

В. О. КОМАР, П. Д. ЛЕЖНЮК, В. О. ЛЕСЬКО, І. О. ГУНЬКО, І. І. СМАГЛО

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

В роботі розроблено програмно-апаратний комплекс діагностування обладнання фотоелектричних станцій. В першу чергу в статті йдеться про оцінку технічного стану фотоелектричних модулів як елемента, який найбільше впливає на генерування фотоелектричних станцій. Оскільки фотоелектричні станції займають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем, то важливо знати, яку кількість електроенергії і за яким можливим графіком в часі фотоелектричні станції можуть її генерувати. Крім інсоляції сонця іншою причиною несталої генерування фотоелектричних станцій є їх технічний стан, зокрема поступова деградація фотоелектричних модулів. Для участі фотоелектричних станцій в процесі балансування потужності й електроенергії в електроенергетичних системах необхідно знати їх поточний технічний стан і перспективи щодо можливості вироблення електроенергії в заданому об'ємі. Для планування виробітки електроенергії і планування доцільності витрат на ремонт фотоелектричних станцій зацікавлений також інвестор. Зокрема йдеться про залишковий ресурс фотоелектричних станцій по відношенню до розрахункового на початок експлуатації. Це висуває відповідні умови щодо методів і засобів оцінювання технічного стану фотоелектричних станцій. Щодо фотоелектричних модулів, то необхідно контролювати коефіцієнти-індикатори, які вказують на аномальну роботу фотоелектричних модулів у стрінгу і фактично сигналізують на наявність проблеми в його роботі. Програмно-апаратний комплекс дозволяє перевірити контактні з'єднання фотоелектричних станцій і визначити чи опори контактних з'єднань знаходяться в допустимих межах. За необхідності формується база даних з використанням квадрокоптера. За допомогою тепловізора і пірометра здійснюється обстеження фотоелектричних модулів на предмет дефектів, що проявляються областями з температурою, вищою за температуру справних фотоелектричних модулів. На фотоелектричних модулях виявляються дефекти елементів, які обстежуються детальніше. Для визначення міри працездатності фотоелектричних модулів формується база даних для побудови і порівняння окремих вольт-амперних характеристик. Інформація передається на ноутбук, де обробляється розробленою програмою для виявлення та діагностування появи дефектів або несправностей, а також визначаються коефіцієнти залишкового ресурсу і коефіцієнти-індикатори аномальної роботи фотоелектричних модулів. За цими результатами приймається рішення щодо доцільності подальшої експлуатації фотоелектричних модулів. Визначається можливість їх відновлення або повної заміни.

Ключові слова: обладнання фотоелектричних станцій, діагностування, технічний стан, індикатори аномальної роботи, залишковий ресурс.

V. O. KOMAR, P. D. LEZHNIUK, V. O. LESKO, I. O. HUNKO, I. I. SMAGLO

SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF PHOTOVOLTAIC STATION EQUIPMENT

In the article, a software-hardware complex for diagnosing the equipment of photovoltaic stations was developed. First of all, the article deals with the assessment of the technical condition of photovoltaic modules as an element that has the greatest influence on the generation of solar power plants. Since photovoltaic stations occupy a prominent place in the balance of power and electricity of electric power systems, it is important to know the amount of electricity and according to what possible time schedule photovoltaic stations can generate it. In addition to the insolation of the sun, another reason for the unstable generation of photovoltaic stations is their technical condition, in particular, the gradual degradation of photovoltaic modules. For the participation of photovoltaic stations in the process of balancing power and electricity in the electric power systems, it is necessary to know their current technical condition and prospects regarding the possibility of generating electricity in a given volume. The investor is also interested in the evaluation of the technical condition of the photovoltaic stations. For the planning of electricity generation and the feasibility of the costs for the repair of the photovoltaic stations, the investor is also interested. In particular, it is about the residual resource of the photovoltaic stations in relation to the estimated resource at the start of operation. This puts forward appropriate conditions for the methods and means of assessing the technical condition of the photovoltaic stations. As for the photovoltaic modules, it is necessary to monitor the indicator coefficients that indicate the abnormal operation of the photovoltaic modules in the string and actually signal the presence of a problem in its operation. Software-hardware complex allows checking the contact connections of the photovoltaic stations and determine whether the resistances of the contact connections are within the permissible limits. If necessary, a database is formed using a quadcopter. With the help of a thermal imager and a pyrometer, the photovoltaic modules is examined for defects manifested by areas with a temperature higher than the temperature of an exploitation photovoltaic modules. Defects of elements are detected on photovoltaic modules, which are examined in more detail. To determine the degree of efficiency of the photovoltaic modules, a database is formed for the construction and comparison of separates current-voltage characteristic. The information is transferred to a laptop, where it is processed by a developed program for detecting and diagnosing the appearance of defects or damages, as well as determining the coefficients of the remaining resource and the coefficients indicating the abnormal operation of the photovoltaic modules. Based on these results, a decision is made regarding the expediency of further photovoltaic modules operation. The possibility of their recovery or complete replacement is determined.

Keywords: equipment of photovoltaic stations, diagnosing, technical condition, indicators of abnormal operation, residual resource.

Вступ. На сьогодні відновлювані джерела енергії, в тому числі фотоелектричні станції (ФЕС), займають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС). Через нестабільність їх генерування виникають проблеми з балансуванням потужності та електроенергії в ЕЕС. На нестабільність вироблення електроенергії впливають як метеорологічні умови, так і технічний

стан обладнання ФЕС. Особливо гострою проблема нестійкого генерування ФЕС проявляється тоді, коли вони вимушені працювати з ЕЕС згідно прогнозованого на наступну добу погодинного графіка генерування, який відповідним чином затверджується [1]. Невідповідність фактичного і планового графіків генерування тягне за собою штрафні санкції, які зменшують економічну

© В. О. Комар, П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько, І. О. Гунько, І. І. Смагло, 2022

ефективність ФЕС. Виникає обґрунтована необхідність більш відповідально відноситися до планових та фактичних графіків генерування ФЕС, а також до реальних можливостей виробляти ними електроенергію у відповідному обсязі [2].

Оскільки на вироблену кількість електроенергії ФЕС впливають не тільки погодні умови, що очевидно, але і технічний стан їх обладнання, то для забезпечення надійності електропостачання необхідно їх виявляти та прогнозувати їх виникнення, планувати заміни пошкодженого обладнання та його відновлення. Особливе місце тут займають фотоелектричні модулі (ФЕМ), для яких природним є зменшення з часом їх продуктивності (деградація) [3, 4]. Тобто, виникає задача підтримки енергоефективності установок, що гарантуватиме очікуваний рівень генерування електроенергії, при цьому також, існує необхідність контролю за їх роботою, щоб уникнути можливих відключень, які можуть спричинити понаднормове відхилення планового значення генерування від поточного [5].

Постановка завдання. Можна виділити три способи діагностування пошкоджень ФЕС:

- 1) шляхом візуального огляду, що потребує значних витрат часу та зусиль;
- 2) за допомогою обробки зображень, яка може бути розділена на термографію, електролюмінесценцію та ультрафіолетову флуоресценцію, що передбачає використання безпілотних технологій та іноді вимагає відключення станції від мережі;
- 3) за допомогою аналізу електричних вимірювань, який можна отримати за допомогою встановленої системи моніторингу [6].

Перші два способи полягають у використанні ретроспективних даних для формування моделі поточного стану ФЕМ. Також потрібно враховувати обмеження диспетчера на потужність генерування ФЕС, тобто коли ФЕС працює не з максимально доступною потужністю, а з заданою диспетчером, визначеною на основі системних завдань щодо балансування режимів ЕЕС. Це означає, що інвертори не працюють у режимі відстеження максимальної потужності, а замість цього вони намагаються досягти оптимального значення генерування, що встановлене диспетчером. Отже, максимальне сертифіковане значення потужності, що використовується для виявлення пошкоджень, некоректно використовувати при виявленні технічного стану для ФЕС, які підключені до мережі і експлуатуються у невідповідних умовах.

Мета статті. Розроблення програмно-апаратного комплексу для моніторингу, класифікації та виявлення несправностей (пошкоджень) роботи ФЕС та ідентифікація її технічного стану з врахуванням ретроспективних даних.

Програмно-апаратний комплекс (ПАК) оцінювання технічного стану ФЕС. Запропонований метод базується на двох етапах.

1. Моделювання, в ході якого складається математична модель процесу функціонування ФЕС на

основі ретроспективних даних про їх роботу з визначенням зони нечутливості та формування нейро-нечіткого алгоритму генерування.

2. Процес моніторингу та прогнозування з метою виявлення та діагностування появи дефектів або несправностей, при якому система працює в режимі реального часу, контролюючи технічний стан ФЕМ.

Роботу запропонованого комплексу розглянемо на прикладі моніторингу дефектів ФЕМ (рис. 1). Процес моніторингу починається з обльоту поля фотоелектричної станції квадрокоптером. Огляд з використанням камер з різними матрицями дозволяє виконувати візуалізацію як у видимому спектрі, так і мультиспектральному. Це допомагає визначити осередки дефектів в межах поля. Вся інформація, отримана під час обльоту, передається в базу даних через блок збору даних з квадрокоптера. При цьому кожному осередку присвоюються координати на полі ФЕС. За необхідності деякі осередки досліджуються за допомогою ручного тепловізора та пірометра.

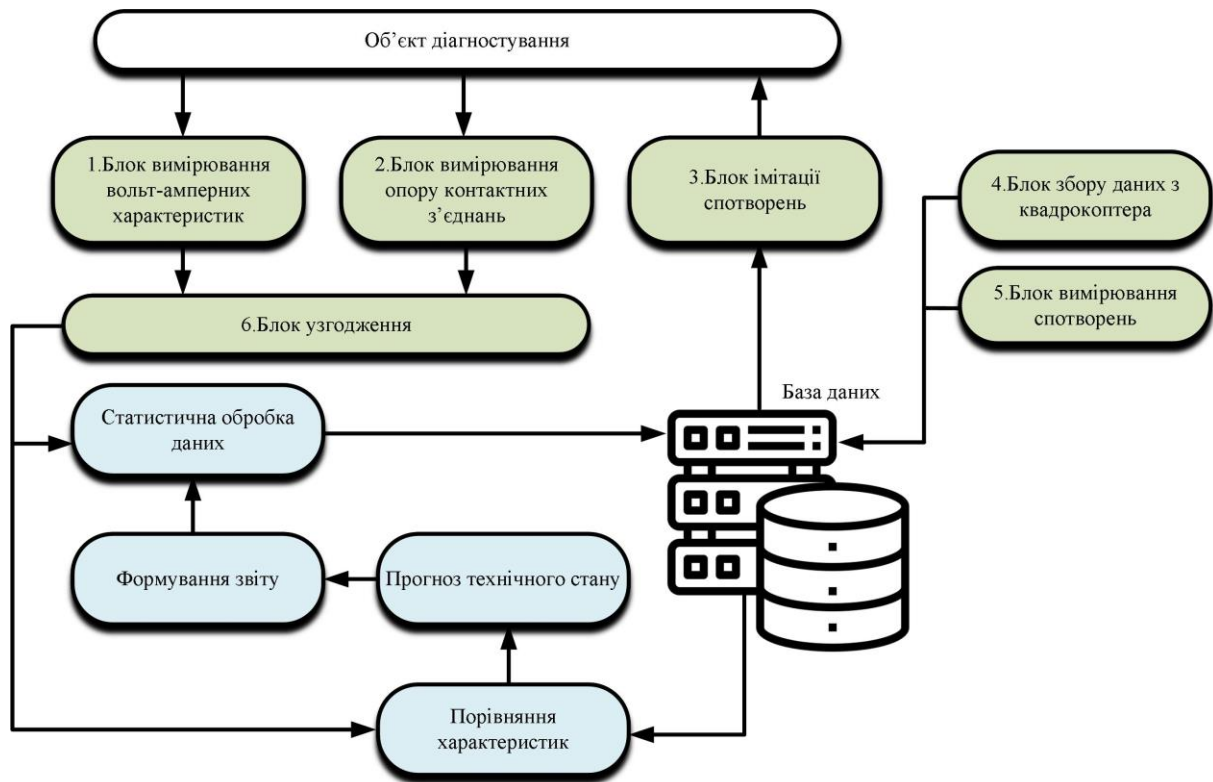
Оцінювання впливу виявлених дефектів на ефективність роботи ФЕС здійснюється в декілька етапів:

- оцінюються спотворення кривої напруги, які мають місце в електричній мережі без ФЕС (блок вимірювання спотворень);
- вимірюються опори контактних з'єднань окремих стрінгів, в яких є дефектні панелі (блок вимірювання опору контактних з'єднань);
- імітація спотворень (блок імітації спотворень) і запуск окремих інверторів, на які працюють стрінги з дефектними ФЕМ, вимірювання електричних параметрів та спотворень кривої напруги та струму (блок вимірювання спотворень);
- вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) стрінгів з дефектними ФЕМ (блок вимірювання ВАХ);
- за необхідності виконується вимірювання ВАХ окремих дефектних ФЕМ (блок вимірювання ВАХ).

Отримані результати вимірювання проходять процедуру узгодження шляхом прив'язки їх до окремих осередків і погодних умов, які мали місце під час проведення вимірювань (блок узгодження). Після цього вони проходять статистичну обробку з метою вилучення викидів і передаються в базу даних.

Наступним кроком відбувається порівняння отриманих результатів вимірювання з вимірюваннями, проведеними раніше на цьому ж об'єкті.

У випадку невідповідності поточного значення ретроспективному і розрахунковому, робиться висновок про необхідність додаткових досліджень, а саме розрахунок коефіцієнтів-індикаторів для локалізації області пошуку пошкодженої панелі, оскільки не кожен, виявлений на попередньому кроці дефект, впливає на ефективність функціонування ФЕС. Визначається також коефіцієнт залишкового ресурсу, що дозволяє ідентифікувати стан панелі та спрогнозувати розвиток дефекту.



Таблиця 1 – Блок-схема ПАК оцінювання технічного стану ФЕМ

Створюється нейро-нечітка мережа, яка дозволяє визначити генерування в залежності від метеорологічних факторів. Для встановлення зони нечутливості запропоновано використовувати критеріальний метод [7]. Особливістю використання критеріального методу є те, що оцінка чутливості здійснюється у відносних одиницях, оскільки визначення зони нечутливості в іменованих одиницях пов'язано з низкою складностей.

Поступове збільшення відхилення коефіцієнтів-індикаторів аномальної роботи ФЕМ, визначених за ретроспективними даними і поточними, свідчить про розвиток дефектів. Визначення тенденції зміни цих коефіцієнтів дозволяє прогнозувати розвиток дефектів [8]. Застосування теорії чутливості і оптимальної зони нечутливості дозволяють перейти до інтервальної оцінки і згрупувати ФЕМ за причинами деградації. Досвід такого підходу в динамічних системах, до яких відносяться і ЕЕС з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) зі зміною станів в часі та просторі, є позитивним [7, 9, 10].

Зокрема в [9] зазначено, що основні проблеми полягають у розробці відповідних математичних моделей, які враховують динаміку досліджуваного об'єкта. Складність задач визначення впливу технічного стану обладнання ФЕС на його генерування, головним чином, мають багаторівневу територіальну і часову ієрархію та характеризуються випадковим характером збурень, що діють на системи, зміною в часі параметрів досліджуваних об'єктів, багатомірністю та нелінійним характером останніх.

Не дивлячись на те, що багато задач визначення технічного стану динамічних систем нашли свій

розв'язок, подальше їх розповсюдження та вдосконалення залишається актуальним, у зв'язку з широким впровадженням сучасних засобів обчислювальної техніки та інформаційних технологій [11]. Впровадження їх у SCADA передбачає широкую автоматизацію основних функцій процесу керування ВДЕ: збору та обробки інформації, прийняття рішень з управління станами, їх техніко-економічного аналізу та автоматизації основних функцій керування з врахуванням обмежень, які зумовлені зміною технічного стану обладнання ВДЕ, метеорологічних факторів, вимогами системного оператора.

Сукупність сучасних електронно-обчислювальних машин, математичних методів моделювання та вимірювальних технічних засобів, що реалізують ідентифікацію технічного стану, дозволяє перейти на якісно новий рівень визначення технічного стану ФЕМ, використовуючи макромодельовання [12].

Програмне забезпечення оцінювання технічного стану ФЕС. Аномальну роботу ФЕМ у стрінгу пропонується оцінювати за допомогою коефіцієнтів-індикаторів, які вказують на наявність проблеми в його роботі. За результатами аналізу експериментальних даних, отриманих за допомогою ПАК, визначаються ВАХ і коефіцієнти залишкового ресурсу ФЕМ. При цьому враховується чутливість цих характеристик ФЕМ до зміни метеорологічних факторів, що контролюються [8].

Порядок розрахунку коефіцієнтів-індикаторів наступний. Визначається:

1. Різниця у відсотках між середнім значенням струму стрінгів I_{cp} і поточним значенням струму генерування конкретного досліджуваного стрінга I_i :

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{cp} - I_i)}{I_{cp}} 100\% . \quad (1)$$

2. Максимальна різниця у відсотках між середнім значенням струму стрінгів I_{cp} і поточним значенням струму генерування конкретного досліджуваного стрінга I_i :

$$k_2 = \max \frac{(I_{cp} - I_i)}{I_{cp}} 100\% . \quad (2)$$

3. Різниця у відсотках між середнім струмом всіх стрінгів I_{cp}^{max} та струмом стрінга I_i^{max} в точці максимального генерування:

$$k_3 = \frac{I_{cp}^{max} - I_i^{max}}{I_{cp}^{max}} . \quad (3)$$

4. Різниця у відсотках між середнім значенням струму всіх стрінгів I_{cp}^{min} та струмом стрінга I_i^{min} в точці мінімального генерування:

$$k_4 = \frac{I_{cp}^{min} - I_i^{min}}{I_{cp}^{min}} . \quad (4)$$

На рис. 2 і 3 показано приклади пошкоджень на ФЕМ, які виявлені за допомогою розробленого ПАК.

Питання щодо подальшої експлуатації ФЕМ вирішується за значеннями їх коефіцієнтів залишкового ресурсу. Оскільки пошкодження кожного з вузлів ФЕМ призводить до погіршення функціонування всього ФЕМ, то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (КЗР) знаходиться за виразом [13]:

$$k_{pec} = \prod_{j=1}^d k_j^{p_j} , \quad (5)$$

де k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ по j -му діагностичному параметру;

d – кількість діагностичних параметрів;

$p_j = n_j / m$ – ймовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра;

n_j – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю j -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення;

m – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

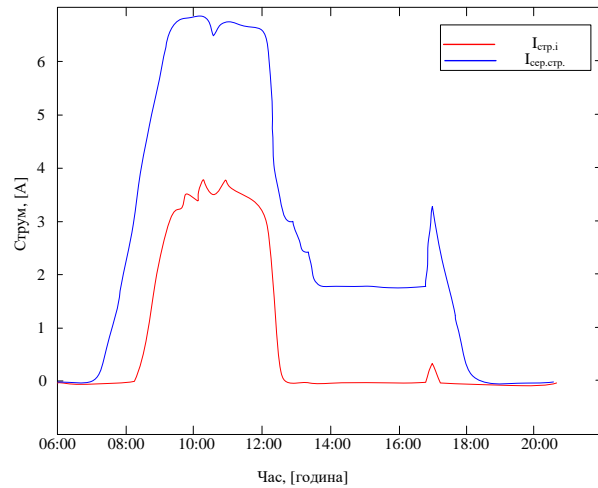


Рисунок 2 – Несправності сенсора струму

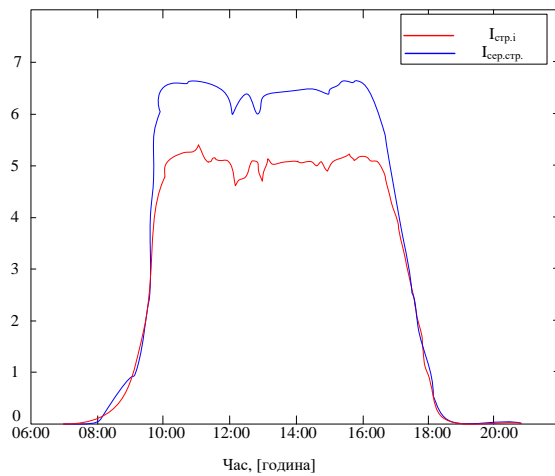


Рисунок 3 – Наявності «гарячих точок»

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ФЕМ (рис. 4). Жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан, він лише вказує на певні зміни технічного стану ФЕМ, що призводить до зменшення їх продуктивності. На даному етапі для вирішення поставленої задачі використовується методи теорії нечітких множин. Це дає змогу враховувати значення різних діагностичних параметрів під час діагностування ФЕМ і створити базу правил їх взаємовпливу. Створено та скореговано вибірку навчальних даних, за якими отримано аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Отримана залежність використовується у програмному забезпеченні мікропроцесорних пристроїв діагностування ФЕМ.



Рисунок 4 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

Формування початкових навчальних даних проводиться таким чином: для вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином у відносних одиницях від 0 до 1, визначається коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ. Навчання моделі та поточні розрахунки здійснюється у відносних одиницях по відхиленню діагностичних параметрів від норми. Коефіцієнти залишкового ресурсу деталей та вузлів ФЕМ залежать від поточних значень досліджених діагностичних параметрів і від їх кількості, що визначається за результатами експертної оцінки.

З метою наближення параметрів математичної моделі до реальних умов експлуатації опитують фахівців, що експлуатують, діагностують та ремонтують ФЕМ. Інформація, яка надана цими фахівцями, враховується під час створення тестової вибірки даних. Відкориговані експертами дані використовуються як навчальні дані при моделюванні. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor (Edit – редактор, Adaptive Network of Fuzzy Inference of the System – адаптивна мережа системи нечіткого висновку) з використанням гібридного навчального алгоритму та алгоритму нечіткого висновку Сугено отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ (з використанням методу субкласифікації).

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвістичних терми з гаусовими функціями належності, які обрані за критерієм мінімальної похибки навчання моделі:

$$k_{\text{рес.}i1} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1} - c_{i1})^2}{2 \cdot \sigma_{i1}^2}}, \quad (6)$$

де σ_{i1} та c_{i1} – числові параметри;

σ_{i1}^2 – дисперсія розподілу, а параметр c_{i1} – математичне сподівання;

i_1 – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру,

x_{i1} – значення i_1 -го вхідного параметра моделі, $i = \overline{1, d}$.

Ці терми визначають стан ФЕМ від нормального до несправного і відповідне значення припадає КЗР.

Значення цих коефіцієнтів змінюються від 1 відн. од. (ФЕМ справна) до 0 відн. од. (ФЕМ несправна). Значення КЗР згруповані в множини: нормальні значення діагностичних параметрів (КЗР $\in 1-0,76$), стан ФЕМ з незначними відхиленнями діагностичних параметрів (КЗР $\in 0,75-0,51$), передаварійний (КЗР $\in 0,5-0,26$) – з передаварійними відхиленнями діагностичних параметрів, аварійний (КЗР $\in 0,26-0$) – з аварійними відхиленнями діагностичних параметрів.

Для знаходження значення коефіцієнта загальному залишкового ресурсу використовується нечітка нелінійна авторегресійну модель КЗР ФЕМ. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення

між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ФЕМ:

$$k_{\text{рес.ФЕМ}} = F(k_1, \dots, k_d), \quad (7)$$

де F – нечітке функціональне перетворення.

Математична модель коефіцієнта загальному залишкового ресурсу зводиться до системи логічних рівнянь. На рис. 5, як приклад, наведено залежність вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів.

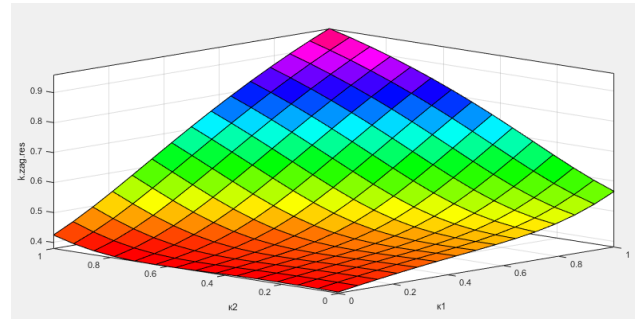


Рисунок 5 – Залежність КЗР ФЕМ від k_1 та k_2

Використання ПАК оцінювання деградації ФЕМ. На рис. 6 показана апаратна частина комплексу визначення технічного стану ФЕС, яка зібрана на платформі і може транспортуватися безпосередньо до ФЕС. ПАК за необхідності може комплектуватися квадрокоптером типу DJI Phantom 4 Multispectral, з якого передається і використовується інформація щодо результатів дистанційного обслідування ФЕС.



Рисунок 6 – Апаратна частина комплексу визначення технічного стану ФЕС

Виконано експериментальне дослідження розробленого ПАК. Об'єктом дослідження були ФЕМ, встановлені на лабораторних стендах, та ФЕМ на ФЕС, встановленій на даху навчального корпусу факультету електроенергетики. Перевірка контактних з'єднань ФЕС і від ФЕС до інвертора з лічильником електроенергії здійснюється приладом Актаком АММ-6015 (вимірювач опору). Опори контактних з'єднань знаходяться в допустимих межах. За допомогою тепловізора (OWON T1332) і пірометра

(Benetech GM1250) здійснюється обстеження ФЕМ на предмет дефектів, що проявляються областями з температурою, вищою за температуру справних ФЕМ. Було виявлено на ФЕМ ряд дефектних елементів, які обстежені детальніше (рис. 7). Для визначення працездатності ФЕМ і доцільності їх подальшої експлуатації визначається ВАХ.



Рисунок 7 – Пошкодження виявлені на ФЕМ шляхом візуального огляду

На рис. 8 показано, як за допомогою тестера електробезпеки сонячних установок Solar PV150 формується база даних для побудови і порівняння окремих ВАХ. Інформація передається на ноутбук, де обробляється розробленою програмою виявлення та діагностування появи дефектів або несправностей.

Побудовані ВАХ для ФЕМ виводяться для візуального аналізу на екран (рис. 9). В подальшому дані про ФЕМ використовуються для визначення коефіцієнтів залишкового ресурсу і для розрахунків коефіцієнтів-індикаторів аномальної роботи ФЕМ. За цими результатами приймається рішення щодо доцільності подальшої експлуатації ФЕМ. Визначається можливість їх відновлення або повної заміни.



Рисунок 8 – Збір інформації для оцінювання ефективності генерування електроенергії даховою ФЕС



Рисунок 9 – Розрахунок ВАХ програмою виявлення та діагностування появи дефектів або несправностей ФЕС

Аналогічні виміри для оцінювання ефективності генерування електроенергії були зроблені на ряді ФЕС в польових умовах.

Висновки. На нерівномірність генерування ВДЕ впливають не лише метеорологічні фактори, а й технічний стан обладнання ФЕС. Оскільки ФЕС експлуатуються в Україні досить нетривалий період і більшість ФЕМ є на гарантійному обслуговуванні, то відповідно проблем з діагностуванням не виникало, а власники у разі виявлення пошкодження заміняли ФЕМ по гарантії. З впровадженням процедури відшкодування гарантованому покупцю частки вартості небалансів електричної енергії для всіх виробників ВДЕ питання стабільного генерування є актуальним. Достовірне прогнозування генерування ФЕС неможливе без визначення їх технічного стану та врахування деградації ФЕМ під час їх експлуатації.

Розроблено метод діагностування ФЕМ в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ФЕМ і, в залежності від результату, зробити висновок про один зі станів ФЕМ (справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний) та зменшити похибку прогнозування такого стану. Під час випробувань, це дозволить виявити забруднення ФЕМ, несправності датчиків, а також пошкодження самих ФЕМ, наприклад наявність дефекту «гарячі точки», тощо.

Список літератури

1. Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та купівлі електричної енергії за «зеленим» тарифом та за аукціонною ціною : Постанова Нац. коміс., що здійснює держ. регулювання у сферах енергетики та комунал. послуг від 26.04.2019 р. № 641 : станом на 29 лип. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0641874-19#Text> (дата звернення: 13.09.2022).
2. Про затвердження Кодексу системи передачі : Постанова Нац. коміс., що здійснює держ. регулювання у сферах енергетики та комунал. послуг від 14.03.2018 р. № 309 : станом на 14 жовт. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 13.09.2022).
3. Kim J., Rabelo M., Padi S. P., Yousuf H., Cho E.-C., Yi J. A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 14. 4278. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144278>.
4. Aghaei M., Fairbrother A., Gok A., Ahmad S., Kazim S., Lobato K. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 159. 112160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>.
5. Rahimi K., Mohajeryami S., Majzoobi A. Effects of photovoltaic systems on power quality. *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, Denver, CO, USA, 18–20 September 2016. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/naps.2016.7747955>.
6. Review of failures of photovoltaic modules. 2014. 132 p. URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf (дата звернення: 05.03.2021).
7. Lezhniuk P., Komar V., Rubanenko O., Ostra N. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 1, no. 10. P. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.10.05>.
8. Castellà Rodil M., Kampouropoulos K., Urbano González E. M., Romeral Martínez J. L. Supervision and fault detection system for photovoltaic installations based on classification algorithms. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. P. 375–379. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj18.337>.
9. Lezhniuk P., Rubanenko O. Optimal solutions sensitivity analysis in complex systems in relative units. *Scientific research of the XXI century*. Sherman Oaks, CA, USA, 2021. P. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.51587/9781-7364-13302-2021-002>.
10. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем автоматического управления. Ленинград: Энергия, 1969. 208 с.
11. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теория автоматического керування. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2019. 208 с.
12. Lezhniuk P., Komar V., Kravchuk S. Macromodeling of electrical grids with renewable energy sources for assessing their energy efficiency. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 9, no. 1. P. 14–20.
13. Lezhniuk P., Rubanenko O., Rubanenko O. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters. *Fuzzy logic*. London, United Kingdom, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.84959>.

References

1. Ukraine, National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities. (2019, Apr. 26). *Decree of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities no. 641, Pro zatverdzhennia normatyvno-pravovykh aktiv, shcho zrehuluuiut dialnist harantovanoho pokuptsia ta kupivli elektrichnoi enerhii za «zelenym» taryfom ta za auktsionnoiu tsinoiu [On approval of regulatory legal acts governing the activities of the guaranteed buyer and the purchase of electricity at the "green" tariff and at the auction price]*. Accessed: Sep. 13, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0641874-19#Text>.
2. Ukraine, National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities. (2018, Mar. 14). *Decree of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities no. 309, Pro zatverdzhennia Kodeksu systemy peredachi [On Approval of the Transmission System Code]*. Accessed: Sep. 13, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>.
3. J. Kim, M. Rabelo, S. P. Padi, H. Yousuf, E.-C. Cho, and J. Yi, “A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy,” *Energies*, vol. 14, no. 14, Jul. 2021, Art. no. 4278, doi: <https://doi.org/10.3390/en14144278>.
4. M. Aghaei et al., “Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, May 2022, Art. no. 112160, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>.
5. K. Rahimi, S. Mohajeryami, and A. Majzoobi, “Effects of photovoltaic systems on power quality,” in *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, Denver, CO, USA, Sep. 18–20, 2016. pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/naps.2016.7747955>.
6. “Review of failures of photovoltaic modules,” IEA-PVPS T13-01:2014, Mar. 2014. Accessed: Mar. 5, 2021. [Online]. Available: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf
7. P. Lezhniuk, V. Komar, O. Rubanenko, and N. Ostra, “The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 10, pp. 34–40, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.15199/48.2020.10.05>.
8. M. Castellà Rodil, K. Kampouropoulos, E. M. Urbano González, and J. L. Romeral Martínez, “Supervision and fault detection system for photovoltaic installations based on classification algorithms,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 18, pp. 375–379, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.24084/repqj18.337>.
9. P. Lezhniuk and O. Rubanenko, “Optimal solutions sensitivity analysis in complex systems in relative units,” in *Scientific Research of the XXI Century*. Sherman Oaks, CA, USA: GS publishing service, 2021, pp. 111–118, doi: <https://doi.org/10.51587/9781-7364-13302-2021-002>.
10. E. N. Rozenvasser and R. M. Yusupov, *Chuvstvytelnost system avtomaticheskoho upravleniya [Sensitivity of automatic control systems]*. Leningrad: Energy, 1969. (in Russian)
11. P. F. Hoholiuk and T. M. Hrechyn, *Teoriia avtomatichnoho keruvannia [Theory of automatic control]*. Lviv: Lviv Polytechnic University Publishing House, 2019. (in Ukrainian)
12. P. Lezhniuk, V. Komar, and S. Kravchuk, “Macromodeling of electrical grids with renewable energy sources for assessing their

- energy efficiency,” *Computational Problems of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 14–20, 2019.
13. P. Lezhniuk, O. Rubanenko, and O. Rubanenko, “Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of

diagnostic parameters,” in *Fuzzy logic*. London, United Kingdom: IntechOpen, 2020, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.84959>.

Надійшла (received) 12.11.2022

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Комар Вячеслав Олександрович (Viacheslav Komar) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4969-8553>; e-mail: kvo1976@ukr.net.

Лежнюк Петро Дем'янович (Petro Lezhniuk) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри електричних станцій і систем; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9366-3553>; e-mail: lezhpd@gmail.com.

Лесько Владислав Олександрович (Vladyslav Lesko) – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри електричних станцій і систем; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5477-7080>; e-mail: leskovlad@ukr.net.

Гунько Ірина Олександрівна (Iryna Hunko) – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри електричних станцій і систем; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2868-4056>; e-mail: iryna_hunko@ukr.net.

Смагло Іван Іванович (Ivan Smaglo) – аспірант кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2662-0091>; e-mail: smagloivan91@gmail.com.