

УДК 621.316.1

П.Д. Лежнюк¹, В.О. Комар¹, С.В. Кравчук¹, І.О. Бандура²
Вінницький національний технічний університет¹
Луцький національний технічний університет²

ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЯК ЕЛЕМЕНТ БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМУ В ЛОКАЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

В роботі розв'язується актуальна задача оцінювання впливу нестабільності генерування відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних станцій (ФЕС), на балансову надійність локальної електричної системи (ЛЕС). Проаналізовано закон розподілу генерування ФЕС для певного проміжку часу доби протягом року. Запропоновано математичну модель генерування ФЕС у вигляді гаусових сумішей. Отримано основні характеристики імовірнісного характеру генерування ФЕС. Визначено імовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням ФЕС протягом певного часу доби впродовж всього року. Отримані імовірнісні характеристики процесу балансування дозволяють визначити імовірність забезпечення балансової надійності генеруванням ФЕС на заданому проміжку доби. Бібл. 12, рис. 4. .

Ключові слова: фотоелектрична станція, потужність генерування, графік навантаження, гаусові суміші розподілу, імовірнісні характеристики, балансова надійність.

П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук, І.О. Бандура ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ С НАКОПИТЕЛЕМ КАК ЭЛЕМЕНТ БАЛАНСИРОВАНИЯ РЕЖИМА В ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В работе решается актуальная задача оценки влияния нестабильности генерирования восстановительных источников электроэнергии (ВИЭ), в частности фотоэлектрических станций (ФЭС), на балансовую надежность локальной электрической системы (ЛЭС). Проанализированы закон распределения генерирования ФЭС для определенного времени суток на протяжении года. Предложена математическая модель генерирования ФЭС в виде гауссовых смесей. Получены основные характеристики вероятностного характера генерирования ФЭС. Определены вероятность покрытия заданного графика нагрузки генерированием ФЭС в течение определенного времени суток в течение всего года. Полученные имовирнісні характеристики процесса балансировки позволяют определить вероятность обеспечения балансовой надежности генерированием ФЭС на заданном промежутке времени. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, мощность генерации, график нагрузки, гауссовы смеси распределения, вероятностные характеристики, балансовая надежность.

P. Lezhnyuk, V. Komar, S. Kravchuk, I. Bandura PHOTOELECTRIC STATION WITH ACCELERATOR AS A ELEMENT OF BALANCING THE MODE IN THE LOCAL ELECTRONIC SYSTEM

The current problem of estimating the instability of the generation of renewable power sources, in particular photovoltaic stations (FES), on the balance reliability of the local electric system (LES) is solved. The law of distribution of generation of FES for a certain period of time of the day by year is analyzed. A mathematical model for generating FES in the form of Gaussian mixtures is proposed. The basic characteristics of the probabilistic nature of the FES generation are derived. The probability of covering the given load graph of the generation of FES during a certain time of day throughout the year is determined. The obtained probabilistic characteristics of the process of balancing allow us to determine the probability of providing balance-reliable power generation for the FES at a given time interval. Bible 12, rice. 4

Keywords: photoelectric station, power generation, load schedule, Gaussian mixes of distribution, probabilistic characteristics, balance reliability.

Постановка проблеми. У зв'язку з розбудовою відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) в електричних мережах, останні приймають ознаки локальних електричних систем (ЛЕС) [1]. Це значить, що стосовно до них виникають задачі, які є характерними для електроенергетичних систем (ЕЕС) з крупними тепловими, атомними і гідроелектростанціями. До них відносяться забезпечення надійності електропостачання споживачів, підтримування рівнів напруги в допустимих межах, оптимізація потоків потужності з метою зменшення втрат, а також підтримування балансової надійності в ЛЕС з комбінованим електроживленням від місцевих і централізованих джерел енергії [3–5].

Наявність в ЛЕС розподіленого генерування та двосторонніх комунікаційних зв'язків, що є характерною функціональною властивістю Smart Grid, дозволяє реалізовувати переваги і можливості сучасних технологій. В ЛЕС можливо найбільш повно реалізувати загальну функціонально-технологічну ідеологію концепції Smart Grid, сформульованої IEEE як концепції повністю інтегрованої, саморегулюючої електричної системи, що самовідновлюється та керується єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв і систем у режимі реального часу [2]. Серед функцій, що реалізуються в ЛЕС на основі Smart Grid, входять моніторинг і самодіагностика

обладнання, автоматичне відновлення – самовідновлення мережі, оптимальне керування потоками потужності та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складність реалізації Smart Grid технологій в ЛЕС полягає в тому, що розподілене генерування складається з різнотипних відновлюваних джерел, міра залежності яких від впливових факторів (метеопараметри навколишнього середовища, біоресурси, гідроресурси) суттєво відрізняється. Спільною рисою їх всіх є те, що всі вони є негарантованими джерелами електроенергії. Забезпечити надійне електропостачання споживачів електроенергії в ЛЕС можливо тільки за умов наявності резервних джерел електроенергії. Це можуть бути резервні потужності ЕЕС або накопичувачі електроенергії, виробленої в ЛЕС власними електростанціями. Значення необхідної резервної потужності та електроенергії в ЛЕС залежить від складу її електростанцій, які використовують відновлювані джерела енергії, та від умов їх роботи в ЕЕС. Тут можливі два варіанти: на генерування ВДЕ не накладається ніяких обмежень крім природних, зумовлених технологією перетворення первинних енергоносіїв в електроенергію, та генерування ВДЕ за графіками, заявленими на наступну добу з врахуванням прогнозу метеопараметрів. В останньому випадку задача генерування ВДЕ формулюється наступним чином:

$$\int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{2} \left(P_{\text{ВДЕ}}(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t) \right)^2 dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $P_{\text{ВДЕ}}(t)$ – заявлений графік сумарного генерування ВДЕ в ЛЕС; $P_i(t)$ – графік генерування i -го ВДЕ на часовому інтервалі t_0-t_k ; n – кількість ВДЕ в ЛЕС, які працюють за графіками і мають забезпечувати $P_{\text{ВДЕ}}(t)$.

Визначаючи пріоритетність розв'язання задач в ЛЕС, відмітимо балансову надійність як надійність ЛЕС, за якої забезпечується баланс між споживанням і генеруванням електроенергії з врахуванням зовнішнього надходження енергії. Від того, якими способами і засобами забезпечується балансова надійність, залежить як успішно розв'язуються інші задачі [6–10]. На процес балансування потужності в ЛЕС суттєво впливає нестабільність генерування ВДЕ, зокрема ФЕС і ВЕС. Нестабільність генерування ФЕС і ВЕС компенсується потужністю, яка поступає в ЛЕС з ЕЕС. На сьогодні забезпечення балансу лежить суто на централізованій системі електропостачання [11]. Проте, поступово відбуваються зміни в механізмах функціонування енергоринку України, що спонукатимуть власників ВДЕ працювати за заявленим (заданим) графіком. Для роботи за графіком потрібно перш за все дослідити потенційні можливості джерел генерування щодо покриття графіка навантаження. На основі статистичних даних по генеруванню, якщо станція вже експлуатується, або прогнозних по виробітку електроенергії, якщо станція ще не введена в експлуатацію, можна отримати вихідну інформацію щодо визначення потужності накопичувача, як елемента дотримання графіка генерування, а отже і балансування в електричній мережі, до якої приєднана станція.

Постановка завдань. Оскільки можливі відновлювані джерела в ЛЕС відрізняються своїми імовірнісними характеристиками щодо генерування електроенергії і, відповідно, впливом на процес забезпечення балансової надійності, то досліджувати їх потрібно окремо.

Метою даної роботи є оцінювання впливу фотоелектричних станцій на балансову надійність локальної електричної системи та визначення ємності та графіка роботи накопичувача електроенергії

Викладення основного матеріалу. Коефіцієнт забезпечення балансової надійності ЛЕС $k_{\text{бн}}$ визначається на основі оцінювання потенційних можливостей генерування ФЕС задовольняти попит на електроенергію в ЛЕС. Оскільки таке генерування має імовірнісний характер, то доцільно говорити про імовірність забезпечення балансу між спожитою в ЛЕС та генерованою ФЕС електроенергією. Найбільш точно визначити таку імовірність можна на основі оцінювання імовірнісних характеристик процесів генерування та електроспоживання в ЛЕС.

Аналіз статистичних даних щодо потужностей генерування ФЕС та навантаження ЛЕС виконується в програмному середовищі STATISTICA 10. Для визначення імовірнісних характеристик потужностей використовуються типові гістограми густин розподілу. На рис. 2, як приклад, в розрізі кожної доби в проміжок часу 12:30–13:00 протягом року для підстанції «Ямпіль 110/10 кВ» побудовані гістограми густин генерування і споживання потужностей (потужності

подані у відносних одиницях, де за базис прийнято їх номінальні значення). З рис. 1 видно, що розподіл генерування ФЕС та навантаження – полімодальний. В тих випадках, коли «форму» розподілу не вдається описати одним розподілом, то її можна описати за допомогою суміші розподілів. Серед інших, можна виділити модель гаусової суміші, яка представляє собою зважену суму k компонентів, густина розподілу якого має вигляд:

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

де $p_j(x)$ – функція густини розподілу j -ї компоненти суміші; w_j – вага j -ї компоненти суміші (апріорна імовірність) $\sum_{j=1}^k w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1 \dots k$ – кількість компонент в суміші.

Функція густини розподілу має вигляд:

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

де μ_j – математичне очікування j -ї компоненти; $|\zeta_j|$ – визначник коваріаційної матриці j -ї компоненти суміші; k – кількість компонент в суміші.

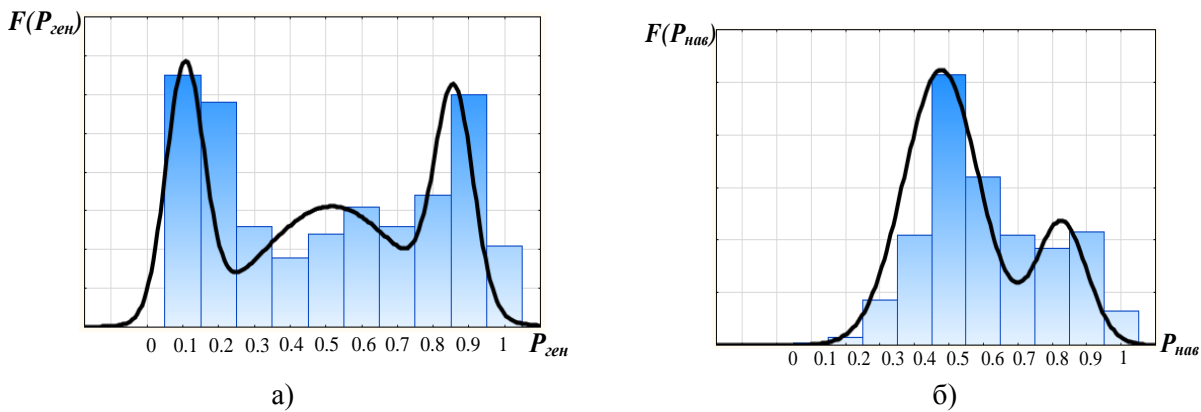


Рис. 1. – Модель гаусової суміші для потужності генерування ФЕС (а) та для навантаження (б)

В задачі визначення розподілу випадкової величини на певному проміжку часу загальна математична модель розподілу буде описуватись рівнянням (2). Розщеплення гаусової суміші пропонується проводити за допомогою методу оцінки-максимізації (expectation-maximization) правдоподібності. ЕМ-алгоритм складається з ітераційного повторення двох кроків. На Е-кроці враховуємо очікуване значення (expectation) вектора прихованих параметрів G за поточним наближенням вектора параметрів Θ . На М-кроці вирішується задача максимізації правдоподібності (maximization) і знаходиться наступне наближення вектора Θ , за поточними значеннями векторів G та Θ .

Е-крок. Позначимо густину імовірності як $p(x, \theta_j)$, того що об'єкт x отриманий з j -ї компоненти суміші. Згідно з формулою умовної імовірності:

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

Позначимо, $g_{ij} = P(\theta_j | x_i)$ – як невідому апостеріорну імовірність того, що x_i отриманий з j -ї компоненти суміші. Приймаємо ці величини в якості прихованих змінних, тобто $G = (g_{ij}) = (g_1 \dots g_j)$, де g_j – j -й стовпець матриці G .

М-крок. Визначивши за формулою Байєса значення прихованих змінних g_{ij} , вирішуємо оптимізаційну задачу:

$$Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta). \quad (5)$$

Результатом розв'язування оптимізаційної задачі, за критерієм максимуму правдоподібності, є імовірнісні характеристики процесів генерування та навантаження. Маючи такі характеристики, визначено закон розподілу випадкових потужностей генерування ФЕС (рис. 1а) та навантаження ЛЕС (рис. 1б). На основі визначених характеристик, маючи вагу кожної компоненти генерування та навантаження, можна визначити імовірність видачі певної потужності генерування ФЕС та навантаження.

Для цього пропонується розбити кожну компоненту генерування та навантаження на складові з певним кроком (чим менший крок, тим точність розрахунку вища) та знайти імовірність їх появи за допомогою інтегралу імовірності:

$$F(X_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_u}^{X_{u+1}} e^{-\frac{r^2}{2}} dX_u, \quad (6)$$

де $r = \frac{(X_u - \mu)}{\sigma}$, а X_u відповідно приймає значення X_u та X_{u+1} кожної складової компоненти генерування ФЕС чи споживання; μ – математичне очікування; σ – середньоквадратичне відхилення.

Визначивши імовірність появи u -ї складової компоненти генерування $p_{ген_u}$ та навантаження $p_{нав_u}$, визначаємо імовірність покриття u -тої компоненти навантаження генеруванням ФЕС:

$$p_{покр_u} = p_{нав_u} \cdot \sum_{\substack{z=1 \\ p_{нав_u} \leq p_{ген_z}}}^f p_{ген_z}, \quad (7)$$

де f – кількість складових компонент генерування; t – часовий проміжок, на якому визначається імовірність покриття споживання генеруванням ФЕС.

Коефіцієнт стабільності, що має зміст імовірності покриття навантаження генеруванням ФЕС на заданому часовому проміжку, дорівнює сумі імовірностей покриття всіх складових компонент навантаження:

$$k_{стаб_t} = \frac{1}{b} \sum p_{покр_u}, \quad (8)$$

де t – часовий проміжок, на якому оцінюється стабільність генерування ФЕС; b – кількість часових проміжків, протягом яких оцінюється стабільність генерування ФЕС.

На основі оцінювання стабільності генерування ФЕС запропонований алгоритм визначення імовірностей покриття та не покриття графіка навантаження (див. рис. 2).

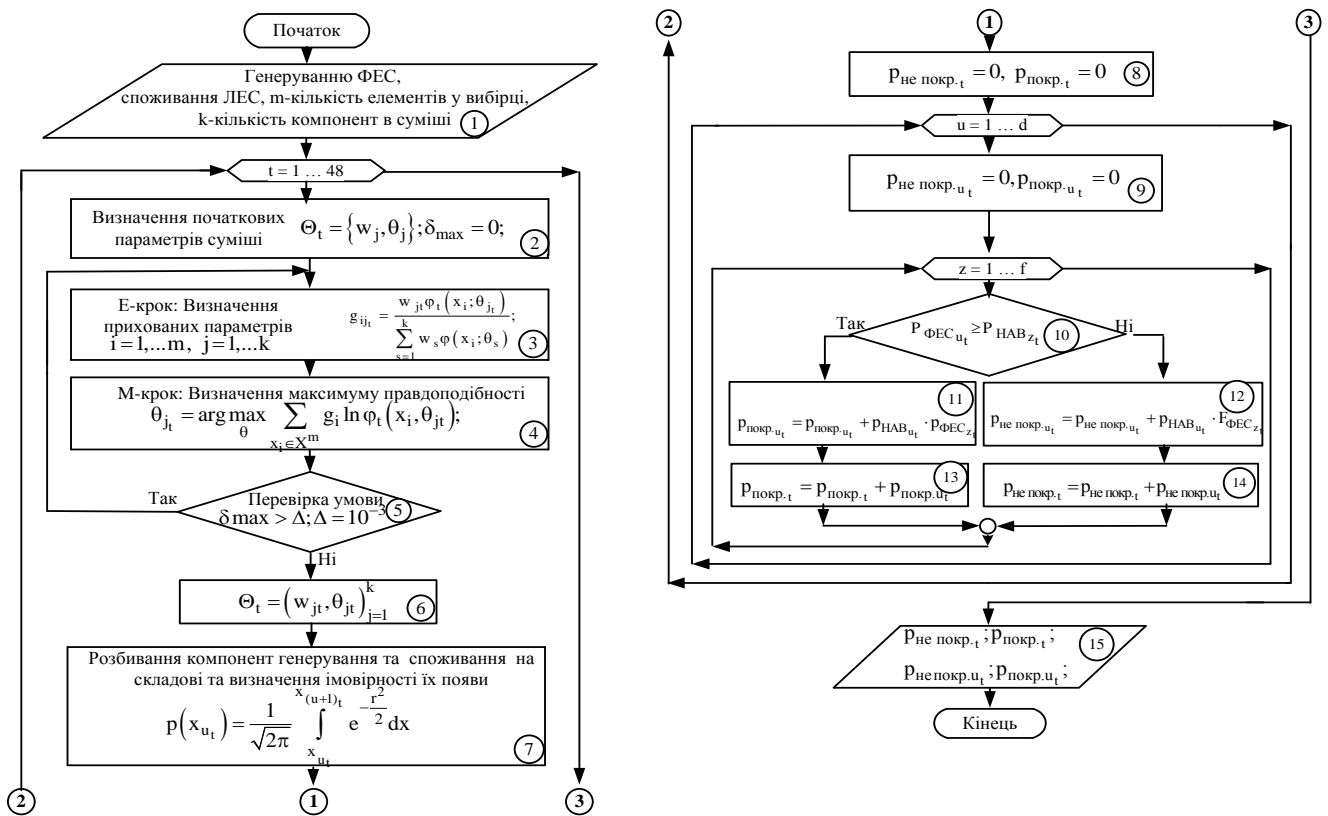


Рис. 2. Алгоритм визначення імовірності покриття графіка навантаження ЛЕС генеруванням ФЕС

Відповідно до EM-алгоритму (блоки 1–6), маючи початкові дані процесів генерування та електроспоживання (блок 1) та початкове наближення параметрів сумішей і критерій зупинки (блок 2), визначаються параметри сумішей гаусових розподілів (математичне очікування, середньоквадратичне відхилення та вага компоненти суміші). В блоці 3 визначається $g_{ij} = F(\theta_j | x)$ – невідома апостеріорна імовірність того, що елемент вибірки взято з j -ої компоненти суміші. Таку імовірність можна визначити, використовуючи формулу Байєса. В блоці 4 визначаються оптимальні ваги компонентів суміші w_j за критерієм максимуму правдоподібності. Ітераційний процес зупиняється, коли значення функціоналу $Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta)$

або значення прихованих змінних G перестають суттєво змінюватись (блок 5). Отримані параметри сумішей розподілів генерування ФЕС та електроспоживання (блок 6) за допомогою інтегралу імовірності розбираються на складові з певним кроком (блок 7). Слід зауважити, що чим менший крок розбиття суміші, тим точність розрахунку більша.

В блоках 8, 9 задаються початкові наближення імовірності покриття та не покриття графіка навантаження власним генеруванням ФЕС. Якщо складова компоненти суміші генерування більша за складову компоненти суміші графіка електричного навантаження (блок 10), то визначається імовірність покриття ГЕН (блок 11) і, відповідно, не покриття ГЕН (блок 12). В блоках 13, 14 визначається сумарна імовірність покриття та не покриття графіка навантаження генеруванням ФЕС. У блоці 15 виводяться імовірності, визначені в блоках 11-14.

Імовірності покриття та не покриття графіка навантаження, визначені за (7), дозволяють обчислити математичне очікування надлишку та дефіциту потужності на t -му проміжку часу доби:

$$M_{над_t} = \sum_u \overrightarrow{P_{покр_{tu}}} \cdot \overrightarrow{P_{нав_{tu}}} \quad \text{та} \quad M_{деф_t} = \sum_u \overrightarrow{P_{непокр_{tu}}} \cdot \overrightarrow{P_{нав_{tu}}}, \quad (9)$$

де $P_{покр_u}$ – імовірність покриття графіка навантаження, $P_{непокр_u}$ – імовірність не покриття графіка навантаження, $P_{нав_u}$ – потужність навантаження.

Для проведення розрахунку, щодо визначення ємності накопичувача аналізувався фрагмент схеми Ямпільської розподільної електричної мережі, яку можна вважати локальною електричною системою, оскільки має потужну ФЕС, що живить споживачів. Генерування на даній електростанції відбувається з використанням стрінгових інверторів SMA, а також мультикристалічних кремнієвих модулів. До інверторів підключено по 76 фотоелектричних модулів (ФЕМ) сумарною потужністю 17,68 кВт. Всі ФЕМ розділені на 4 паралельні групи з 19 модулів, з'єднаних послідовно. Така конфігурація забезпечує оптимальну роботу ФЕС. Сонячні панелі генерують електроенергію постійного струму, далі через інвертори вона надходить на 2 КТП: КТП 0,4/10 – 630 кВА та 0,4/10 – 1000 кВА. Нормальна схема видачі потужності електростанцією передбачає, що електроенергія, генерована ФЕС, через КТП 0,4/10 – 630 кВА та 0,4/10 – 1000кВА лінією 27–23 видається в мережу, яка з'єднана з підстанцією «Ямпіль 110/10» (рис. 3). Протяжність ліній фідера 15 ПС 110/10 «Ямпіль» становить 18 км. Даний фідер містить: 37 вузлів, 16 трансформаторних підстанцій, Гальжбіївську ФЕС потужністю 1431 кВт. Сумарна потужність трансформаторних підстанцій від яких живляться споживачі становить 2 149 кВт.

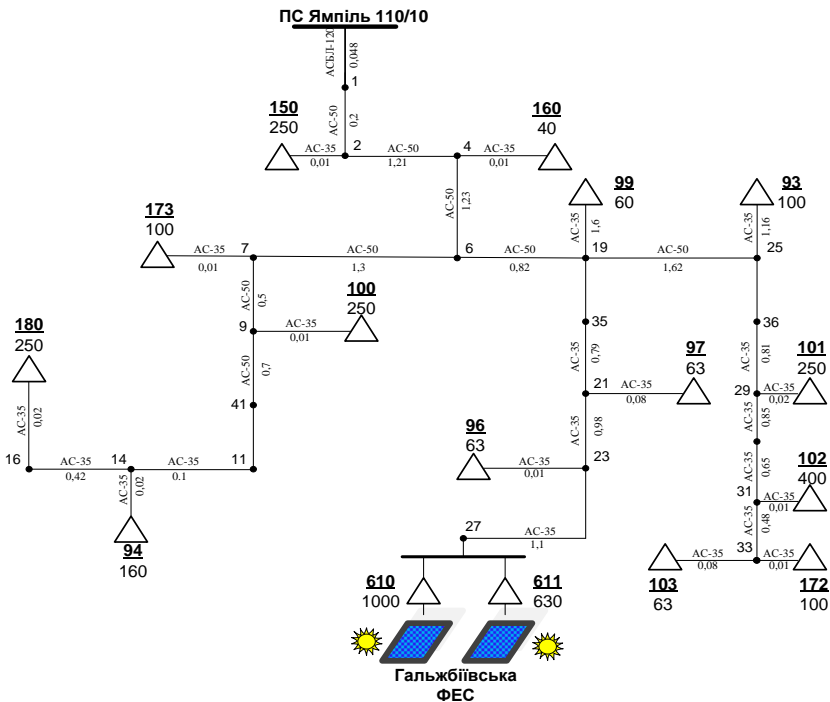


Рис. 3. Схема живильного фідера 15 Ямпільських РЕМ

На рисунку 4, проілюстровано математичні очікування надлишків та дефіцити потужності у вигляді графіка, що відображає значення можливості накопичення певної величини ємності – $Q(t)$ за умови, що початкова ємність накопичувача $Q(t) = 0$.

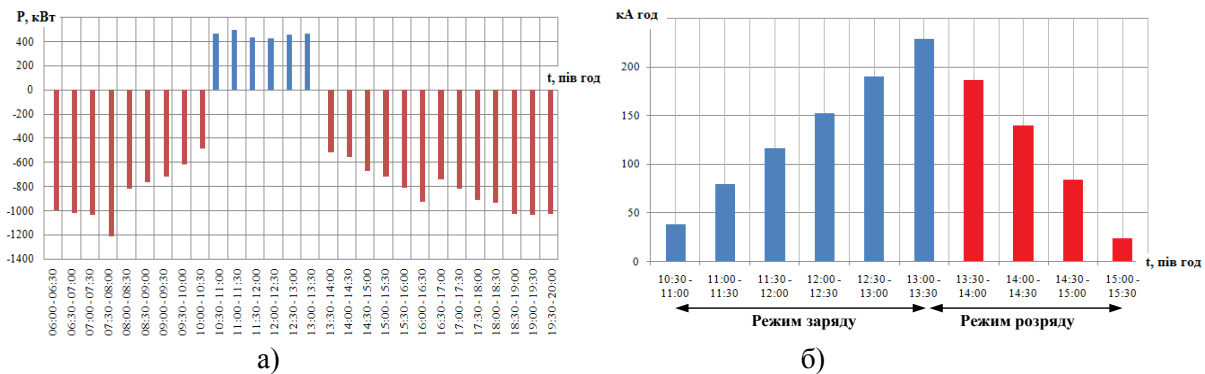


Рис. 4. – а) зміна математичного очікування дефіциту та надлишку генерування Гальжбіївської ФЕС протягом доби, б) графік роботи накопичувача повного циклу «заряд/розряд»

В кожний момент часу ємність накопичувача електроенергії буде визначатись як сума двох складових – заряду на початку роботи $Q_0(t)$ та енергії, яку накопичено на поточний момент часу:

$$Q(t) = Q_0(t) + \frac{W_{над}(t)}{U_{н-ч}}, \quad (10)$$

де $W_{над}(t)$ – надлишкова енергія, яку можна накопичити; $U_{н-ч}$ – напруга на затискачах накопичувача, для розрахунку приймається $U_{н-ч} = 12$ В.

З (рис. 4а) видно, що для даної потужності генерування ФЕС, $M_{над} > M_{деф}$, на проміжку часу з 10:30 по 13:30. Надлишкову енергію можна визначити: $W_{над} = \sum_t P_t$. Таким чином, для встановленої потужності генерування Гальжбіївської ФЕС, ємність накопичувача буде дорівнювати:

$$Q(t) = \frac{W_{над}(t)}{U_{н-ч}} = \frac{2756.35}{12} = 230 \text{ кА} \cdot \text{год}$$

За рахунок заряду, який можна накопичити в години надлишку генерування ФЕС з 10:30 по 13:30, можна збільшити кількість годин, в які ФЕС буде самостійно забезпечувати баланс між генеруванням і електроспоживанням ЛЕС (рис. 4б). Ще однією перевагою використання накопичувачів є те, що надлишок генерування не призведе до збільшення додаткових втрат активної потужності та погіршення якості електроенергії в електричній мережі.

В разі встановлення такого накопичувача, що працюватиме з заданим графіком (рис. 5б), можна значно підвищити балансову надійність ЛЕС. Отож, для ЛЕС з фотоелектричною станцією без накопичувача $k_{стаб} = 0.43$, з урахуванням роботи накопичувача, ємність якого розрахована по математичному очікуванню надлишків генерування та дефіцитів $k_{стаб} = 0.64$, чого, звичайно, недостатньо для підтримання якісного електропостачання споживачів. Але в нинішніх умовах вартість накопичувачів досить висока (приблизно 270 \$/кВт год), а кількість циклів «заряд-розряд» (<10000 циклів) обмежена, що значно ускладнює їх впровадження. Виходячи з цього, для підтримання відповідного рівня балансової надійності потрібно задіяти резерв потужності для ЛЕС з урахуванням надходження електроенергії від централізованих джерел живлення. Так з урахуванням зовнішніх надходжень електроенергії $k_{стаб} = 0.91$.

Висновки. Імовірнісні характеристики як процесу генерування електроенергії на ФЕС, так і процесу її споживання достатньо точно визначаються за допомогою математичної моделі, побудованої на ос-нові гаусової суміші. За отриманими характеристиками відносно просто можна отримати імовірність покриття графіка навантаження джерелом відновлюваної енергії і визначити імовірність забезпечення балансової надійності в локальній електричній системі. Оцінювання імовірності забезпечення графіка навантаження доцільно робити за годинними інтервалами, на які розбивається доба. Це дозволяє зменшити похибки аналізу, які зумовлені природними умовами генерування електроенергії відновлюваними джерелами, та врахувати особливості графіків її споживання.

Список використаних джерел:

1. Кириленко О.В., Петергеря Ю.С., Терещенко Т.О., Жуйков В.Я. Интеллектуальные системы керування потоками електроенергії у локальних об'єктах. – Київ: Медіа ПРЕС, 2005. – 212 с.
2. Кобец Б.В., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – Москва: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
3. C. L. T. Borges and D. M. Falcao, "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," Int. J. Elect Power Energy Syst., vol. 28, no. 6, pp. 413–420, Jul. 2006.
4. Q. Jiang, G. Geng, C. Guo, and Y. Cao "An efficient implementation of automatic differentiation in interior point optimal power flow," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 147–155, Feb. 2010.
5. Интеллектуальные электричні мережі: елементи та режими / За ред. О.В. Кириленка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
6. Попов В. А. Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / В. Попов, Е. Ярмолюк, П. Замковой // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2. – Р. 61-68.

– doi: 10.15587/1729-4061.2014.23158.

7. Кириленко О. В. Керування режимом роботи електростанції з відновлюваними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, О.С. Яндутьський, А.О. Стелюк // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 4. — С. 52–57.

8. Яндутьський О.С., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Оптиміальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженого генерування з урахуванням їх належності одному власнику при використанні резерву активної потужності // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. - 2015. - Вип. 2. - С. 50-54. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2015_2_9

9. Рубаненко О.Є Оптиміальне керування нормальними режимами ЕЕС з врахуванням технічного стану трансформаторів з РПН/ О.Є. Рубаненко, В.О. Лесько// Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. Спеціальний випуск. – С.154-161. ISSN 1727-9895.

10. Burykin, O.B. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems / O.B. Burykin, J.V. Malogulko, Y.V. Tomashevskiy, P. Komada, N.A. Orshubekov, M. Kozhamberdiyeva, A. Sagymbekova // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. - R. 93. - NR 3/2017. - P. 97-102. - ISSN 0033-2097. - doi:10.15199/48.2017.03.23

11. Лежнюк, П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – № 42 (1214). – С. 69-75. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.11.

12. 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. ISBN 5-279-00054-Х.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019