

## ВІДНОСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВАРТОСТІ ЗАСОБІВ РЕЗЕРВУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

*Генерування електроенергії сонячними і вітровими електростанціями залежить від природних умов і тому виникають проблеми участі їх в процесі балансування режимів електроенергетичних систем (ЕЕС). Виконати прогнозованій і затвердженій погодинний графік генерування на наступну добу з заданою точністю для них є складним. В ЕЕС змушені тримати резерв потужності для компенсації відхилень відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) від прогнозованого графіка генерування. Оскільки ці відхилення можуть бути як в більшу, так і меншу сторони від допустимого, то це відповідним чином формує засоби по балансуванню режимів ЕЕС. В роботі пропонується метод для дослідження заходів резервування відновлюваних джерел енергії з нестабільним генеруванням в ЕЕС. Критерієм оптимальності для порівняння способів резервування ВДЕ прийнято відносні витрати на них.*

*Серед способів резервування ВДЕ використовується загально системний резерв (в основному це маневрені потужності теплових і гідроелектростанцій), але оскільки його не достатньо, то пропонується використовувати доступні на сьогодні інші засоби резервування потужності: електрохімічні накопичувачі електроенергії, водневі і біогазові технології.*

*Для аналізу техніко-економічної ефективності тих чи інших засобів резервування розроблено математичні моделі на основі теорії подібності і критеріального методу. Критеріальному методу надано перевагу через те, що він за мінімально доступної вихідної інформації забезпечує можливість порівнювати між собою різні способи резервування генерування ВДЕ і визначити оптимальні. Метод дозволяє оцінювати їх співрозмірність, а також визначити чутливість витрат до потужності способів резервування.*

*Сформовано критеріальні моделі, які дозволяють побудувати залежності витрат на засоби резервування несталого генерування ВДЕ від потужності засобів резервування. Подібні залежності дають можливість більш обґрунтовано обирати на першому етапі ті чи інші способи резервування у відповідності до характеристик і вимог ЕЕС. Вони можуть бути уточнені, якщо будуть відомі цінні показники, які діють на даний час і на найближчу перспективу.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, відновлювані джерела енергії, неста генерування, засоби резервування, теорія подібності, критеріальний метод.

### Вступ

З впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електроенергетичні системи (ЕЕС) виникли нові задачі. Вони зумовлені непристосованістю електричних мереж ЕЕС до експлуатації електричних станцій, які використовують відновлювані джерела енергії, з нестабільним генеруванням та недостатнім рівнем автоматизації мереж. Нестабільність генерування ВДЕ, а саме фотоелектричних станцій (ФЕС) та вітрових електростанцій (ВЕС), зумовлена залежністю від природних умов. Несталість режимів роботи ВДЕ негативно впливає на балансову надійність енергосистеми, на стійкість її роботи та погіршує якість послуг з електропостачання споживачів. Негативну роль відіграв також той факт, що розбудова ВДЕ в електричних мережах ЕЕС випереджала нарощування потужності засобів компенсації нестабільного їх генерування. Склалася парадоксальна ситуація – чим інтенсивніше розбудовуються ВДЕ і збільшується їх потужність, тим більше проблем в електроенергетиці, як технічних, так і фінансових. Чомусь не зверталось уваги на те, що одночасно з розвитком ВДЕ потрібно було відповідно модернізувати електричні мережі і передбачити методи та засоби компенсації нестабільності генерування ВДЕ. У гонитві за кількістю мало що робилося для покращання енергоефективності електропостачання завдяки розбудові ВДЕ. Стан зі втратами електроенергії і її якістю в електричних мережах в результаті не покращився, а часом навпаки, зате виникли суттєві складнощі з балансовою надійністю.

Необхідно створити сприятливі умови не лише для розбудови ВДЕ в електричних мережах енергосистеми, а й для оптимальної їх експлуатації, мінімізуючи негативний вплив на техніко-економічні показники електричних мереж. В залежності від місця під'єднання ВДЕ до електричних мереж і їх потужності може бути досягнуто зменшення втрат електроенергії на її транспортування [1, 2], можуть покращуватися показники надійності SAIFI і SAIDI [3, 4], а також суттєво покращуватися якість електроенергії [5, 6] і, в цілому, енергоефективність системи електропостачання [7]. Проте ці можливості ВДЕ покращувати техніко-економічні показники електричних мереж зводяться внівець або суттєво

знижуються через необхідність тримати в енергосистемі багато вартісний резерв потужності для компенсації нестабільного генерування електроенергії сонячними і вітровими електростанціями.

Убезпечити баланс потужності та електроенергії в енергосистемі можливо, комплексно використовуючи наявні маневрені потужності, зокрема теплові та гідроелектростанції. Щодо сучасних засобів, таких як електрохімічні накопичувачі електроенергії, водневі технології, біогазові технології, узгодження графіків генерування та споживання електроенергії, тощо), то вони поки що знаходяться на різних етапах розробки і застосування в ЕЕС. Необхідно розвивати засоби резервування генерування ВДЕ для успішного вирішення задачі балансування режимів в ЕЕС та покращання техніко-економічних показників електричних мереж. Завдання полягає тільки в тому, що серед можливих засобів необхідно вибрати ті, які є найбільш технічно ефективними та оптимальними щодо витрат.

**Метою** статті є розроблення методу відносного порівняння між собою можливих способів резервування відновлюваних джерел енергії з нестабільним генеруванням в електроенергетичних системах та оцінювання чутливості витрат на них до зміни потужності.

#### Матеріал та результати дослідження

Баланс електроенергії в ОЕС України в частині генерування формується різними електростанціями [7–9]:

$$P_{AEC}(t) + P_{TEC}(t) + P_{TEC}(t) \pm P_{GAEC}(t) + P_{ВДЕ}(t) \pm P_{рез}(t) - P_n(t) - \Delta P(t) = 0, \quad (1)$$

де  $P_{AEC}(t)$  – потужність атомних електростанцій (АЕС),  $P_{TEC}(t)$  – потужність теплових електростанцій (ТЕС) і теплоелектроцентралей (ТЕЦ),  $P_{TEC}(t)$  – потужність гідроелектростанцій,  $P_{GAEC}(t)$  – потужність гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС),  $P_{ВДЕ}(t)$  – потужність ВДЕ,  $P_{рез}(t)$  – потужність засобів і шляхів резервування електроенергії під час балансування,  $P_n(t)$  – навантаження трансформаторних підстанцій (ТП),  $\Delta P(t)$  – технологічні витрати в електричних мережах.

Якщо за критерій оптимальності прийняти сумарні витрати  $V_{рез}$  на резервування  $P_{рез}(t)$  в (1) несталого генерування ВДЕ, то з врахуванням реально можливих на сьогодні способів резервування задача мінімізації  $V_{рез}$  запишеться [9]:

$$V_{рез} = B_x(P_x) + B_в(P_в) + B_с(P_с) + B_n(P_n) + B_k(P_k) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $B_x(P_x)$  – витрати на резервування накопичувачами електрохімічного типу;  $B_в(P_в)$  – витрати на водневі технології;  $B_с(P_с)$  – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву;  $B_n(P_n)$  – витрати на користування системним резервом, що є фактично компенсацією за утримання резерву на енергоагрегатах ТЕС, що працюють за ціновими заявками;  $B_k(P_k)$  – витрати на запаси пропускної 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;  $P_x, P_в, P_с, P_n, P_k$  – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування.

Способи резервування ВДЕ можна класифікувати за декілька 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 та водневі технології. Останні за рахунок електролізу виробляють водень, який накопичується і в енергетичних установках за потрібним графіком може повертатися в ЕЕС у вигляді електроенергії. Перевагою водневих технологій є те, що так званий «зелений водень» може використовуватися в багатьох інших галузях окрім електроенергетики.

Для резервування нестабільності генерування ВДЕ може використовуватися 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.

Характеризуючи способи резервування, слід відмітити також наступне. Вартість накопичувачів електрохімічного типу, виробництво яких у світовій практиці є достатньо освоєним, постійно зменшується і тому нарощується їх потужність в енергосистемах. Водневі і біогазові технології як засоби резервування несталого генерування ВДЕ знаходяться на початковому етапі. Вартість їх не має чіткої тенденції до зменшення і залежить від застосування водню і біогазу в інших галузях. Щодо системного резерву, то в допустимих межах використання його для урівноваження несталого генерування ВДЕ його вартість

визначається інтересами електроенергетики. Якщо зберігається зацікавленість до розбудови ВДЕ в ЕЕС, то відповідно вартість  $B_c(P_c)$  має зменшуватися.

Враховуючи таку тенденцію резервування ВДЕ в ЕЕС, 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:

$$B_{рез} = \frac{C_1}{P_x} + C_2 P_g + C_3 P_e + \frac{C_4}{P_c} + C_5 \frac{P_x^2 P_c^2}{P_g P_e} \rightarrow \min, \quad (3)$$

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

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – 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 ( $g_c = 1/G_c$ );  $G_x$  – максимально доступна потужність накопичувачів електрохімічного типу ( $g_x = 1/G_x$ ).

Цільова функція (3) сформована за певних допущень. У виразі (3) не враховані деякі складові способів резервування задачі мінімізації  $B_{рез}$  з (2). Зокрема, це витрати на збільшення пропускної здатності ліній електропередачі, яка на початковому етапі вважається достатньою, та витрати на координацію графіків генерування і споживання електроенергії в ЕЕС, що в електричних мережах частково вже використовується. Останній член цільової функції (3) відображає витрати на покриття втрат електроенергії, які пов'язані з реалізацією засобів резервування. При цьому вважається, що накопичувачі електрохімічного типу і системний резерв розміщені централізовано.

Для аналізу системи резервування генерування ВДЕ використаємо методи теорії подібності, зокрема критеріального методу [10, 11]. Перевагою вибраного методу є те, що він дозволяє отримати критерії подібності, які зв'язують між собою однойменні параметри, в нашому випадку різних способів резервування, і створюються умови для аналізу співрозмірності і чутливості результатів розрахунків у відносних одиницях за обмеженої кількості вихідної інформації [12].

Задача (3) не відповідає умові канонічності [11], коли міра її складності  $s=m-n-l=0$ , де  $m$  – кількість членів цільової функції,  $n$  – кількість змінних  $P_i$ . У нашому випадку  $s=7-4-1=2$ . Згідно критеріальному методу запишемо систему ортогональних і нормованих (ортонормованих) рівнянь для (3) [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\pi_1 + 2\pi_5 + \pi_7 = 0; \\ \pi_2 - \pi_5 = 0; \\ \pi_3 - \pi_5 = 0; \\ -\pi_4 + 2\pi_5 + \pi_6 = 0; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1; \end{array} \right. \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Оскільки в цій системі рівнянь всі параметри дійсні і мають певні допустимі межі існування, то такі рівняння мають дійсну множину рішень стосовно двох (оскільки  $s=2$ ) з параметрів. Множину рішень можна будувати, прийнявши за базові будь-які зі складових резервування в (3). В нашому випадку доцільно за базові складові прийняти витрати на системний резерв як найбільш стійку і з якою можна порівнювати решту складових та витрати на електрохімічні накопичувачі, для яких встановилися цінові показники. Якщо прийняти витрати на користування системним резервом та на електрохімічні накопичувачі за базові змінні, то система рівнянь (4) розв'язується відносно  $\pi_6$  і  $\pi_7$ . Тоді, шляхом лінійних перетворень розв'язок системи рівнянь (4) і відповідна множина допустимих рішень відносно  $\pi_6$  і  $\pi_7$  отримується у вигляді:

$$\pi = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_n \begin{bmatrix} \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $\mathbf{b}_0$  – вектор нормалізації;  $\mathbf{b}_n$  – вектори нев'язки.

У нашому випадку 
$$\mathbf{b}_0 = \frac{1}{7} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_n = \frac{1}{7} \begin{bmatrix} -2 & 5 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ 5 & -2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Критерії подібності, які виражено через критерії  $\pi_6$  та  $\pi_7$ :

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{2}{7} - \frac{2}{7}\pi_6 + \frac{5}{7}\pi_7; \quad \pi_2 = \frac{1}{7} - \frac{1}{7}\pi_6 - \frac{1}{7}\pi_7; \quad \pi_3 = \frac{1}{7} - \frac{1}{7}\pi_6 - \frac{1}{7}\pi_7; \\ \pi_4 &= \frac{2}{7} + \frac{5}{7}\pi_6 - \frac{2}{7}\pi_7; \quad \pi_5 = \frac{1}{7} - \frac{1}{7}\pi_6 - \frac{1}{7}\pi_7. \end{aligned} \quad (7)$$

В критеріальній формі вираз оптимальних витрат (3) запишеться:

$$B_{рез*} = \frac{\pi_{10}}{P_{x*}} + \pi_{20}P_{\theta*} + \pi_{30}P_{\rho*} + \frac{\pi_{40}}{P_{c*}} + \pi_{50} \frac{P_{x*}^2 P_{c*}^2}{P_{\theta*} P_{\rho*}}, \quad (8)$$

де  $B_{рез*} = B_{рез} / B_{рез \min}$ ;  $P_{x*} = P_x / P_{x0}$ ,  $P_{\theta*} = P_{\theta} / P_{\theta0}$ ,  $P_{\rho*} = P_{\rho} / P_{\rho0}$ ,  $P_{c*} = P_c / P_{c0}$ , де  $P_x, P_{\theta}, P_{\rho}, P_c$  – відповідно поточні та оптимальні значення потужностей способів резервування.

З врахуванням значень критеріїв подібності з (7) вираз (8) перепишеться:

$$\begin{aligned} B_{рез*} &= \left( \frac{2}{7} \frac{1}{P_{x*}} + \frac{1}{7} P_{\theta*} + \frac{1}{7} P_{\rho*} + \frac{2}{7} P_{c*} + \frac{1}{7} \frac{P_{x*}^2 P_{c*}^2}{P_{\theta*} P_{\rho*}} \right) - \left( \frac{2}{7} \frac{1}{P_{x*}} + \frac{1}{7} P_{\theta*} + \frac{1}{7} P_{\rho*} - \frac{5}{7} P_{c*} + \frac{1}{7} \frac{P_{x*}^2 P_{c*}^2}{P_{\theta*} P_{\rho*}} \right) \pi_6 - \\ &- \left( -\frac{5}{7} \frac{1}{P_{x*}} + \frac{1}{7} P_{\theta*} + \frac{1}{7} P_{\rho*} + \frac{2}{7} P_{c*} + \frac{1}{7} \frac{P_{x*}^2 P_{c*}^2}{P_{\theta*} P_{\rho*}} \right) \pi_7. \end{aligned} \quad (9)$$

Відносне значення витрат на резервування генерування ВДЕ має три складові. Перша складова визначається оптимальними значеннями витрат на заходи резервування і їх співвідношеннями. Інші – залежать від потужностей системного резерву  $G_c$  і електрохімічних накопичувачів  $G_x$ . Якщо системний резерв і електрохімічні накопичувачі не використовуються, то  $B_{рез*}$  визначається тільки першою складовою:

$$B_{рез*} = \left( \frac{2}{7} \frac{1}{P_{x*}} + \frac{1}{7} P_{\theta*} + \frac{1}{7} P_{\rho*} + \frac{2}{7} P_{c*} + \frac{1}{7} \frac{P_{x*}^2 P_{c*}^2}{P_{\theta*} P_{\rho*}} \right). \quad (10)$$

З (10) видно, що якщо значення потужностей заходів резервування оптимальні, тобто у відносних одиницях всі  $P_{i*} = 1$ , то також  $B_{рез*} = 1$ . Це означає, що вираз (10) дозволяє аналізувати заходи резервування генерування ВДЕ на співрозмірність і чутливість  $B_{рез*}$  до відхилення потужностей  $P_{i*}$  від їх оптимальних значень у відносних одиницях [12].

Відповідно прийнятій моделі (3) доцільні витрат на урівноваження графіка генерування ВДЕ і її модифікованій моделі (10) оптимальні витрати на засоби резервування знаходяться у певному співвідношенні. Сумарні витрати будуть економічно доцільними, якщо вони розподіляться у таких пропорціях: витрати на водневі і біогазові технології будуть однакові, однаковими мають бути також витрати на електрохімічне акумулювання і використання системного резерву. Разом з тим, поки розвиваються водневі і біогазові технології доцільно користуватися системним резервом і електрохімічним акумулюванням, хоча це в два рази дорожче.

Такі результати отримані виходячи з того, що значення оптимальних критеріїв подібності не залежать від параметрів  $C_1, \dots, C_5$ . Що стосується узагальнених показників  $C_1, \dots, C_5$ , то вплив їх на економічно доцільні значення потужності  $P_{x*}, P_{\theta*}, P_{\rho*}, P_{c*}$  і на витрати  $B_{рез*}$  можна оцінити, визначивши їх значення із системи рівнянь, записаних згідно методу інтегральних аналогів з (3) з врахуванням (7) [10]:

Критеріальне рівняння (10) також дозволяє оцінити вплив вихідних даних на економічно доцільні значення витрат і потужності, які визначаються з кожного зі способів резервування, тобто дослідити чутливість витрат до зміни потужності. Воно дозволяє визначити зміни питомих витрат при зміні тієї чи іншої потужності, що оптимізується, тобто дослідити економічну стійкість витрат до зміни параметрів. На рис. 1, як приклад, наведено залежності чутливості витрат  $B_{рез*}$  до зміни потужності системного резерву та

до змін потужності водневих технологій. З рис. 1 видно, що коли потужність системного резерву  $P_c$  збільшити на 50%, то значення витрат збільшаться на 32,1%, а якщо вдвічі – то значення витрат збільшаться на 71,4%. Якщо  $P_c$  збільшити на 50%, то значення витрат збільшаться на 2,4%, що набагато менше ніж витрати на системний резерв.

$$\begin{cases} \frac{2}{7} - \frac{2}{7}\pi_6 + \frac{5}{7}\pi_7 = \frac{C_1}{B_{рез}P_x}; \\ \frac{1}{7} - \frac{1}{7}\pi_6 - \frac{1}{7}\pi_7 = \frac{C_2P_6}{B_{рез}}; \\ \frac{1}{7} - \frac{1}{7}\pi_6 - \frac{1}{7}\pi_7 = \frac{C_3P_2}{B_{рез}}; \\ \frac{2}{7} + \frac{5}{7}\pi_6 - \frac{2}{7}\pi_7 = \frac{C_4}{B_{рез}P_c}; \\ \frac{1}{7} - \frac{1}{7}\pi_6 - \frac{1}{7}\pi_7 = \frac{C_5P_x^2P_c^2}{B_{рез}P_6P_2}. \end{cases} \quad (11)$$

З системи рівнянь (11) для  $\pi_6 = 0$  і  $\pi_7 = 0$  знаходимо:

$$P_x = \left[ \frac{C_1^5}{8 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4^2 \cdot C_5} \right]^{\frac{1}{7}}; P_6 = \left[ \frac{C_1^2 \cdot C_3 \cdot C_4^2 \cdot C_5}{16 \cdot C_2^6} \right]^{\frac{1}{7}}; P_2 = \left[ \frac{C_1^2 \cdot C_2 \cdot C_4^2 \cdot C_5}{16 \cdot C_3^6} \right]^{\frac{1}{7}};$$

$$P_c = \left[ \frac{C_4^5}{8 \cdot C_1^2 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_5} \right]^{\frac{1}{7}}; B_{рез} = \frac{1}{7} \cdot \left[ 16 \cdot C_1^2 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4^2 \cdot C_5 \right]^{\frac{1}{7}}. \quad (12)$$

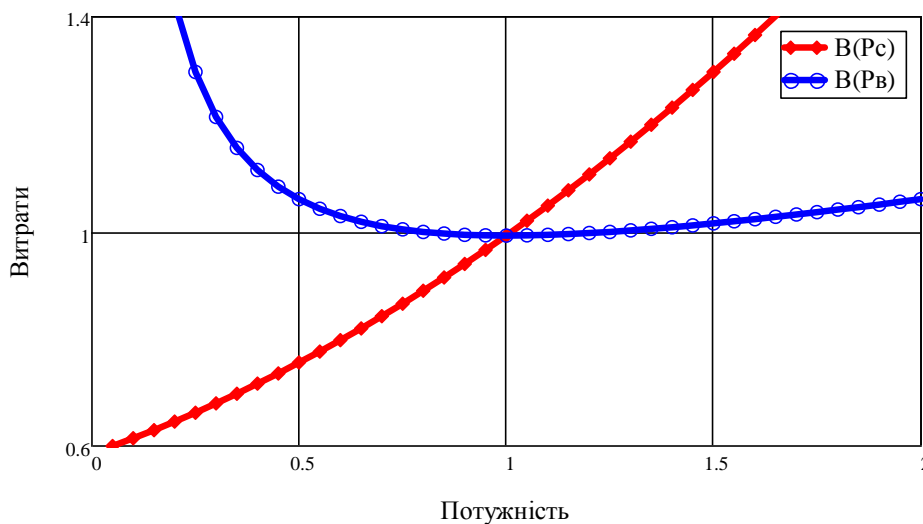


Рис. 1. Чутливість витрат до зміни потужності системного резерву (червона крива) та до змін потужності водневих технологій (синя крива)

З отриманих виразів (12) можна оцінити вплив зміни, наприклад  $C_1$ , на економічно доцільні значення усіх змінних. Вирази (12) показують, що економічно доцільні значення потужності, які визначаються з кожного зі способів резервування і витрат на їх реалізацію, залежать від прийнятого сценарію реалізації резервування. Тому економічно доцільні способи резервування та їх потужності, а також параметри реалізації кожного способу обираються з врахуванням їх взаємовпливу в системі. Наприклад, якщо  $C_1$  відносно базисного збільшиться на 20% при незмінних  $C_2, C_3, C_4, C_5$ , то сумарні витрати  $B_{рез}$  на урівноваження графіка генерування ВДЕ шляхом резервування зростуть на 40%.

### Висновки

Для перед проектного аналізу способів резервування відновлюваних джерел енергії з нестабільним генеруванням в задачі балансування режимів електроенергетичних систем під час розбудови їх в електричних мережах енергосистем доцільно використовувати критеріальний метод, побудований на основі теорії подібності. Такий підхід дає можливість у відносних одиницях оцінити переваги того чи іншого способу резервування і встановити їх оптимальні потужності за даних вартісних характеристик. Результати оптимізації, отримані в критеріальній формі, дозволяють аналізувати відносну співрозмірність і чутливість складових цільової функції, в нашому випадку витрат на способи резервування нестабільного генерування ВДЕ. Результати співрозмірності дають можливість ранжувати способи резервування генерування ВДЕ за витратами, а чутливість – раціонально, найбільш ефективно використовувати потужності різних способів під час експлуатації.

### Список використаних джерел

1. Буславець О.А., Лежнюк П.Д., Черемісін М.М. Інформаційне забезпечення задач зменшення втрат електроенергії в електричних мережах: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 184 с.
2. Блінов І. В., Мірошник В. А., Шиманюк П. В. Оцінка вартості похибки прогнозу «На добу наперед» технологічних втрат електричної енергії // Технічна електродинаміка. – 2020.– №5. – С. 70–73. doi.org/10.15407/techned2020.05.070
3. Petro Lezhniuk, Olexander Rubanenko, Olena Rubanenko. Determination of Optimal Transformation Ratios of Power System Transformers in Conditions of Incomplete Information Regarding the Values of Diagnostic Parameters. – Chapter of book: “Fuzzy Logic” . – 2019. – p. 1-29. doi: 10.5772/intechopen.84959.
4. Про затвердження Кодексу системи передачі, 2018. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=31909> (Дата звернення: 15.09. 2020).
5. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Гунько І. О. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 164 с.
6. M. Bertolini, M. Buso, and L. Greco, "Competition in smart distribution grids," *Energy Policy*, vol. 145, p. 111729, 2020/10/01/ 2020.
7. Відновлювані джерела енергії : монографія / С. О. Кудря, Н. М. Мхітарян, В. Ф. Рєзцов, Т. В. Суржик та ін.; за ред. С. О. Кудрі. Київ : ІБЕ НАН України, 2020. –392 с.
8. <https://ua.energy/> – сайт ПрАТ «Національна енергетична компанія „Укренерго“» (НЕК «Укренерго»).
9. 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, №2, pp. 12–17.
10. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
11. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение критеріального метода в электроэнергетике. – Киев: УМК ВО, 1989. – 140 с.
12. Petr Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Olena Rubanenko, Natalia Ostra. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources // *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol 2020, №10, page 32–38. DOI: 10.15199/48.2020.10.05.

**P. Lezhniuk**<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000 0002 9366 3553

**V. Komar**<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000 0003 4969 8553

**K. Povstianko**<sup>1</sup>, PhD student, ORCID 0000 0002 5501 662X

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

### RELATIVE ASSESSMENT OF THE COST OF RESERVATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

*The generation of electricity by solar and wind power plants depends on natural conditions, and therefore there are problems with their participation in the process of balancing the modes of electric power systems (EPS). It is difficult for them to carry out the forecasted and approved hourly generation schedule for the next day with the specified accuracy. The UES is forced to keep a capacity reserve to compensate for deviations of renewable energy sources (EPS) from the projected generation schedule. Since these deviations can be both larger and smaller than the permissible ones, it is by this criterion that we can choose and form a means to balance the EPS regimes. The paper proposes a method for researching backup measures of renewable energy sources with unstable generation in EPS. The criterion of optimality for comparing RES reservation methods is their relative costs*

*Among the ways of reserving RES, system reserve is generally used (mainly the maneuverable capacities*

of thermal and hydroelectric power plants), but since it is not enough, it is suggested to use other means of reserving power available today: electrochemical electricity storage, hydrogen and biogas technologies.

Mathematical models based on the theory of similarity and the criterion method have been developed to analyze the technical and economic efficiency of certain means of reservation. The criterion method is preferred due to the fact that, with minimal available initial information, it provides an opportunity to compare different methods of reserving RES generation and determine the optimal ones. The method makes it possible to assess their proportionality, as well as to determine the sensitivity of costs to the power of reservation methods.

Criterion models have been formed that make it possible to build the dependence of the costs and reserve means of variable RES generation on the capacity of the reserve means.. Such dependencies make it possible to more reasonably choose certain reservation methods at the first stage in accordance with the characteristics and requirements of the UES. They can be clarified if the price indicators that are valid at the moment and for the near future are known.

**Keywords:** electric power system, renewable energy sources, lack of generation, means of reservation, similarity theory, criterion method.

### References

1. Buslavets O.A., Lezhnyuk P.D., Cheremisin M.M. Information provision of the tasks of reducing electricity losses in electrical networks: monograph. – Vinnytsia: VNTU, 2020. – 184 p.
2. Blinov I. V., Mirosnyk V. A., Shymanyuk P. V. Estimation of the cost of the error of the forecast "One day ahead" of technological losses of electrical energy // Technical electrodynamics. – 2020.– №5. – P. 70–73. doi.org/10.15407/techned2020.05.070
3. Petro Lezhniuk, Olexander Rubanenko, Olena Rubanenko. Determination of Optimal Transformation Ratios of Power System Transformers in Conditions of Incomplete Information Regarding the Values of Diagnostic Parameters. – Chapter of book: "Fuzzy Logic". – 2019. – p. 1-29. doi: 10.5772/intechopen.84959.
4. On the approval of the Transmission System Code, 2018. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=31909> (Application date:15.09. 2020).
5. Lezhnyuk P.D., Rubanenko O.E., Gunko I.O. Optimization of modes of electrical networks with renewable sources of electricity: monograph. – Vinnytsia: VNTU, 2017. – 164 p.
6. M. Bertolini, M. Buso, and L. Greco, "Competition in smart distribution grids," *Energy Policy*, vol. 145, p. 111729, 2020/10/01/ 2020.
7. Renewable energy sources: monograph / S. O. Kudrya, N. M. Mkhitarian, V. F. Ryzetsov, T. V. Surzhik, and others.; under the editorship S. O. Kudri. Kyiv : NAS Ukraine 2020. –392 p.
8. <https://ua.energy/> – website of PrJSC "National Energy Company "Ukrenergo"" (NPC «Ukrenergo»).
9. 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, №2, pp. 12–17.
10. Venikov V.A. Theory of similarity and modeling. – M.: Graduate School, 1976. – 479 p.
11. Astakhov Yu.N., Lezhnyuk P.D. Application of the criterion method in the electric power industry. – Kyiv: 1989. – 140 c.
12. Petr Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Olena Rubanenko, Natalia Ostra. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources // Przegląd Elektrotechniczny, Vol 2020, №10, page 32–38. DOI: 10.15199/48.2020.10.05.

Надійшла 15.11.2022

Received 15.11.2022