

УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14

## ОЦІНЮВАННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В ЗАДАЧІ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

П. Д. ЛЕЖНІЮК, В. О. КОМАР\*, С. В. КРАВЧУК

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА  
\*e-mail: kvo76@mail.ru

**АНОТАЦІЯ.** В роботі розглядається питання аналізу імовірнісних характеристик генерування відновлювальних джерел електроенергії, зокрема сонячних електричних станцій (СЕС). Проаналізовано закон розподілу генерування сонячної електростанції для певного проміжку часу доби протягом року. Представлена математична модель гаусових сумішей, що дозволяють отримати основні характеристики імовірнісного характеру генерування сонячної електростанції. Оцінено можливість узгодження генерування сонячної електростанції з добовими графіками споживання. Визначено імовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням СЕС протягом певного часу доби впродовж всього року

**Ключові слова:** потужність генерування, сонячні електростанції, графік навантаження, активний споживач, гаусові суміші розподілу, імовірнісні характеристики.

## EVALUATION OF PROBABILISTIC GENERATION CHARACTERISTICS OF SOLAR POWER PLANTS IN THE PROBLEM OF INTELLECTUALIZATION OF LOCAL ELECTRIC SYSTEMS

P. LEZHNIUK\*, V. KOMAR, S. KRAVCHUK

Department of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, UKRAINE.

**ABSTRACT** Growth of the share of renewable sources of energy in electric energy balance of the country is stipulated both by state preferences and certain reduction of the prices at the world market for the elements of such sources. Solar power plants are developing at a rapid pace. Some consumers start to construct plants of direct conversion of solar energy as a means to provide certain level of energy independence. These consumers leave the group of "passive" and join the group of "active" users and are able to influence the operation mode of local energy system.

In new conditions the coordination of the work of active consumers, sources of distributed generation and distributive electric network is impossible without intellectualization of the process of generation, distribution and consumption on the level of local electric system, using Smart Grid technologies.

Greater part of renewable sources of energy is represented by solar power plants (SPP). Their operation mode depends on natural conditions of the region, where they are located. That is why the problem of SPP stability estimation is important in the problem of covering the daily schedule of energy consumption. The aim of the research is to evaluate the probability of providing the consumption schedule by means of corresponding source on the base of statistic data.

The authors try to solve the given problem, using EM algorithm. The authors could not select the law of SPP generation distribution, applying direct analysis of statistical data, that would satisfy the character of data change, it is suggested to divide the data into the series of mixtures, each of which would correspond to normal law. EM algorithm enables to select optimal, by the criterion of maximum of probability, amount of mixtures. By the values of characteristics of these mixtures the probabilities of emergence both of certain generation and consumed power could be obtained. To reduce the negative impact of random factors, characteristic for certain periods of the day, statistic data were considered by half hour periods of the day.

As a result, the authors succeeded in determining the general coefficient of source stability. Probabilities of covering the possible load in determined period of the day are defined. It enables further to evaluate necessary volume of reserve and start-stop characteristics of energy sources that can be used as the reserve..

**Keywords:** power generation, solar power, load schedule, active consumer, Gaussian mixture distribution, probability characteristics.

### Вступ

Відсоткова частка відновлюваної енергетики в балансі країн Європи і України, зокрема, продовжує зростати. Одним з визначальних чинників цього процесу є державне стимулювання та відносно здешевлення відновлюваних джерел енергії.

Доступність відновлюваних джерел енергії відкриває нові можливості для споживачів на шляху

до їх енергонезалежності [1]. Поява власного джерела енергії у споживача дозволяє перейти йому від пасивного до активного учасника енергоринку.

Для енергетики України актуальним є створення загальних методологічних засад і засобів докорінної модернізації розподільних електричних мереж таким чином, щоб впровадження нових технологій, формування мікромереж (microgrid) [2], як перспективного напрямку використання

розосередженої генерації (РГ) приносили максимальний позитивний ефект у плані покращення техніко-економічних та надійнісних [3] показників їх функціонування [4].

Значна частина приросту потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні з початку 2015 року, припадає на генерування електроенергії СЕС та 6% від цього приросту на СЕС, що встановлені безпосередньо у споживача. Збільшення кількості джерел ВДЕ супроводжується виникненням додаткових ризиків, пов'язаних з їх імовірнісною природою і менш стабільними характеристиками, що може призвести до зниження надійності електропостачання [5, 6, 7] та якості електроенергії [8]. Для зменшення вказаних ризиків необхідно здійснювати двосторонню комунікацію, більш інтенсивно впроваджувати інформаційне забезпечення та «інтелектуальний» контроль.

### Мета роботи

Зростання частки відновлюваних джерел енергії, зокрема СЕС, у балансі енергетичної системи країни вимагає розв'язання задачі оцінювання стабільності СЕС і можливості останніх забезпечувати надійне і якісне електропостачання. Принциповою є інформація щодо стабільності джерела в задачі розробки режиму функціонування активного споживача. Отож метою даної роботи є оцінювання показника стабільності на основі імовірнісних характеристик генерування СЕС та споживачів.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо статистичні дані добової потужності генерування електроенергії СЕС та потужності навантаження (рис.1) протягом 2013 року в розрізі кожної доби в проміжок часу 12:30 - 13:00 (рис.2), опрацювання та аналіз даних здійснюється в статистичному програмному середовищі Statistica. Маємо статистичну вибірку  $m=365$  (кількість днів в році), по значенням генерованої потужності СЕС та потужність навантаження визначаємо закон розподілу випадкової величини.

Річний графік генерування (рис. 2) говорить про невисоку здатність СЕС самостійно покривати графік навантаження протягом всього року [9]. У [10] оцінювати імовірність покриття заданого графіка навантаження пропонується за допомогою коефіцієнта стабільності.

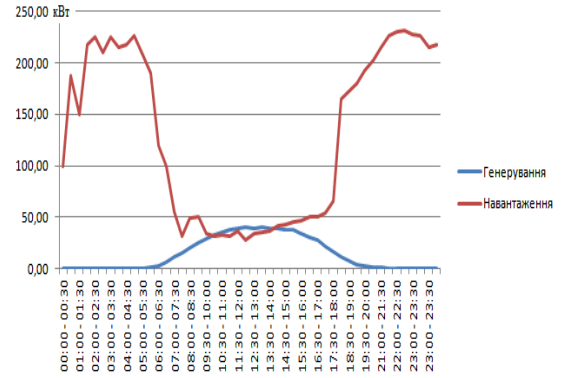


Рис. 1 – Добовий графік навантаження та генерування СЕС

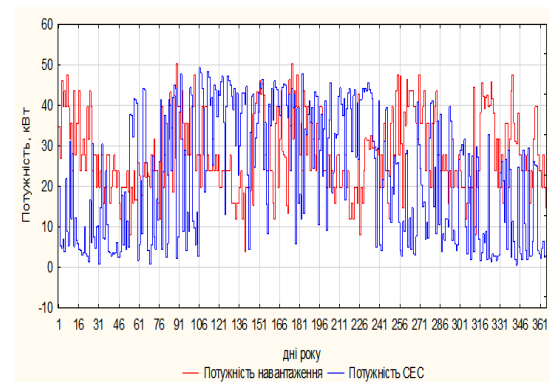


Рис. 2 – Річний графік навантаження та генерування СЕС в проміжку часу 12:30-13:00

Для визначення імовірнісних характеристик потужності генерування СЕС (рис.3) та потужності навантаження (рис.5) визначаємо закон розподілу величини.

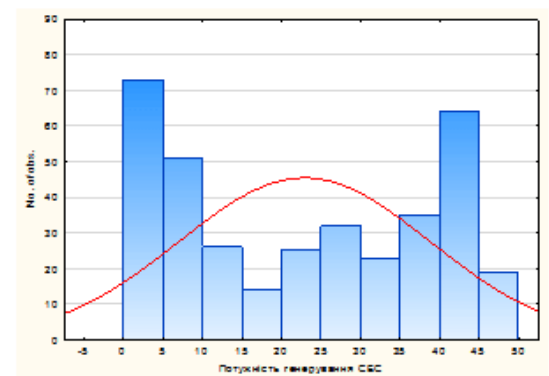


Рис. 3 – Гістограма щільностей потужності генерування СЕС

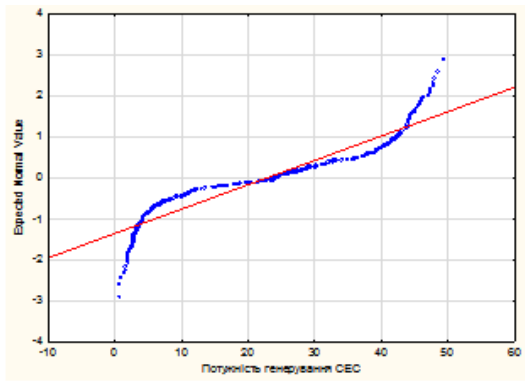


Рис. 4 – Перевірка на нормальність розподілу потужності генерування СЕС

Гістограма щільності потужності генерування (рис. 3), має полімодальний закон розподілу (наявність двох і більше мод вибірки). Така полімодальність може бути викликана залежністю графіка генерування СЕС від змінних погодних умов або сезонних змін.

Провівши перевірку на нормальність для розподілу потужності генерування СЕС (рис. 4) робимо висновок про невідповідність даних розподілів нормальному закону.

Проводимо аналіз графіка навантаження в заданий проміжок часу (12:30 – 13:00).

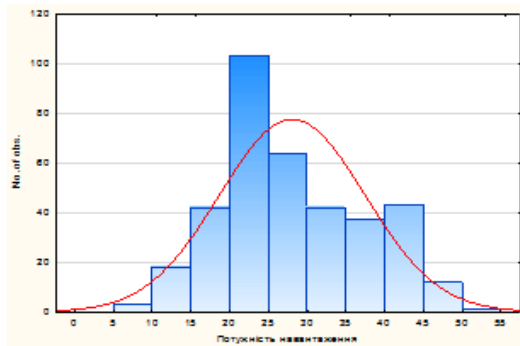


Рис. 5 – Гістограма щільностей потужності навантаження

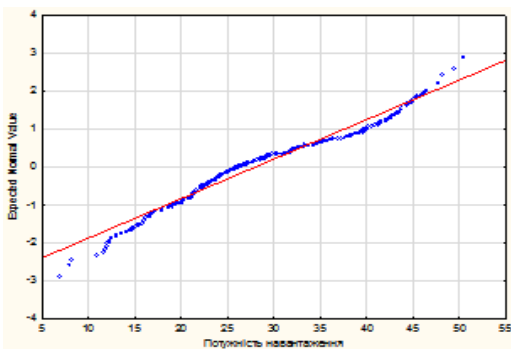


Рис. 6 – Перевірка на нормальність розподілу потужності навантаження

Як видно (рис. 3, рис. 5) графіки генерування СЕС та навантаження мають полімодальні закони розподілу.

В тих випадках, коли «форму» розподілу не вдається описати одним розподілом, можна описати її за допомогою суміші розподілів. Серед інших, можна виділити модель гаусової суміші [11], яка представляє собою зважену суму  $k$  компонентів, щільність розподілу якого має вигляд:

$$p(x) = \sum_{j=1}^m w_j p_j(x), \quad (1)$$

де  $p_j(x)$  – функція щільності розподілу  $j$ -тої компоненти суміші,  $w_j$  – вага  $j$ -тої компоненти суміші

(апріорна імовірність)  $\sum_{j=1}^k w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1 \dots k$  –

кількість компонент в суміші.

Функція щільності розподілу має вигляд:

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

де  $\mu_j$  – математичне очікування  $j$ -тої компоненти,  $\zeta_j$  – коваріаційна матриця  $j$ -тої компоненти, що має зміст середньоквадратичного відхилення.

Функції правдоподібності належать параметричному сімейству розподілів  $\varphi(x; \theta)$  і відрізняються тільки значеннями параметра  $p_j(x) = \varphi(x; \theta_j), \theta_j = \{\mu_j, \Sigma_j\}$  при цьому  $\varphi$  – фіксована функція.

Іншими словами, вибрати об'єкт  $x$  із суміші  $p(x)$  означає вибрати його із розподілу  $p_j(x)$  з імовірністю  $w_j$ .

Задача розщеплення суміші вирішується коли маючи вибірку  $X^m$  випадкових величин з суміші  $p(x)$ , знаючи число  $k$  і функцію  $\varphi$ , потрібно оцінити вектор параметрів

$$\Theta_j = (w_j, \theta_j). \quad (3)$$

В задачі визначення розподілу випадкової величини на певному проміжку часу, загальна математична модель розподілу буде описуватись рівнянням (1). Застосування гаусових сумішей для визначення закону розподілу генерування СЕС та потужності навантаження обумовлено двома основними причинами. Перша, можливість врахування різних факторів, що впливають на зміну генерування (погодні умови, зміну сезонів), та для потужності навантаження (режим великих та малих

навантажень). Друга, висока здатність гаусової суміші до апроксимації довільних розподілів.

Розщеплення гаусової суміші проводимо за допомогою методу оцінки-максимізації (expectation-maximization) правдоподібності [12]. EM-алгоритм складається з ітераційного повторення двох кроків. На E-кроці вираховуємо очікуване значення (expectation) вектора прихованих параметрів  $G$  за поточним приближенням вектора параметрів  $\Theta$ . На M-кроці вирішується задача максимізації правдоподібності (maximization) і знаходиться наступне наближення вектора  $\Theta$ , за поточними значеннями векторів  $G$  та  $\Theta$ .

**E-крок.** Позначимо щільність імовірності як  $p(x, \theta_j)$ , того що об'єкт  $x$  отриманий з  $j$ -тої компоненти суміші. Згідно з формулою умовної ймовірності:

$$p(x, \theta_j) = p(x)P(\theta_j/x) = w_j p_j(x). \quad (4)$$

Позначимо,  $g_{ij} = P(\theta_j/x_i)$ . Це невідома апостеріорна імовірність того, що  $x_i$  отриманий з  $j$ -тої компоненти суміші. Приймаємо ці величини в якості прихованих змінних, тобто  $G = (g_{ij}) = (g_1 \dots g_j)$ , де  $g_j$  –  $j$ -й стовбець матриці  $G$ . Отже, кожен об'єкт може бути згенерований лише одною компонентою. Згідно формули повної імовірності маємо умову нормування для  $g_{ij}$ ,  $\sum_{j=1}^k g_{ij} = 1$ , для всіх  $i=1 \dots m$ .

Знаючи параметри  $w_j, \theta_j$ , можна визначити  $g_{ij}$  за формулою Байеса:

$$g_{ij} = \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} \quad (5)$$

**M- крок.** Маючи значення прихованих змінних  $g_{ij}$ , вирішуємо оптимізаційну задачу:

$$Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta) \quad (6)$$

для обмеження  $\sum_{j=1}^k w_j = 1$ . Запишемо лагранжіан цієї оптимізаційної задачі:

$$L(\Theta; X^m) = \sum_{i=1}^m \ln \left( \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \right) - \lambda \left( \sum_{j=1}^k w_j - 1 \right) \quad (7)$$

Прирівнюємо до нуля похідну лагранжіана по  $w_j$ :

$$\frac{\partial L}{\partial w_j} = \sum_{i=1}^m \frac{p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} - \lambda = 0, \quad j=1, \dots, k \quad (8)$$

Помножимо ліву та праву частини на  $w_j$ , додамо всі  $k$  цих рівностей, і змінимо місцями знаки додавання за  $j$  та  $i$ :

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} = \lambda \sum_{j=1}^k w_j$$

З чого випливає, що  $\lambda = m$ . Тепер знову помножимо ліву та праву частини (8) на  $w_j$ , підставимо  $\lambda = m$ , і відмічаючи схожість з (5), отримаємо вираз ваги компонентів через приховані змінні:

$$w_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_{ij}, \quad j=1, \dots, k. \quad (9)$$

Легко перевірити, що обмеження-нерівності  $w_j \geq 0$ , будуть виконані на кожній ітерації, якщо вони виконані для початкового наближення.

Прирівнюємо нулю похідну лагранжіана за  $\theta_j$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_j} &= \sum_{i=1}^m \frac{w_j}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} \frac{\partial}{\partial \theta_j} p_j(x_i) = \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} \frac{\partial}{\partial \theta_j} \ln p_j(x_i) = \\ &= \sum_{i=1}^m g_{ij} \frac{\partial}{\partial \theta_j} \ln p_j(x_i) = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \sum_{i=1}^m g_{ij} \ln p_j(x_i) = 0, \end{aligned}$$

Отримана умова співпадає з необхідною умовою максимуму в задачі максимізації зваженої правдоподібності:

$$\sum_{i=1}^m g_{ij} \ln \varphi(x_i; \theta_j) \rightarrow \max(\theta_j), \quad j=1, \dots, k \quad (10)$$

Визначимо оптимальну кількість компонент в загальній моделі суміші гаусового розподілу, за допомогою «крутого слона», при цьому вирішуємо задачу декілька раз для поступового збільшення (зменшення) значень  $k$ , для якого будуємо графік

залежності правдоподібності вибірки (5) від  $k$ , і обираємо найменше  $k$ , при якому графік відображає різкий скачок правдоподібності.

Метод «крутого слона» добре себе зарекомендував, для нашої задачі, так як можна візуально оцінити приблизну кількість мод у вибірці. Наявність «крутого слона» на графіку залежності свідчить про те, що модель добре підбрана.

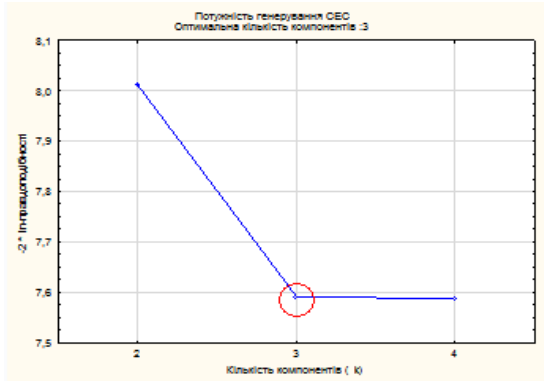


Рис. 7 – Графік залежності логарифму правдоподібності від кількості компонент в суміші потужності генерування СЕС.



Рис. 8 – Графік залежності логарифму правдоподібності від кількості компонент в суміші потужності навантаження.

Оптимальна кількість компонентів кожної суміші для моделі потужності генерування СЕС (рис.7) – 3, та потужності навантаження (рис.8) – 2.

Результати реалізації алгоритму оцінки-максимізації правдоподібності (1) подані графічно (рис.9), без врахування вагових коефіцієнтів, а параметри зведені до таблиці 1.

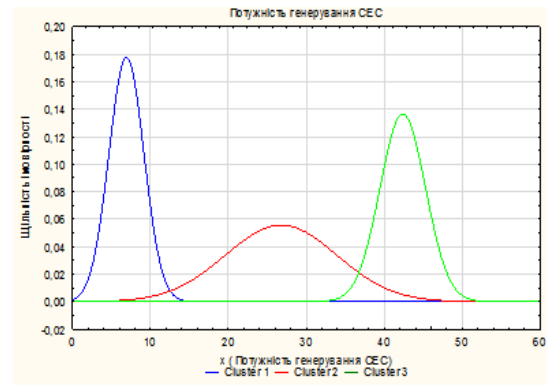


Рис. 9 – Графічне зображення моделі компонент гаусової суміші для потужності генерування СЕС

Таблиця 1 – Параметри моделі гаусової суміші потужності генерування СЕС.

Параметри	K1	K2	K3
Мат. очікування, $\mu$	6.92	26.19	42.46
Ср-відхилення, $\sigma$	2.25	5.86	2.84
Коеф. варіації, $V$	0.325	0.224	0.067
Вага, $w$	0.3965	0.3211	0.2823
Мін. значення	0.6240	13.62	37.02
Макс. значення	13.48	36.348	49.304

Аналіз отриманих даних (табл. 1), дає змогу дати характеристику суміші нормальних розподілів генерування СЕС в заданий період. Так, перший компонент (K1) моделі суміші потужності генерування СЕС буде мати параметри характерні низькій потужності генерування (сезонний та погодний вплив на генерування) найчастіше така потужність генерування зустрічається в зимній період, другий компонент (K2) для середньої потужності генерування (описує режим генерування в сонячні дні), а третій компонент (K3) характеризує потужність генерування СЕС, що відповідає великій потужності генерування СЕС (звичай це літній період, або дні з хорошою, сонячною погодою).

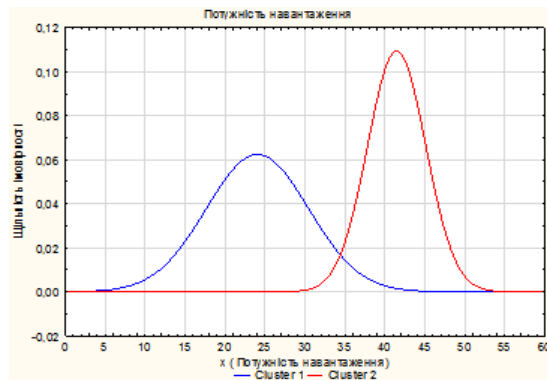


Рис. 10 – Графічне зображення моделі компонент гаусової суміші для потужності навантаження

Таблиця 2 – Параметри моделі гаусової суміші потужності навантаження.

Параметри	K1	K2
Мат. очікування, $\mu$	23.03	40.66
Ср-відхилення, $\sigma$	5.71	3.82
Коеф. варіації, V	0.248	0.094
Вага, w	0.7487	0.2512
Мін. значення	3.96	35.64
Макс. значення	35.04	50.28

Параметри суміші потужності навантаження (табл. 2) дають змогу оцінити режими великих (K2) та малих навантажень (K1).

Враховуючи вагові коефіцієнти кожної компоненти суміші, будемо розподіл випадкової статистичної величини потужності генерування СЕС (рис.11) та потужності навантаження (рис. 12),

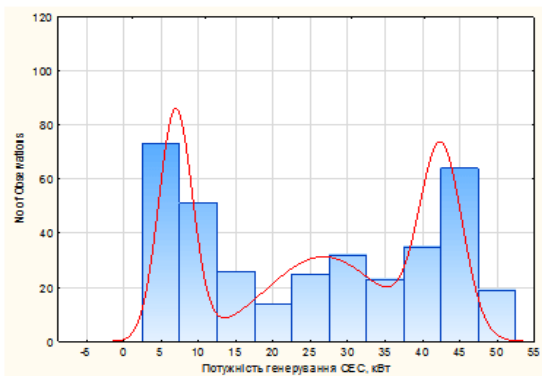


Рис. 11 – Графічне зображення розподілу потужності генерування СЕС з урахуванням вагових коефіцієнтів компонент суміші

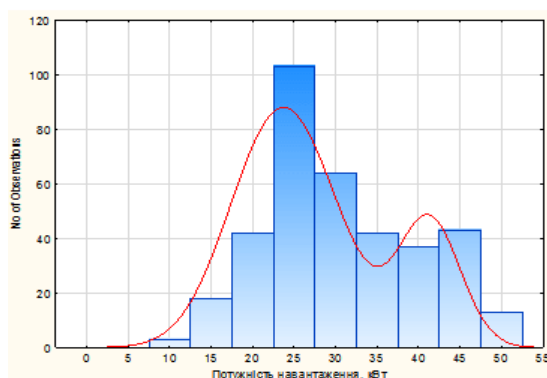


Рис. 12 – Графічне зображення розподілу потужності навантаження з урахуванням вагових коефіцієнтів компонент суміші

Візуальне оцінювання графіка відповідності закону розподілу гаусових сумішей емпіричним даним, підтверджується проведенням тестом Колмогорова-Смірнова, згідного якого значення

$p=0.68$  для розподілу потужності СЕС (рис. 11) та потужності навантаження (рис. 12)  $p=0.77$ , що значно більше 0.05, тому можемо вважати, що розподіл генерування потужності СЕС та навантаження відбувається за моделлю гаусової суміші (1).

Отримавши дані про розподіл потужності генерування СЕС (табл. 1) та навантаження (табл. 2), можна оцінити імовірність покриття потужністю генерування СЕС заданого графіка навантаження (рис. 13).

Для більш точного аналізу покриття графіка навантаження та (або) забезпечення балансу потужності, пропонується розбити кожну компоненту генерування і навантаження на складові з кроком 1кВт.

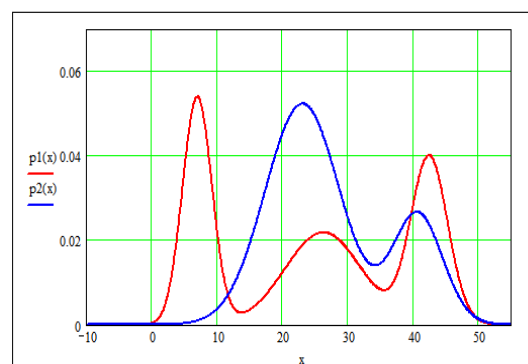


Рис. 13 – Графік щільностей потужностей навантаження  $p_2(x)$  та генерування СЕС  $p_1(x)$  з урахуванням вагових коефіцієнтів

Для визначення імовірності появи  $u$ -тої складової компоненти графіка навантаження і генерування на проміжку часу з 12:30-13:00 скористаємося інтегралом імовірності, який для нормального розподілу буде мати вигляд:

$$F(P_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{P_{min,u}}^{P_{max,u}} e^{-\frac{t^2}{2}} dP,$$

де  $t = \frac{(P_u - \mu_u)}{\sigma_u}$  а  $P_u$  відповідно приймає значення  $P_{min}$

та  $P_{max}$  кожної складової компоненти генерування чи навантаження.

Визначивши імовірність появи  $u$ -тої складової компоненти генерування  $P_{G,u}$  та навантаження  $P_{N,u}$ , визнаємо імовірність покриття  $u$ -тої компоненти навантаження генеруванням СЕС:

$$P_{покр,u} = P_{N,u} \sum_{u=u+1}^d P_{G,u},$$

де  $d$  – загальна кількість складових компонент генерування.

А повна імовірність покриття навантаження генеруванням СЕС на заданому часовому проміжку буде дорівнювати сумі імовірностей покриття всіх складових компонент навантаження:

$$P_{\text{покр}} = \sum_{u=1}^z P_{\text{покр}_u} \quad (11)$$

де  $z$  – кількість імовірностей покриття складових компонент суміші навантаження.

Для заданого проміжку часу доби 12:30-13:00 імовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням СЕС становить  $P_{\text{покр}} = 0.398$ .

За вказаним алгоритмом, проводимо розрахунок  $P_{\text{покр}}$  з кроком 30 хв в розрізі кожної доби протягом року, результати розрахунку показані на графіку (рис. 14)

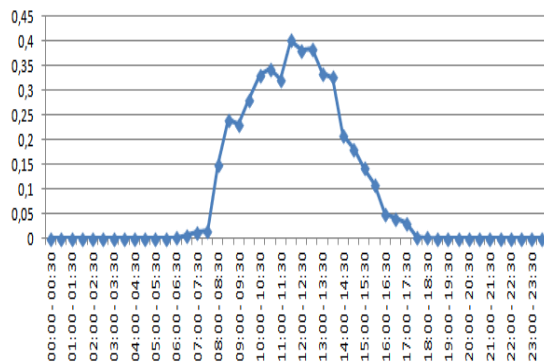


Рис. 14 – Графік залежності імовірності покриття графіка навантаження генеруванням СЕС від часу доби

Отримана залежність дозволяє визначити імовірність покриття заданого графіка споживання протягом доби:

$$P_{\text{покр.д}} = \frac{1}{V} \sum_{a=1}^V P_{\text{покр}_V}$$

де  $V$  – це кількість часових проміжків, на яких визначалась імовірність покриття,  $P_{\text{покр}_V}$  – імовірність покриття  $V$ -того часового проміжку, визначається за (11).

Для прикладу, що розглядається в роботі  $P_{\text{покр.д}} = 0.15$ .

## Висновки

Використання ЕМ-алгоритму дозволяє отримати імовірнісні характеристики як процесу

генерування на сонячних електричних станціях, так і процесу споживання.

За отриманими характеристиками відносно просто можна отримати імовірність покриття графіка навантаження відповідним джерелом відновлюваної енергії.

Оцінювання імовірності забезпечення графіка навантаження проводиться в роботі за півгодинними періодами, на які розбита доба. Це, по-перше, дозволяє уникнути помилок аналізу зумовлених індивідуальними особливостями періоду, по-друге, отримати вихідну інформацію для визначення об'єму резерву та його маневрених характеристик.

## Список літератури

- 1 **Santiago, G.** Prosumer-based control architecture for the future electricity grid / **G. Santiago, M. Costley, N. Ainsworth** // *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)* – 2011. – No. 1. – P. 43-48. – doi:10.1109/CCA.2011.6044467.
- 2 **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. – doi:10.1109/DATE.2011.5763195.
- 3 **Buslavets, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / **O. Buslavets, P. Legnuk, O. Rubanenko** // *Eastern-European journal of enterprise technologies* – 2015. – No. 2/8 (74). – P. 35-41. – doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 4 **Попов, В.** Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / **В. Попов, Е. Ярмолюк, П. Замковой** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 2. – P. 61-68. – doi:10.15587/1729-4061.2014.23158.
- 5 **Chowdhury, A. A.** Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis / **A. Chowdhury** // *IEEE Transactions on Industry Application*. – 2003. – Vol.39. – No.5. – P. 1493-1498. – doi:10.1109/TIA.2003.816554.
- 6 **Bae, I.** Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode. / **I. Bae, J. Kim** // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2007. – Vol.22. – No.2. – P. 785-790. – doi:10.1109/TPWRS.2007.894842.
- 7 **Medeiros, R.** Assessment of Operating Condition Dependent Reliability Indices in Microgrids. / **R. Medeiros, X. Xu, E. Makram** // *Journal of Power and Energy Engineering*. – 2016. – No. 4. – P. 56-66. – doi:10.4236/jpee.2016.44006.
- 8 **Kondo, T.** Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices / **Jumpei Baba, Akihiko Yokoyama** // *Electrical Engineering in Japan* – 2008. – Vol. 165. – № 3. – P. 16-28. – doi:10.1002/ej.20499.
- 9 **Попов, В.** Пути рационального формирования и управления режимами интегрированных систем электроснабжения / **В. Попов, В. Ткаченко, Е. Луцько** // *Праці Інституту електродинаміки Національної*

- академії наук України. – Київ, 2010. – С. 60-65. – (Спец. вип.).
- 10 **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. – doi:10.4236/epe.2014.63005.
  - 11 **Miao, F.** Adaptive Gaussian Mixture Model-Based Relevant Sample Selection for JITL Soft Sensor Development / **F. Miao, G. Zhiqiang, S. Zhihuan** // *Industrial & Engineering Chemistry Research* – 2014. – No. 51. – P. 19979-19986. – doi:10.1021/ie5029864.
  - 12 **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. – doi:10.1046/j.00390402.2003.00257.x.
  - 5 **Chowdhury, A. A.** Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2003, **5(39)**, 1493-1498, doi:10.1109/TIA.2003.816554.
  - 6 **Bae, I., Kim, J.** Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, **2(22)**, 785-790, doi:10.1109/TPWRS.2007.894842.
  - 7 **Medeiros, R., Xu, X., Makram, E.** Assessment of Operating Condition Dependent Reliability Indices in Microgrids. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2016, **4**, 56-66, doi:10.4236/jpee.2016.44006.
  - 8 **Kondo, T., Baba, J., Yokoyama, A.** Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices. *Electrical Engineering in Japan*, 2008, **3(165)**, 16-28, doi:10.1002/ej.20499.
  - 9 **Popov, V., Tkachenko, V., Lutsko, E.** Ways rational management regimes and the formative yntehryrovannyyh electric power systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine*, Kyiv, 2010, 60-65.
  - 10 **Lezhniuk, P. D., Komar, V. A., Sobchuk, D. S.** Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system. *Energy and Power Engineering*, 2014, **3(6)**, 37-46, doi:10.4236/epe.2014.63005.
  - 11 **Miao, F., Zhiqiang, G., Zhihuan, S.** Adaptive Gaussian Mixture Model-Based Relevant Sample Selection for JITL Soft Sensor Development. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, **51**, 19979-19986, doi:10.1021/ie5029864.
  - 12 **Jeroen, K.** An EM algorithm for the estimation of parametric and nonparametric hierarchical nonlinear models. *Statistica Neerlandica*, 2004, **2(58)**, 220-233, doi:10.1046/j.00390402.2003.00257.x.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Santiago, G., Costley, M., Ainsworth, N.** Prosumer-based control architecture for the future electricity grid. *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2011, **1**, 43-48, doi:10.1109/CCA.2011.6044467.
- 2 **Agarwal, Y., Weng, T., Gupta, R.** Understanding the role of buildings in a smart microgrid. *2011 Design, Automation & Test in Europe*, 2011, 1-6, doi:10.1109/DATE.2011.5763195.
- 3 **Buslavets, O., Legnuk, P., Rubanenko, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2015, **2/8 (74)**, 35-41, doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 4 **Popov, A., Yarmolyuk, E., Zamkovoy, P.** Algorithm of multi-criteria management modes microgrids. *East European magazine of enterprise technology*, 2014, **2**, 61-68, doi:10.15587/1729-4061.2014.23158.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лежнюк Петро Дем'янович** – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: lpd@inbox.ru

**Lezhniuk Petro D.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine.; e-mail: lpd@inbox.ru.

**Комар В'ячеслав Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: kvo76@mail.ru

**Komar Vyacheslav O.** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, assistant professor of electrical plants and systems; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: kvo76@mail.ru.

**Кравчук Сергій Васильович** – аспірант, Вінницький національний технічний університет, аспірант кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: w1\_1992@mail.ru.

**Kravchuk Sergey V.** - postgraduate student, Vinnitsa National Technical University, graduate student of power plants and systems; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: w1\_1992@mail.ru.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю так:

**Лежнюк, П. Д.** Оцінювання імовірнісних характеристик генерування сонячних електростанцій в задачі інтелектуалізації локальних електричних систем / **П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук** // *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – № 18 (1190). – С. 92-100. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14.



*Please cite this article as:*

**Lezhniuk, P., Komar, V., Kravchuk, S.** Evaluation probabilistic characteristics of solar power generation in applications of intellectualization local electric systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 92-100, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Лежнюк, П. Д.** Оценка вероятностных характеристик генерирования солнечных электростанций в задаче интеллектуализации локальных электрических систем / **П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 92-100. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14.

**АНОТАЦІЯ** В роботі розглядається актуальний питання аналізу ймовірнісних характеристик генерування відновлюваних джерел електроенергії, в частині сонячних електростанцій (СЕС). Проаналізовано закон розподілу генерування сонячної електростанції для визначеного часу доби впродовж року. Представлена математична модель гауссових сумішей, що дозволяє отримати основні характеристики ймовірнісного характеру генерування сонячної електростанції. Оцінено можливість узгодження генерування сонячної електростанції з добовими графіками споживання. Визначено ймовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням СЕС впродовж визначеного часу доби впродовж всього року.

**Ключевые слова:** мощность генерации, солнечные электростанции, график нагрузки, активный потребитель, гауссовы смеси распределения, вероятностные характеристики.

*Надійшла (received) 12.05.2016*