

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. О. Комар, к. т. н., доц.; С. В. Кравчук
ОЦІНЮВАННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ГЕНЕРУВАННЯ СОНЯЧНИХ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ У ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЛАНСОВОЇ
НАДІЙНОСТІ

У статті проаналізовано роботу сонячних електричних станцій з огляду на можливість забезпечення графіка споживання. Для цього використано математичну модель гаусових сумішей, що дозволяє отримати основні ймовірнісні характеристики процесів генерування та електроспоживання. Розроблено алгоритм оцінювання коефіцієнта стабільності, що ґрунтується на аналізі отриманих характеристик. З урахуванням результатів аналізу стабільності генерування за запропонованим методом визначено потужність резерву, що дозволяє забезпечити балансову надійність під час покриття графіка електроспоживання.

Ключові слова: сонячна електростанція, балансова надійність, ймовірнісні характеристики, гаусові суміші, потужність резерву, стабільність генерування.

Вступ

Графік генерування електричної енергії відновлюваними джерелами безпосередньо залежить від природних особливостей регіону, у якому вони розташовані. Ця особливість відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) призводить до певних проблеми під час розв'язання задачі забезпечення надійного і якісного електропостачання споживачів. Державне стимулювання розвитку ВДЕ та відносно здешевлення обладнання для розбудови останніх призвело до зростання їх частки в балансі ОЕС України. У таких умовах необхідно розв'язувати задачу узгодження графіків електроспоживачів із графіками генерування ВДЕ для підвищення ефективності функціонування як споживача, так і електричної мережі. Це призвело б до зниження використання органічного палива і, як наслідок, до зменшення негативного впливу на екологію.

Отримати бажаний ефект від узгодження графіків споживання й генерування неможливо без застосування засобів для реалізації Smart Grid технологій [1]. Однак "розумне" ведення режиму не можливе без попереднього оцінювання потенційних можливостей джерела енергії з покриття потреб споживачів у електроенергії.

Метою цієї роботи є розроблення методу оцінювання стабільності покриття заданого графіка споживання потенційно можливим генеруванням сонячної електростанції (СЕС) та визначення потужності джерела резерву за результатами проведеного оцінювання.

Оцінювання стабільності СЕС

Оцінювання стабільності роботи ВДЕ досліджували в низці праць [2, 3, 4]. Так у [2] для визначення стабільності покриття графіка споживання джерелом відновлюваної енергії запропоновано ввести коефіцієнт стабільності. Він характеризує ймовірність покриття графіка навантаження джерелом енергії певної потужності та графіка генерування

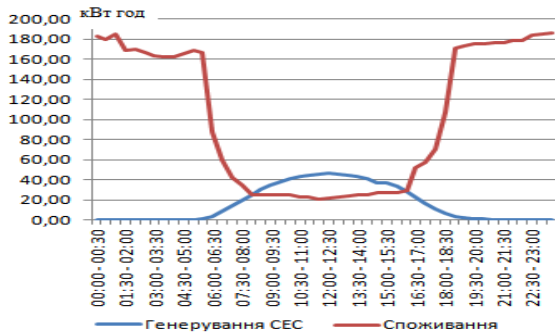
$$k_{\text{стаб}} = \sum_{i=1}^{24} \left[p_{\text{доб}i} \sum_{j \in M} \left(p_{\text{ВДЕ}j} \sum_{l \in N} p_{\text{спож}l} \right) \right], \quad (1)$$

де $p_{\text{доб}}$ – ймовірність появи ступеня добового графіка $p_{\text{доб}} = \frac{1}{24}$; $p_{\text{ВДЕ}}$ – ймовірність появи ступеня генерації протягом заданого періоду; M – множина ненульових ступенів генерування; $p_{\text{спож}}$ – ймовірність появи ступеня споживання протягом заданого періоду; N –

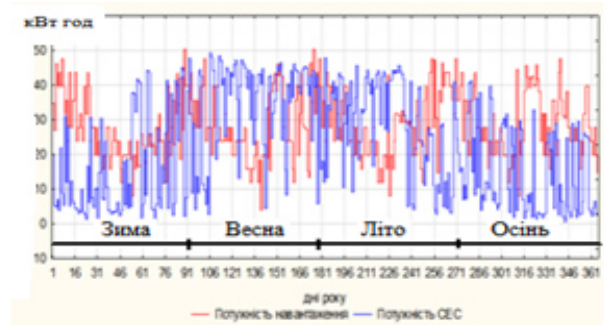
множина ступенів споживання нижче рівня генерації відповідного періоду доби.

До переваг цього методу визначення коефіцієнта стабільності належить відносна простота, однак такий підхід певним чином обмежений під час розв'язання задач прогнозування. У статті запропоновано вдосконалити цей метод використання суміші нормальних законів розподілу.

Виходячи з того, що СЕС змінюють свою потужність генерування протягом доби (рис. 1а) та року (рис. 1б) пропонуємо здійснювати оцінювання стабільності покриття графіка споживання по сезонах.



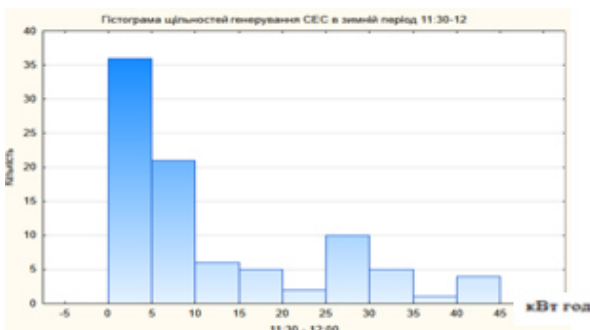
а)



б)

Рис. 1. а) добовий графік споживання та генерування СЕС, б) зміна потужностей генерування та споживання протягом року

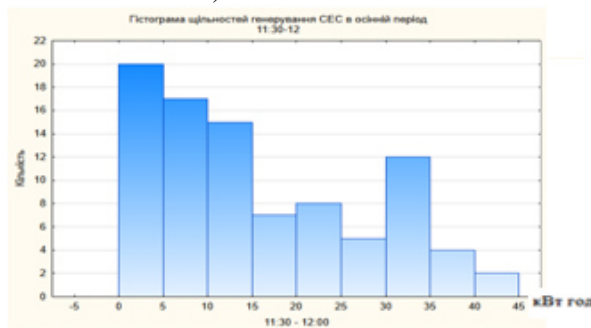
Як видно з рис. 2, перехід до сезонного аналізу стабільності є обґрунтованим. Оскільки в період максимального генерування СЕС взимку (рис. 2а) найімовірніша потужність СЕС перебуває в межах 10...30% від установленної. У літній період найімовірніше значення потужності СЕС перебуває в діапазоні від 70 – 85%.



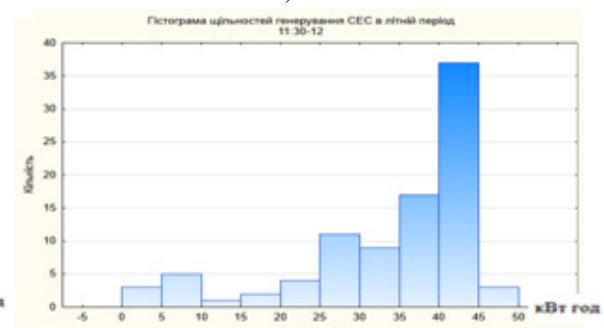
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Гістограма щільностей генерування СЕС по сезонах: а) зима, б) весна, в) осінь г) літо

Для визначення необхідного об'єму резервування стабільність оцінюватимемо не лише по сезонах, але й на кожному часовому проміжку. Проілюструємо оцінювання стабільності

генерування СЕС на прикладі літнього періоду на часовому проміжку від 11:30 до 12:00 (рис. 3).

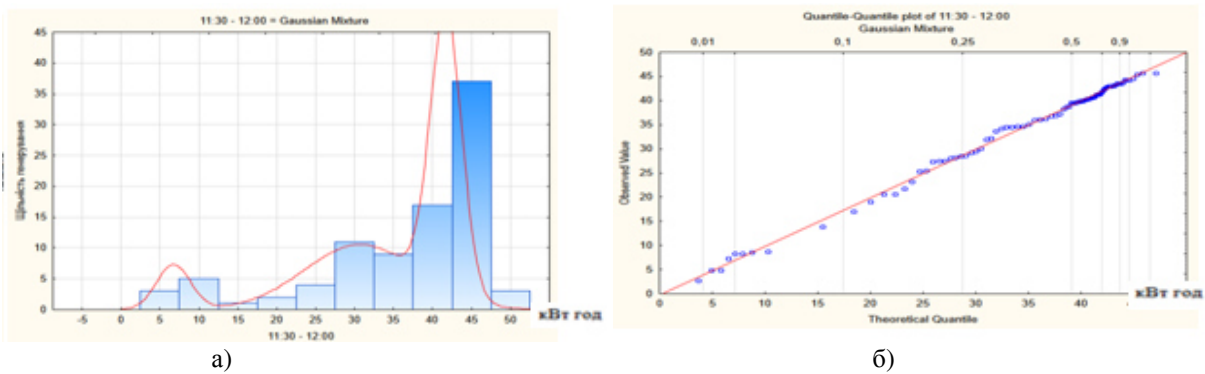


Рис. 3. а) гаусова суміш, що описує закон розподілу генерування СЕС, б) графік типу квантіль-квантіль для теоретично запропонованого закону розподілу

Для запропонованого розподілу, як описано в [5], пораховано критерій Колмогорова – Смірнова, який показує відповідність теоретично запропонованого розподілу емпіричним даним, оскільки $p=0,98$, що значно більше за $0,05$. З рис. 3 а видно, що достатньо точно відтворення щільності випадкової величини можна отримати сумішшю з трьох компонент гаусового розподілу.

Оцінювання ймовірнісних характеристик запропонованої суміші здійснюємо за критерієм максимуму правдоподібності за допомогою ЕМ-алгоритму [6].

$$p(x) = \sum_{j=1}^k w_j p_j(x), \tag{2}$$

де $p_j(x)$ – функція щільності розподілу j -тої компоненти суміші, w_j – вага j -тої компоненти суміші (апріорна ймовірність), $\sum_{j=1}^k w_j = 1$, $w_j \geq 0$, $j = 1 \dots k$ – кількість компонент у суміші.

Функція щільності розподілу має вигляд:

$$p_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{k}{2}} |\zeta_j|^{\frac{1}{2}}} e^{\left(-\frac{1}{2}(x-\mu_j)^T \zeta_j^{-1}(x-\mu_j)\right)}, \tag{3}$$

де μ_j – математичне очікування j -тої компоненти, ζ_j – коваріаційна матриця j -тої компоненти, що має зміст середньоквадратичного відхилення.

Функції правдоподібності належать параметричному сімейству розподілів $\varphi(x; \theta)$ і відрізняються тільки значеннями параметрів $p_j(x) = \varphi(x; \theta_j)$, $\theta_j = \{\mu_j, \zeta_j\}$, при цьому φ – фіксована функція. Іншими словами, вибрати об’єкт x з суміші $p(x)$ означає вибрати його із розподілу $p_j(x)$ з імовірністю w_j .

Задачу розщеплення суміші розв’язують, коли, маючи вибірку X^m випадкових величин із суміші $p(x)$, знаючи число k і функцію φ , потрібно оцінити вектор параметрів

$$\Theta_j = (w_j, \theta_j). \tag{4}$$

Оптимальну кількість компонент у загальній моделі суміші гаусового розподілу можна отримати шляхом перебору можливих варіантів. При цьому розв’язуємо задачу декілька

разів для поступового збільшення (зменшення) значень k , для якого будуємо графік залежності правдоподібності $\theta_j = \arg \max_{\theta} \sum_{x_i \in X^m} \ln \varphi(x_i, \theta_j)$ від k і обираємо найменше k , за якого графік відображає різкий стрибок правдоподібності (рис. 4).

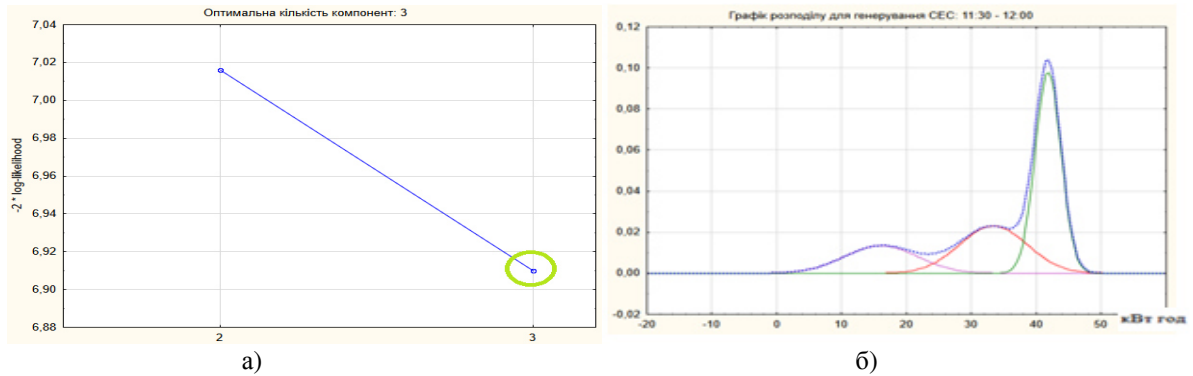


Рис. 4. а) Визначення оптимальної кількості компонент суміші розподілу потужності генерування СЕС, б) зображення розподілу потужності генерування СЕС

Результати визначення ймовірнісних характеристик генерування СЕС та навантаження зведено до таблиці 1.

Таблиця 1

Результат визначення ймовірнісних характеристик потужності генерування СЕС та споживання

Параметри	Генерування СЕС			Споживання	
	K1	K2	K3	K1	K2
Математичне очікування, μ	12,65	31,88	41,79	21,913	37,36
Середнє відхилення, σ	3,09	3,86	1,92	5,378	2,98
Коефіцієнт варіації, V	0,244	0,12	0,046	0,24	0,08
Вага, w	0,19	0,31	0,5	0,81	0,19
Мінімальне значення	2	25,36	38,196	7,2	33
Максимальне значення	23,16	37,18	45,76	32,41	44,32

Для оцінювання покриття заданого графіка споживання генеруванням СЕС пропонуємо розбити кожен компоненту генерування та навантаження на складники, що значно підвищить точність розрахунку, і знайти ймовірність їх появи за допомогою інтегралу ймовірності:

$$F(X_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_u}^{X_{u+1}} e^{-\frac{r^2}{2}} dX_u, \tag{5}$$

де $r = \frac{(X_u - \mu)}{\sigma}$, а X_u відповідно набуває значення X_u та X_{u+1} кожного складника компоненти генерування СЕС чи споживання.

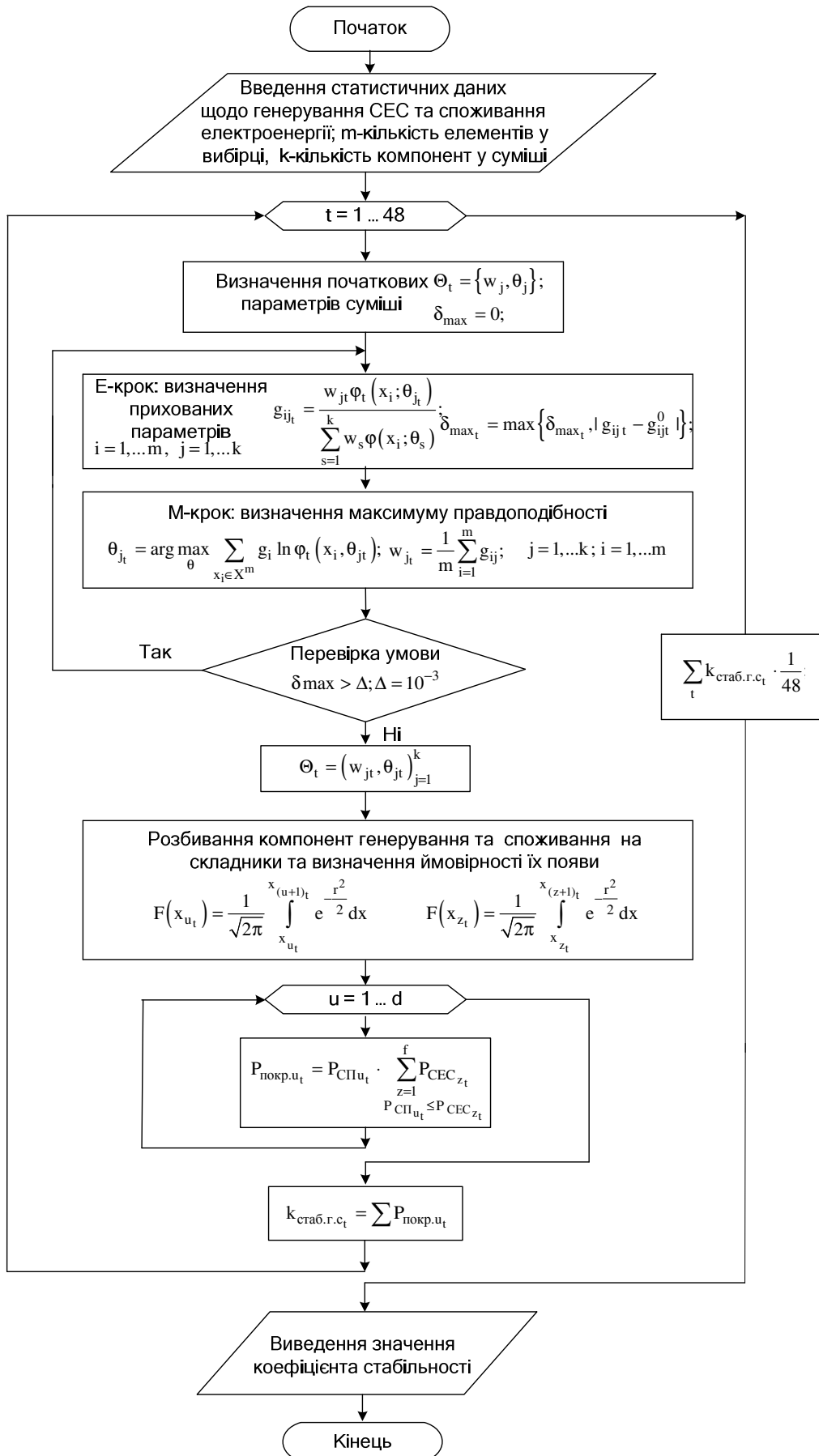


Рис. 5. Алгоритм визначення коефіцієнта стабільності генерування СЕС

Запропонований алгоритм визначення коефіцієнтів стабільності генерування СЕС (рис. 5) дозволить визначити ймовірність забезпечення балансової надійності.

Розподіл щільності генерування й навантаження для прикладу, який розглядають на проміжку часу 11:30 – 12:00, показано на рис. 6а. Характер зміни ймовірностей показано на рис. 6б.

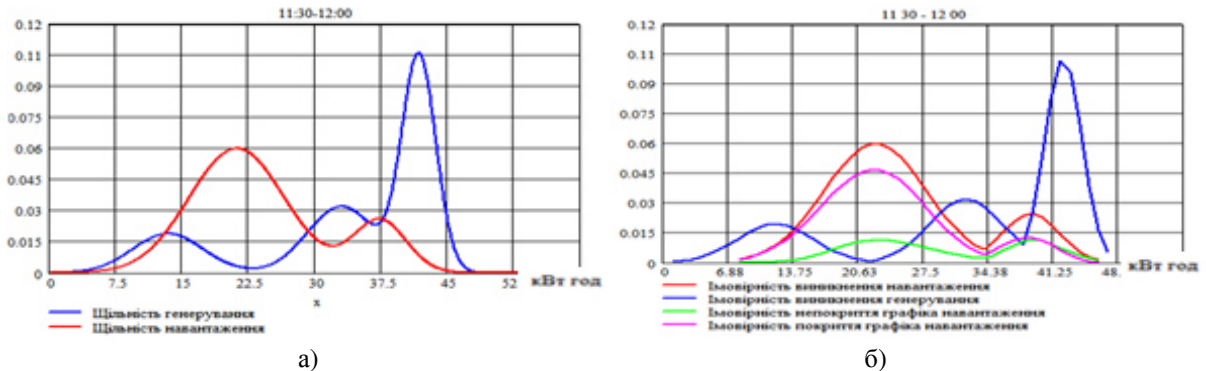


Рис. 6. а) щільність розподілу потужності споживання та генерування СЕС; б) графічне представлення ймовірності покриття та непокриття заданого графіка споживання генеруванням СЕС

На проміжку часу 11:30 – 12:00 літнього періоду ймовірність покриття графіка споживання становить $\sum_u P_{покр_u} = 0.72$. Результати розрахунку й характер їх зміни показано на рис. 7.

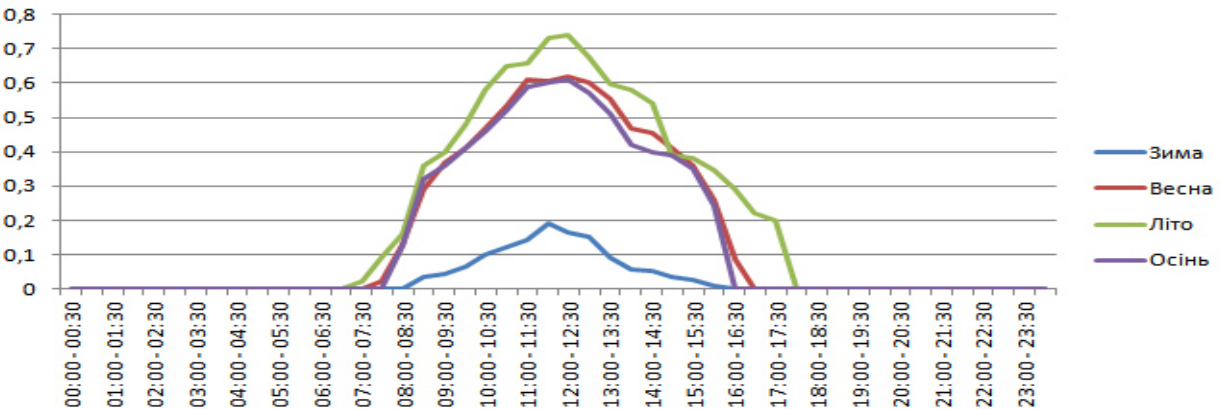


Рис. 7. Зміна ймовірності покриття графіка споживання генеруванням СЕС протягом доби кожного сезону

Узагальнений показник стабільності визначений за алгоритмом, показаним на рис. 5, і визначений за (1) для різних сезонів. Отримані дані зведені до таблиці 2.

Таблиця 2

Результати визначення коефіцієнтів стабільності генерування СЕС

Коефіцієнти	Зима	Весна	Літо	Осінь
$k_{стаб.г.с.}$	0,025	0,151	0,191	0,143
$k_{стаб.}$	0,031	0,160	0,201	0,151

Відмінність у результатах пояснюють допущенням про однакову ймовірність появи кожного із ступенів генерування й навантаження, яке прийнято у [2]. Це допущення спрощує процес обчислення, але призводить до певної похибки в результатах. Найбільш відчутний цей недолік під час визначення коефіцієнта стабільності для зимового періоду.

Визначення потужності резерву

Одним з основних шляхів забезпечення балансової надійності є резервування, тому питання визначення необхідного рівня резерву в умовах упровадження відновлюваних джерел електроенергії, генерування яких є нестабільним, особливо актуальне.

Для забезпечення балансової надійності споживача визначаємо кількість електроенергії, яку має забезпечувати джерело резерву на t -ому проміжку часу доби кожної пори року, з урахуванням коефіцієнта стабільності:

$$W_{рез_t} = (1 - k_{стаб.г.с_t}) \cdot W_{СП_{макс_t}}, \quad (6)$$

де $W_{рез_t}$ – кількість електроенергії, що має бути відпущена джерелом резерву на t -ому проміжку часу доби, $k_{стаб.г.с}$ – коефіцієнт стабільності генерування, визначений за алгоритмом (рис. 5), $W_{СП_{макс_t}}$ – максимальна кількість електроенергії, яка була спожита на t -ому проміжку часу доби.

За величиною електроенергії, яка має бути відпущена за півгодини, використовуючи відомі формули [7], можна перейти до величин потужностей джерела резерву.

Генерування СЕС залежить від зміни тривалості світлового дня, у свою чергу останній залежить від зміни сезонів, тому в роботі аналізуємо зміну потужності резерву для кожного сезону окремо й відповідно з різною тривалістю роботи СЕС. Для літа кількість робочих годин СЕС найбільша, для зими – найменша.

Зміна величини резервованої потужності протягом доби для зими, весни, літа та осені представлено у вигляді кривих (рис. 8).

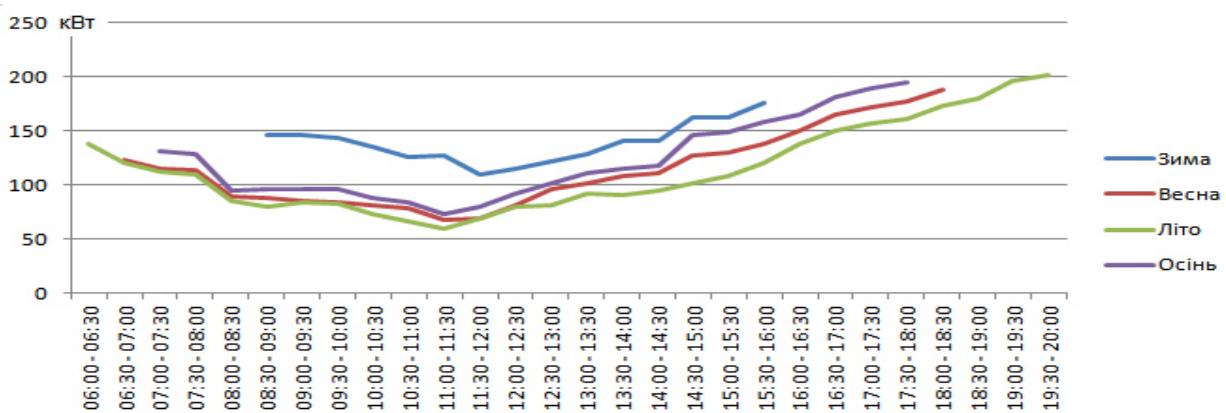


Рис. 8. Залежність резервованої потужності від періоду доби для зими, весни, літа та осені

За отриманими кривими можна визначити маневрені характеристики джерела резервної потужності і його потужність на кожному проміжку часу.

Висновки

Державне стимулювання й відносно здешевлення на ринку обладнання для відновлюваних джерел енергії сприяють їх інтенсивній розбудові. Однак залежність їх роботи від природних умов не дозволяє гарантувати споживачам надійне постачання електроенергії без резерву, який забезпечують джерела традиційної енергетики.

У статті проведено аналіз статистичних даних із генерування сонячними електричними станціями. Для аналізу ймовірності покриття графіка навантаження було вдосконалено метод визначення коефіцієнта стабільності шляхом використання моделі гаусових сумішей. Це

дозволило підвищити точність отриманих результатів.

Розроблений у роботі алгоритм визначення коефіцієнта стабільності дозволяє визначити характер зміни резервованої потужності впродовж доби й у подальшому оцінити маневрені характеристики джерела резерву і його потужність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Agarwal Y. Understanding the role of buildings in a smart microgrid / Y. Agarwal, T. Weng, R. Gupta // 2011 Design, Automation & Test in Europe. – 2011. – P. 1 – 6.
2. Lezhniuk P. D. Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system / P. D. Lezhniuk, V. A. Komar, D. S. Sobchuk // Energy and Power Engineering. – 2014. – Vol. 6. – No. 3. – P. 37 – 46.
3. Кузнецов Н. П. Прогнозирование производства электроэнергии ветровыми электростанциями / Н. П. Кузнецов // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 8. – С. 54 – 58.
4. Попов В. А. Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / В. А. Попов, Е. С. Ярмолюк, П. А. Замковой // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2. – P. 61 – 68.
5. Айвазян С. А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
6. Jeroen, K. An EM algorithm for the estimation of parametric and nonparametric hierarchical nonlinear models /K. Jeroen// Statistica Neerlandica. – 2004. – Vol. 58. – No. 2. – P. 220 – 233.
7. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – К. : Техніка, 1981. – 160 с.

Лежнюк Петро Дем'янович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електричних станцій і систем, e-mail: lpd@inbox.ru.

Комар В'ячеслав Олександрович – к. т. н., доцент, доцент кафедри електричних станцій і систем, e-mail: kvo76@mail.ru.

Кравчук Сергій Васильович – аспірант кафедри електричних станцій і систем, e-mail: w1_1992@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.