодо впровадження технологій залежно від параметрів системи. Особлива увага приділяється централізованому розміщенню технологій у локальних енергосистемах (ЛЕС) з урахуванням втрат в електромережах, що сприяє зниженню витрат на передачу та ефективнішому використанню ресурсів, особливо у віддалених районах. Оптимізація втрат і максимальне використання резервних потужностей дозволяє значно підвищити ефективність роботи енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії. Це має важливе значення для сталого розвитку галузі, особливо з урахуванням декарбонізації енергетики. Висновки підкреслюють значення критеріального методу для підвищення стабільності роботи енергосистем, оптимізації витрат та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Це не тільки покращує надійність системи, а й зменшує залежність від змінних кліматичних факторів. Ефективне резервування є важливим фактором сталого розвитку сучасної енергетики, що відповідає вимогам зростаючої урбанізації та попиту на чисті технології.*

**Ключові слова:** локальна електроенергетична система, відновлювані джерела енергії, нестабільність генерування, резервування, критеріальний метод.

**Вступ**

З розвитком відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у складі сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) постала проблема балансування їх режимів роботи. [1-2] Сонячні та вітрові електростанції, що є ключовими елементами ВДЕ, характеризуються значною нестабільністю виробництва електроенергії, оскільки їхня генерація залежить від змінних природних умов. Це ускладнює підтримку стійкості енергосистем і вимагає ефективного резервування потужностей для компенсації можливих відхилень.

Забезпечити баланс потужності та електроенергії в енергосистемі можна шляхом комплексного використання наявних маневрових ресурсів, таких як теплові та гідроелектростанції. Сучасні

технології, зокрема електрохімічні накопичувачі енергії, водневі та біогазові рішення, а також узгодження графіків виробництва та споживання електроенергії, перебувають на різних етапах розробки та впровадження. Для успішного балансування режимів в ЕЕС і підвищення ефективності електричних мереж необхідно розвивати резервні системи для підтримки ВДЕ. Основне завдання полягає у виборі найбільш технічно ефективних і економічно вигідних варіантів.

**Метою** даної роботи є порівняння між собою можливих засобів балансування режимів локальних енергетичних систем відновлюваних джерел енергії з нестабільним генеруванням.

## Матеріал та результати дослідження

Нестабільність виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями є головною проблемою, яка виникає при інтеграції ВДЕ в загальну енергетичну систему [1]. Оскільки ці джерела енергії залежні від погоди та часу доби, їх потужність часто не відповідає потребам споживачів або прогнозованому графіку генерації і може призводити до розбалансування між виробленою та споживаною електроенергією в локальній електричній системі (ЛЕС). Для уникнення таких дисбалансів необхідно мати резервні потужності, які можуть швидко компенсувати дефіцит або надлишок енергії, що виникає через непередбачувані зміни у генерації ВДЕ.

Існує кілька ефективних підходів до забезпечення резервування потужностей. Їх можна класифікувати за декількома ознаками. В першу чергу за призначенням. Якщо ВДЕ приймають участь в балансуванні режиму ЕЕС, тобто виробляють електроенергію за заданими погодинним графіком, то засоби резервування мають працювати в режимі заряд/розряд. Вони перетворюють електроенергію, вироблену ВДЕ, в інший вид енергії, накопичують її, а потім віддають в електричну мережу знову як електроенергію. До таких засобів резервування відносяться електрохімічні накопичувачі енергії, водневі технології та біогазові установки (БГУ). [1-3]

Водневі технології призначені шляхом електролізу виробляти водень, який може для підтримування балансу електроенергії в ЛЕС використовуватися для вироблення електроенергії, а решта його використовується в інших галузях і на транспорті. БГУ можуть використовуватися як джерело теплової і електричної енергії (когенераційні установки). [6]

Також для резервування нестабільності генерування ВДЕ використовується системний резерв потужності в ЕЕС. Проте через обмежену кількість маневреної потужності можливості тут незначні. Він призначений для інших цілей, тому в ЕЕС стараються не використовувати системний резерв, а за критичних ситуацій віддають перевагу обмеженню генерування ВДЕ.

Варто зазначити те, що вартість електрохімічних накопичувачів енергії, виробництво яких є освоєним у світовій практиці, постійно зменшується і тому нарощується їх потужність в енергосистемах. Інші засоби резервування, а саме водневі технології та біогазові установки знаходяться на етапі розвитку. [5] Їхня вартість залежить від використання водню та біогазу в інших галузях. Що стосується системного резерву, то в допустимих межах використання його для урівноваження несталого генерування ВДЕ його вартість в ринкових умовах визначається станом ЕЕС (дефіцитний чи профіцитний баланс електроенергії).

Запишемо баланс електричної енергії з локальною електричною системою з ВДЕ:

$$P_{\text{ФЕС}}(t) + P_{\text{ВЕС}}(t) + P_{\text{мГЕС}}(t) + P_{\text{БГУ}}(t) \pm P_{\text{ЕЕС}}(t) \pm P_{\text{г}}(t) \pm P_{\text{х}}(t) - P_{\text{сн}}(t) - \Delta P(t) = 0 \quad (1)$$

де  $P_{\text{ФЕС}}(t)$  – потужність ФЕС;  $P_{\text{ВЕС}}(t)$  – потужність ВЕС;  $P_{\text{мГЕС}}(t)$  – потужність малих гідроелектростанцій;  $P_{\text{БГУ}}(t)$  – електрична потужність когенераційних установок;  $P_{\text{ЕЕС}}(t)$  –

потужність ЕЕС;  $P_g(t)$  – потужність водневих установок;  $P_x(t)$  – потужність електрохімічних накопичувачів;  $P_{cn}(t)$  – потужність споживачів електроенергії, в тому числі «активних»;  $\Delta P(t)$  – технологічні витрати в електричних мережах.

Якщо за критерій оптимальності прийняти сумарні витрати  $B_{рез}$  на резервування  $P_{рез}(t)$  в (1) несталою генерування ВДЕ, то з врахуванням реально можливих на сьогодні способів резервування задача мінімізації  $B_{рез}$  запишеться:

$$B_{рез} = B_x(P_x) + B_g(P_g) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) + B_k(P_k) \rightarrow \min \quad (2)$$

де  $B_x(P_x)$  – витрати на резервування накопичувачами електрохімічного типу;  $B_g(P_g)$  – витрати на водневі технології;  $B_z(P_z)$  – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву;  $B_c(P_c)$  – витрати на користування системним резервом, що є фактично компенсацією за утримання резерву на енергоагрегатах ТЕС, що працюють за ціновими заявками;  $B_n(P_n)$  – витрати на запаси пропускнуої спроможності ліній електропередачі, що необхідно для транспортування електроенергії з/до місця під'єднання резервної потужності до ЕЕС;  $B_k(P_k)$  – витрати на реалізацію координації графіків генерування і споживання електроенергії в ЕЕС;  $P_x, P_g, P_z, P_c, P_n, P_k$  – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування

Для ефективного вибору засобів резервування використовуються спеціалізовані математичні моделі. [4] Вони базуються на методі теорії подібності, зокрема критеріальному методі, що дозволяють оцінювати ефективність різних способів резервування у відносних одиницях. Такі моделі порівнюють різні технології за ключовими показниками, такими як потужність, вартість установки, експлуатаційні витрати, швидкість реагування на зміни у генерації та інші параметри.

За допомогою критеріального методу ми можемо дати відносну оцінку для порівняння між собою окремих способів резервування ВДЕ і отримати їх рейтинг за обраним критерієм оптимальності. [4]

У відповідності до можливості методу формується математична модель. Формування критеріальної моделі вимагає певних допущень. Електрохімічні накопичувачі, установки отримання «зеленого» водню і перетворення його в електроенергію, а також когенераційні біогазові установки розміщують в ЛЕС централізовано. Централізоване розміщення ЕХН, водневих технологій і біогазових установок зв'язане з втратами електроенергії в електричних мережах і в моделі оптимізації  $B_{рез}$  вони враховуються. [4]

З врахуванням сказаного, математичну модель оптимізації питомих витрат на 1 кВт резервної потужності для урівноваження генерування ВДЕ, в якій враховуються особливості режимів ЕЕС, можна представити у такому вигляді:

$$B_{рез} = C_1 P_x^{-1} + C_2 P_g + C_3 P_z + C_4 P_c^{-1} + C_5 P_k + C_6 P_x^2 P_c^2 P_g^{-1} P_z^{-1} P_k^{-1} \rightarrow \min \quad (3),$$

за умови, що  $P_c \leq G_c$  або  $g_c P_c \leq 1$ ,

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – узагальнені константи, що містять вихідні дані задачі (в першу чергу це цінові показники);  $G_c$  – максимальна потужність системного резерву, яку можна використати для урівноваження генерування ВДЕ ( $g_c = 1/G_c$ ).

У рівнянні (3) не враховані деякі складові способів резервування задачі мінімізації  $B_{рез}$ . Зокрема, це витрати на збільшення пропускної здатності ліній електропередачі, яка на початковому етапі вважається достатньою. Перша складова рівняння враховує питомі витрати на електрохімічні накопичувачі. Вартість їх зменшується, тому в ЕЕС об'єм їх нарощується і потужність збільшується. Друга складова враховує питомі витрати на реалізацію резервування з використанням системи отримання і використання водню як накопичувача енергії. З врахуванням того, що частина водню використовується в інших галузях, витрати на відтворення електроенергії в балансуєчій групі будуть обернено пропорційні до  $P_в$ . Значення витрат на користування біогазом для збільшення потужності резервування має лінійну залежність. За умови доступності системного резерву і зменшення його вартості він буде використовуватися більше і  $P_в$  буде збільшуватися. Останній член цільової функції відображає витрати на покриття втрат електроенергії в елементах електричної мережі, які пов'язані з реалізацією засобів резервування [7].

## Висновок

Для вибору засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з ВДЕ краще використовувати критеріальний метод, побудований на основі теорії подібності, який дає можливість у відносних одиницях оцінити переваги того чи іншого способу резервування і встановити їх оптимальні потужності за даних вартісних характеристик. Врахування економічної ефективності, чутливості до змін потужності та гнучкості резервних технологій дозволяє ефективно інтегрувати новітні засоби балансування, такі як накопичувачі енергії та водневі технології, у сучасні енергосистеми. Це сприяє зниженню негативного впливу надійності енергопостачання через нестабільність ВДЕ і забезпечує більш стійке функціонування електроенергетичних систем.

## Список використаної літератури

1. Лежнюк, П. Д. Відносне оцінювання вартості засобів резервування відновлюваних джерел енергії / Лежнюк П. Д., Комар В. О., Повстянко К. О. // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2023. – № 1 (71). – С. 39-45. – Бібліогр.: 12 назв.
2. Відновлювані джерела енергії : монографія / С. О. Кудря, Н. М. Мхітарян, В. Ф. Рєзцов, Т. В. Суржик та ін.; за ред. С. О. Кудрі. Київ : ІВЕ НАН України, 2020.
3. Electrical power and energy balance in the local electrical system by using reconciliation of the generation and consumption schedules [Text] / Petro Lezhniuk, Oleh Kozachuk, Natalia Komenda, Juliya Malogulko // Przegląd Elektrotechniczny. – 2023. – № 9. – Pp. 57-63.
4. Критеріальний метод в електроенергетиці. / Лежнюк П. Д., Комар В. О., Бєвз С. В., Остра Н. В., Рубаненко О. О. // Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 214 с.
5. Малогулко Ю.В. ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ / Малогулко Ю.В., Ластівка В.Б. // Znanstvena misel journal. №65/2022, pp. 65-68. ISSN 3124-1123.
6. Малогулко Ю. В. АНАЛІЗ ВПЛИВУ BESS НА ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, В.Б. Ластівка // Матеріали молодіжної науково-практичної інтернет-конференції студентів аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)» : збірник матеріалів. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 180-184 с. - Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-mn/index/pages/view/zbirn2022>.
7. Petro Lezhniuk, Viacheslav Komar, Olena Rubanenko. Criterion modeling of the process redundancy of renewable energy sources power generation instability by electrochemical accumulators // Computational Problems of Electrical Engineering, 2021, Volume 11, No2, pp. 12–17.

**Selection of balancing methods for local power systems with renewable energy sources**  
Vinnitsia National Technical University

**P.D. Lezhniuk**  
**J.V. Malogulko**  
**V.B. Lastivka**

**Abstract**

*The analysis of power balancing issues in electric power systems related to the unstable energy generation by solar and wind power plants, which depends on natural conditions, was carried out in this work. Such variability is especially noticeable during sudden weather changes, when the performance of renewable energy sources (RES) can fluctuate significantly, affecting the stability of power supply. The research focuses on the issues of capacity reservation, which is key to the reliability of the power system, especially during peak consumption periods. The use of electrochemical storage devices, hydrogen installations, and biogas technologies for energy optimization and system stability enhancement is considered. Mathematical models based on the similarity theory method are used to evaluate the effectiveness of capacity reservation. These models allow assessing technologies based on such criteria as power, cost, operational expenses, and response speed to changes in energy production or consumption. The criterion method provides an accurate comparison of technologies, helping to select the most effective capacity reservation options according to the needs of the power system, considering technical and economic conditions. Models created based on this approach allow adapting decisions regarding technology implementation depending on system parameters. Special attention is paid to the centralized placement of technologies in local energy systems (LES), considering transmission losses, which helps reduce transmission costs and more efficiently use resources, especially in remote areas. Optimizing losses and maximizing the use of reserve capacities significantly improves the efficiency of power systems based on renewable energy sources. This is important for the sustainable development of the industry, especially considering the decarbonization of energy. The conclusions emphasize the significance of the criterion method for improving power system stability, cost optimization, and integration of renewable energy sources. This not only improves the reliability of the system but also reduces dependence on variable climatic factors. Effective reservation is a crucial factor in the sustainable development of modern energy, meeting the demands of growing urbanization and the demand for clean technologies.*

**Keywords:** *Local power system, Renewable energy sources, Generation instability, Reserve, Criterion method*