

## ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИМИ ЗАСОБАМИ

Отримано 30 груд. 2022; рекомендовано до публікації 22 бер. 2023  
Доступно онлайн 31 бер. 2023

**В. О. Комар<sup>1</sup>, П. Д. Лежнюк<sup>2</sup>,  
І. О. Гунько<sup>3</sup>, І. І. Смагло<sup>4</sup>**

Автор для кореспонденції: Ірина Гунько,  
e-mail: iryna\_hunko@ukr.net

*На сьогодні фотоелектричні станції (ФЕС) посідають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС). Отже, важливо знати, яку кількість електроенергії може генерувати ФЕС і за яким графіком. Серед причин несталого генерування ФЕС слід відмітити їх незадовільний технічний стан, зокрема поступову деградацію фотоелектричних модулів (ФЕМ). Оцінка поточного технічного стану й перспектив щодо можливості вироблення електроенергії в заданому об'ємі необхідна для участі ФЕС в процесах, що відбуваються в ЕЕС. Для планування виробітку електроенергії й оцінювання доцільності витрат на ремонт ФЕС інвестор має володіти інформацією про їх залишковий ресурс по відношенню до розрахункового на початок експлуатації. Це висуває відповідні умови щодо методів і засобів моніторингу технічного стану ФЕС. У роботі розроблено алгоритм формування даних для оцінювання технічного стану ФЕС. В основу алгоритму покладено математичну модель процесу функціонування ФЕС за результатами ретроспективних даних та дані моніторингу і прогнозування з метою виявлення дефектів та несправностей. Насамперед у статті йдеться про оцінку технічного стану ФЕМ. Для оцінювання працездатності ФЕМ запропоновано використовувати коефіцієнти-індикатори, які вказують на аномальну роботу ФЕМ у стрінгу і фактично сигналізують про наявність проблеми в його роботі. Визначено діагностичні параметри і за їх значеннями визначаються коефіцієнти залишкового ресурсу ФЕМ. Жоден з цих параметрів повною мірою не характеризує технічний стан ФЕМ, а лише вказує на певні його зміни. На даному етапі для вирішення поставленої задачі використовуються методи теорії нечітких множин, що дає змогу враховувати значення різних параметрів під час діагностування ФЕМ і створити базу правил їх взаємодії. Бібл. 12. Рис. 5.*

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

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф., зав. каф. електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0003-4969-8553>

<sup>2</sup> д-р техн. наук, проф., каф. електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, ст. наук. співр. відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0002-9366-3553>

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доц., каф. електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0003-2868-4056>

<sup>4</sup> аспірант каф. електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0003-2662-0091>

## ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF PHOTOVOLTAIC STATION EQUIPMENT USING SOFTWARE AND HARDWARE TOOLS

Received 30 Dec. 2022; accepted 22 Mar. 2023  
Available online 31 Mar. 2023

**V. Komar<sup>1</sup>, P. Lezhniuk<sup>2</sup>, I. Hunko<sup>3</sup>, I. Smaglo<sup>4</sup>**

Author for correspondence: Iryna Hunko,  
e-mail: iryna\_hunko@ukr.net

<sup>1</sup> DScTech, Prof., Chair of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.  
<https://orcid.org/0000-0003-4969-8553>

Today, photovoltaic power stations (PVS) occupy a prominent place in the balance of power and electricity of electric power systems (EPS). It becomes important to know how much electricity and according to what time schedule the PVS can generate it. Among the various reasons for the unstable generation of photovoltaic power stations, their technical condition should be noted, in particular, the gradual degradation of photovoltaic modules (PVM). For the participation of PVS in the processes taking place in the EPS, it is necessary to know their current technical condition and prospects regarding the possibility of generating electricity in a given volume. An investor is interested in knowing their residual resource in relation to the estimated one at the start of operation, in order to plan electricity generation and plan the expediency of costs for the repair of the PVS. This puts forward appropriate conditions for the methods and means of assessing the technical condition of the PVS. In the article, an algorithm of data generation for assessing the technical condition of the FES was wrote. The basis of the algorithm is a mathematical model of the PVS operation process based on the results of retrospective data and monitoring and forecasting data for the purpose of detecting defects and malfunctions. First of all, the article deals with the evaluation of the technical condition of PVM. To evaluate the PVM performance, it is proposed to use indicator coefficients that indicate the abnormal operation of the PVM in the string and actually signal the presence of a problem in its operation. The diagnostic parameters are determined and the coefficients of the PVM residual resource are determined based on their values. None of these parameters fully characterizes the technical condition, it only indicates certain changes in the technical condition of the PVM. At this stage, methods of fuzzy set theory are used to solve the given problem, which makes it possible to take into account the values of various diagnostic parameters during PVM diagnostics and create a base of rules for their interaction. Ref. 12. Fig. 5.

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

#### Перелік використаних позначень та скорочень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії  
 ЕЕС – електроенергетична система  
 КЗР – коефіцієнт залишкового ресурсу

ФЕМ – фотоелектричний модуль  
 ФЕС – фотоелектрична станція

**Вступ і постановка завдання.** Через швидкі темпи нарощування встановленої потужності ФЕС виникають нові проблеми, які потребують термінового вирішення. Пояснюється це тим, що відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема ФЕС, посідають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС). Звідси впливає необхідність відповідальніше ставитися до планових та фактичних графіків генерування ФЕС, а також до реальних можливостей виробляти ними електроенергію у відповідному об'ємі [1]. На останнє впливають не тільки погодні умови, що очевидно, але і технічний стан обладнання ФЕС. Для забезпечення надійності електропостачання необхідно виявляти пошкодження обладнання ФЕС та прогнозувати їх виникнення, планувати заміни пошкодженого обладнання та його відновлення. Особливої уваги потребують

фотоелектричні модулі (ФЕМ), для яких природним є зменшення з часом їх продуктивності (деградація) [2, 3]. 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 [4].

Можна виділити три способи діагностування пошкоджень: 1) візуальний огляд, що потребує значних витрат часу й зусиль; 2) обробка зображень, яка може бути розділена на термографію, електролюмінесценцію та УФ-флуоресценцію, що передбачає використання безпілотних технологій та іноді вимагає відключення станції від мережі; 3) аналіз електричних вимірювань, який можна

отримати за допомогою встановленої системи моніторингу [5]. 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 значення потужності, що використовується для виявлення пошкоджень, не коректно використовувати при виявленні технічного стану для ФЕС, які підключені до мережі й експлуатуються в невідповідних умовах.

**Метою статті** є розроблення нових рішень для моніторингу, класифікації та виявлення несправностей (пошкоджень) роботи ФЕС, а також ідентифікація її технічного стану з урахуванням ретроспективних даних, отриманих за допомогою SCADA-систем.

**Формування даних для оцінювання технічного стану ФЕС.** Запропонований метод базується на двох етапах, як показано на рис. 1.

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.

Запропонований метод працює наступним чином (див. рис. 1). Накопичуються дані про значення потужності генерування станції та струми стрінгів з урахуванням певних метеорологічних факторів (Блок 1), їх поточні значення порівнюють з ретроспективними (Блок 5), формується множина таких наборів, при яких метеорологічні фактори не виходять за зону нечутливості, межі якої визначені критеріальним методом (Блок 4). Поточне значення потужності порівнюють з ретроспективним, при однакових чи наближених метеорологічних факторах зі сформованої множини (Блок 6). Для додаткової перевірки й виключення похибки пропонується також порівнювати потужність генерування з розрахунковим значенням, визначеним з використанням нейро-нечіткої мережі (Блок 3) (навчальна вибірка і система логічних рівнянь попередньо коригується експертами з врахуванням особливостей роботи конкретної станції (Блок 2)). У разі невідповідності поточного значення ретроспективному й розрахунковому, робиться висновок про потребу додаткових досліджень, а саме розрахунок коефіцієнтів-індикаторів для локалізації області пошуку пошкодженої панелі та визначення коефіцієнта залишкового ресурсу (Блок 7), що дозволить ідентифікувати стан панелі (Блок 8) та спрогнозувати розвиток дефекту.

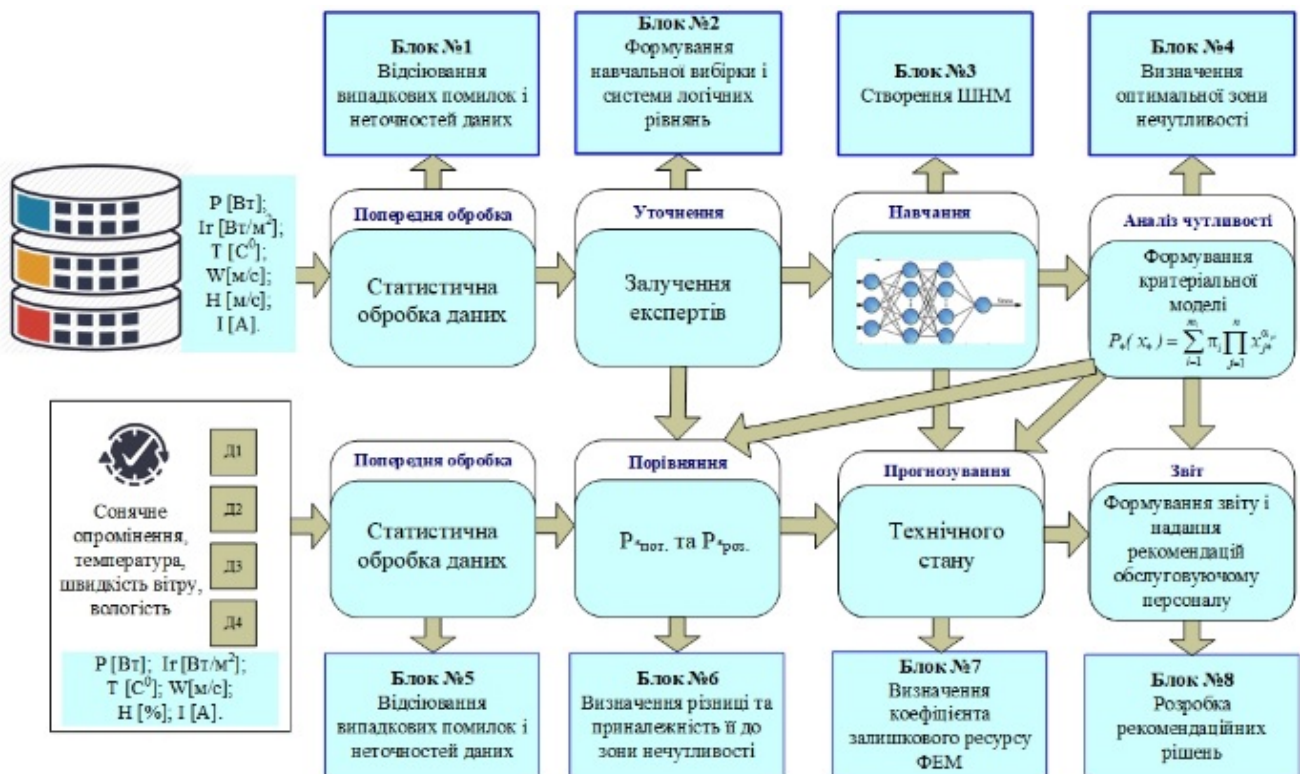


Рис. 1. Логічна схема оцінювання технічного стану ФЕС

Fig. 1. Logical scheme for assessing the technical condition of the FES

Отримані дані фільтрують і коригують у разі планового припинення роботи обладнання станції, вимушеного обмеження роботи тощо. Створюється нейро-нечітка мережа, яка дає змогу визначати генерування в залежності від метеорологічних факторів. Для встановлення зони нечутливості запропоновано застосовувати критеріальний метод [6]. Особливістю його використання є те, що оцінка чутливості здійснюється у відносних одиницях, оскільки визначення зони нечутливості в іменованих одиницях пов'язане з низкою складностей. Поточні значення генерування порівнюють з ретроспективним, при таких самих або наближених значеннях метеорологічних факторів. Якщо значення відхилення виходить за зону нечутливості, то потрібно проводити додаткові дослідження, а саме контролювати значення струмів стрінгів (визначати індикатори аномальної їх роботи) і визначати той, в якому є пошкоджені панелі.

Поступове збільшення відхилення коефіцієнтів – індикаторів аномальної роботи ФЕМ, визначених за ретроспективними і поточними даними, свідчить про розвиток дефектів. Визначення тенденції зміни цих коефіцієнтів дає змогу прогнозувати розвиток дефектів [7].

Оптимальна зона нечутливості визначається за допомогою теорії чутливості [6, 8, 9]. Зокрема в [8] показано, 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 здебільшого мають багаторівневу територіальну й часову ієрархію та характеризуються випадковим характером збурень, що діють на системи, зміною в часі параметрів досліджуваних об'єктів, багатомірністю й нелінійним характером останніх.

Незважаючи на те що розв'язано багато задач визначення технічного стану динамічних систем, подальше їх розповсюдження та вдосконалення залишається актуальним з огляду на широке впровадження сучасних засобів обчислювальної техніки та інформаційних технологій [10]. Впровадження цих систем у SCADA передбачає широку 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 урахуванням обмежень, які зумовлені зміною технічного стану обладнання ВДЕ, метеорологічних факторів, вимогами системного оператора. Сукупність сучасних ЕОМ, математичних методів моделювання та вимірювальних технічних засобів, що реалізують ідентифікацію технічного стану, дає змогу перейти на якісно новий рівень визначення технічного стану ФЕМ, використовуючи макромодельовання [11].

**Коефіцієнти – індикатори аномальної роботи ФЕМ.** Запропоновано використовувати коефіцієнти-індикатори, що вказують на аномальну роботу ФЕМ у стрінгу і фактич-

но сигналізують про наявність проблеми в роботі стрінгу, а врахування їх чутливості до зміни метеорологічних контрольованих факторів виключає помилкові рішення [7]. Порядок розрахунку коефіцієнтів-індикаторів такий. Визначається:

1. Різниця у відсотках між середнім значенням струму стрінгів  $I_{cm\ cp}$  і поточним значенням струму генерування конкретного досліджуваного стрінгу  $I_{cm\ i}$ :

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

2. Максимальна різниця у відсотках між середнім значенням струму стрінгів  $I_{cm\ cp}$  і поточним значенням струму генерування конкретного досліджуваного стрінгу  $I_{cm\ i}$ :

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

3. Дисперсія середнього значення струму всіх стрінгів  $I_{cm\ cp}$  та дисперсія струму стрінга  $I_{cm\ i}$ :

$$k_3 = \sum_{i=1}^n (I_{cm\ i} - \bar{I}_{cm}) , \quad (3)$$

$$k_4 = \sum_{i=1}^n (I_{cm\ cp\ i} - \bar{I}_{cm\ cp}) . \quad (4)$$

4. Різниця у відсотках між середнім струмом всіх стрінгів  $I_{cm\ cp}^{t\ max(I_{cm\ cp})}$  та струмом стрінгу  $I_{cm\ i}^{t\ max(I_{cm\ i})}$  в точці (момент) максимального генерування:

$$k_5 = \frac{I_{cm\ cp}^{t\ max(I_{cm\ cp})} - I_{cm\ i}^{t\ max(I_{cm\ i})}}{I_{cm\ cp}^{t\ max(I_{cm\ cp})}} . \quad (5)$$

5. Різниця у відсотках між середнім значенням струму всіх стрінгів  $I_{cm\ cp}^{t\ min(I_{cm\ cp})}$  та струмом стрінгу  $I_{cm\ i}^{t\ min(I_{cm\ i})}$  в точці (момент) мінімального генерування:

$$k_6 = \frac{I_{cm\ cp}^{t\ min(I_{cm\ cp})} - I_{cm\ i}^{t\ min(I_{cm\ i})}}{I_{cm\ cp}^{t\ min(I_{cm\ cp})}} . \quad (6)$$

На рис. 2 і 3 показано приклади виявлення пошкоджень на ФЕС за допомогою розробленого програмно-апаратного комплексу.

**Коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ.** Враховуючи те, що пошкодження кожного з вузлів ФЕМ призводить до пошкодження всього ФЕМ, коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом [12]:

$$k_{pec} = \prod_{j=1}^v k_j^{p_j} , \quad (7)$$

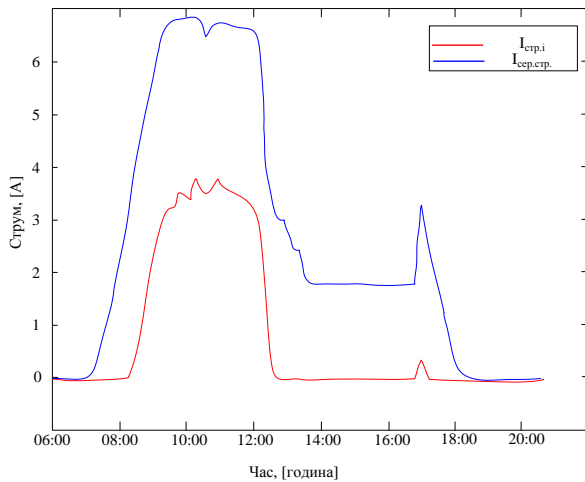


Рис. 2. Приклад несправності давача струму

Fig. 2. Example of current sensor malfunction

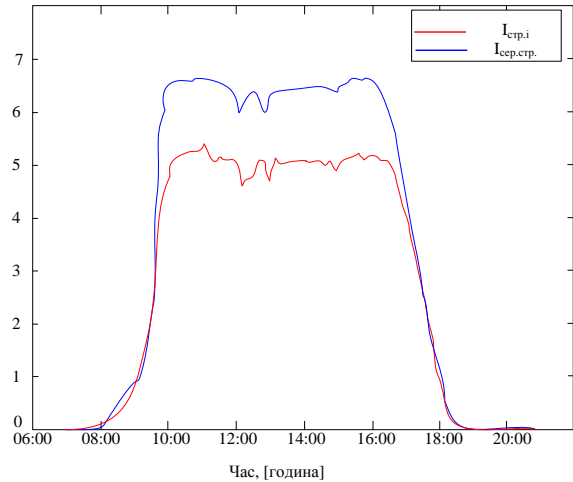


Рис. 3. Приклад наявності «гарячих точок»

Fig. 3. An example of the presence of "hot spots"

де  $k_j$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ за  $j$ -м діагностичним параметром;  $\nu$  – кількість діагностичних параметрів;  $p_j = n_j / m$  – імовірність 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 із 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.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ФЕМ (див. рис. 4). Жоден з цих параметрів не характеризує повною мірою технічний стан ФЕМ, він лише вказує на певні його зміни. На даному етапі для вирішення поставленої задачі використовуються методи теорії нечітких множин. Це дає змогу враховувати значення різних діагностичних параметрів під час діагностування ФЕМ і

створити базу правил їх взаємодії. Створено та скореговано вибірку навчальних даних, за якими отримано аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від діагностичних параметрів у вигляді полінома. Отримана залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ФЕМ.

Формування початкових навчальних даних проводиться в такий спосіб: для вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, визначається коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ. Для зручності оперування даними і зменшення похибки навчання моделі та спрощення поточних розрахунків вхідні параметри моделі зводяться до відносних одиниць їх відхилення від норми. Коефіцієнти залишкового ресурсу деталей та вузлів ФЕМ залежать від поточних значень досліджених діагностичних параметрів. Кількість параметрів за результатами експериментальних досліджень може збільшуватися.

З метою наближення параметрів математичної моделі до реальних умов експлуатації опитують фахівців, що експлуатують, діагностують і ремонтують ФЕМ. Інформація, яка



Рис. 4. Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

Fig. 4. Structural diagram of the FEM residual resource coefficient model

надана цими фахівцями, враховується під час створення тестової вибірки даних. Відкориговані експертами дані використовуються як навчальні дані при моделюванні. Для цього застосовувався 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 використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено отримано нейро-нечіт-ку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ (із застосуванням методу субкластеризації).

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

$$k_{\text{рес.}i1} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1}-c_{i1})^2}{2\sigma_{i1}^2}}, \quad (8)$$

де  $\sigma_{i1}$  та  $c_{i1}$  – числові параметри;  $\sigma_{i1}^2$  – 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,  $i = \overline{1, v}$ .

Це такі терми, як: «нормальне» (стан ФЕМ – справний) значення діагностичного параметра – коефіцієнта його залишкового ресурсу (КЗР). Значення цих коефіцієнтів змінюються від 1 в. о. (ФЕМ справна) до 0 в. о. (ФЕМ справний). 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 загального залишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ФЕМ:

$$k_{\text{рес.}ФЕМ} = F(k_1, \dots, k_v), \quad (9)$$

де  $F$  – нечітке функціональне перетворення.

Математична модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу зводиться до системи логічних рівнянь:

**ЯКЩО**  $k_1 \in$  "нормальне" **ТА**  $k_2 \in$  "нормальне"  
**ТА**  $k_3 \in$  "нормальне" **ТА**  $k_4 \in$  "нормальне"  
**ТА**  $k_5 \in$  "нормальне" **ТА**  $k_6 \in$  "нормальне"  
**ТО**  $k_{\text{рес.}ФЕМ} = a_{11}k_1 + a_{12}k_2 + a_{13}k_3 + a_{14}k_4 + a_{15}k_5 + a_{16}k_6$   
**ЯКЩО**  $k_1 \in$  "незначне відхилення"  
**ТА**  $k_2 \in$  "незначне відхилення"  
**ТА**  $k_3 \in$  "нормальне" **ТА**  $k_4 \in$  "незначне відхилення" **ТА**  $k_5 \in$  "незначне відхилення"  
**ТА**  $k_6 \in$  "незначне відхилення"  
**ТО**  $k_{\text{рес.}ФЕМ} = a_{21}k_1 + a_{22}k_2 + a_{23}k_3 + a_{24}k_4 + a_{25}k_5 + a_{26}k_6$   
**ЯКЩО**  $k_1 \in$  "передаварійне" **ТА**  $k_2 \in$  "передаварійне" **ТА**  $k_3 \in$  "передаварійне"  
**ТА**  $k_4 \in$  "передаварійне" **ТА**  $k_5 \in$  "передаварійне" **ТА**  $k_6 \in$  "передаварійне"  
**ТО**  $k_{\text{рес.}ФЕМ} = a_{31}k_1 + a_{32}k_2 + a_{33}k_3 + a_{34}k_4 + a_{35}k_5 + a_{36}k_6$   
**ЯКЩО**  $k_1 \in$  "аварійне" **ТА**  $k_2 \in$  "аварійне"  
**ТА**  $k_3 \in$  "аварійне" **ТА**  $k_4 \in$  "аварійне"  
**ТА**  $k_5 \in$  "аварійне" **ТА**  $k_6 \in$  "аварійне"  
**ТО**  $k_{\text{рес.}ФЕМ} = a_{41}k_1 + a_{42}k_2 + a_{43}k_3 + a_{44}k_4 + a_{45}k_5 + a_{46}k_6$   
 ...

Вихід моделі  $k_{\text{рес.}ФЕМ}$  знаходиться як зрівноважена сума висновків бази правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь.

Якщо спостерігаються незначні відхилення діагностичних параметрів, то за другим правилом

$$k_{\text{рес.}ФЕМ} = \sum_{j2=1}^{m_2} w_{j2} \left( a_{j21}k_1 + a_{j22}k_2 + a_{j23}k_3 + a_{j24}k_4 + a_{j25}k_5 + a_{j26}k_6 + c_{j2} \right)$$

де  $0 \leq w_{j2} \leq 1$  – ступінь виконання (вага)  $j_2$ -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ФЕМ, що відображені у другому правилі;  $m_2$  – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів функцій належності і рівнянь висновку. Необхідно визначити середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{k1} - \sigma_{k6}$  та математичне очікування  $c_{k1}, c_{k2}, c_{k3}, c_{k4}$  гаусових функцій належності, параметри рівнянь висновку ( $a_{11} - a_{44}, c_1 - c_4$ ). Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретної

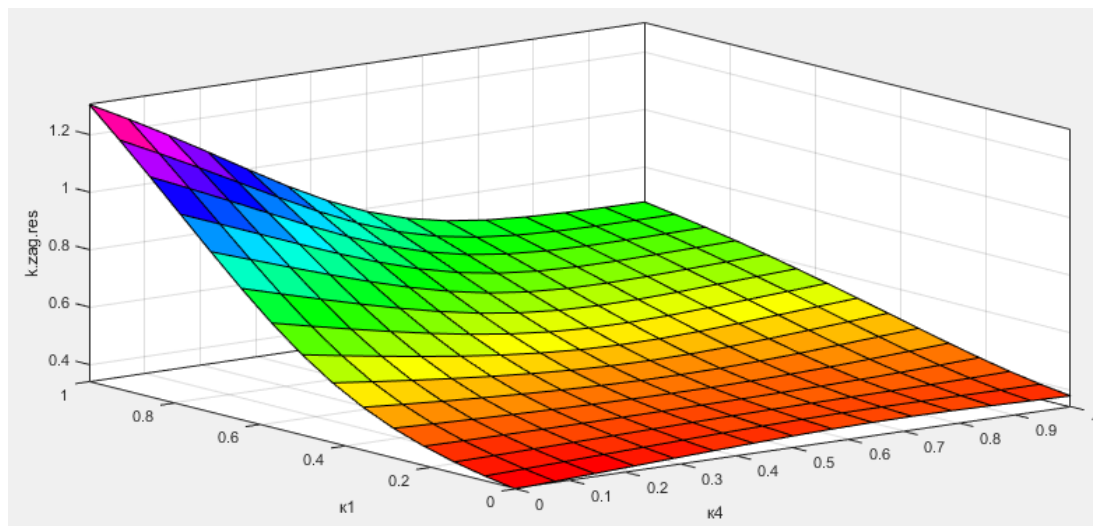


Рис. 5. Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від  $k_1$  та  $k_4$

Fig. 5. Dependence of the FEM residual resource coefficient on  $k_1$  and  $k_4$

ФЕМ модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечної багат шарової мережі прямого розповсюдження ANFIS.

Складність залежності вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, що як приклад наведені на рис. 5.

**Висновки.** На нерівномірність генерування ВДЕ впливають не лише метеорологічні фактори, а й технічний стан обладнання ФЕС. Оскільки ФЕМ експлуатуються в Україні досить нетривалий період і більшість ФЕМ є на гарантійному обслуговуванні, то проблем з діагностуванням не виникало, а власники в разі виявлення пошкоджень замінювали ФЕМ за гарантією. Але з впровадженням процедури відшкодування гарантованому покупцю частки вартості небалансів електричної енергії для всіх виробників ВДЕ питання стабільного і прогнозованого генерування є актуальнішим, оскільки невідповідність заявленого генерування реальному передбачає фінансову відповідальність. Достовірне прогнозування генерування ФЕС неможливе без визначення їх технічного стану, адекватного планування обсягів і термінів ремонтних робіт і т. д. Також треба враховувати, що деякі ФЕМ мають різні темпи деградації, що пов'язано з технологією виробництва та особливостями навколишнього середовища, в якому експлуатуються ФЕМ.

Розроблено метод діагностування ФЕМ в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє отримати точне значення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ і, залежно 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.

## ПОСИЛАННЯ

1. Про затвердження Кодексу системи передачі, 2018. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=31909>
2. 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, 14, 4278. <https://doi.org/10.3390/en14144278>
3. M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle, Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 159. 2022, 112160, ISSN 1364-0321,
4. Rahimi K., Mohajeryami S., Majzoobi A. Effects of photovoltaic systems on power quality, *2016 North American Power Symposium (NAPS)*. 2016. P. 1–6.
5. M. Köntges et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. URL: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS\\_T13-01\\_2014\\_Review\\_of\\_Failures\\_of\\_Photovoltaic\\_Modules\\_Final.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf) (дата звернення: 5.03.2021).
6. Petr Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Olena Rubanenko, Natalia Ostra. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources // *Przeglad Elektrotechniczny*, 2020. Vol. 10. P. 32–38. <https://doi.org/10.15199/48.2020.10.05>.
7. Supervision and fault detection system for photovoltaic installations based on classification algorithms. Castellà M., Kampouropoulos K., Urbano E., Romeral L., *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2020. Vol. 18. P. 375–379.
8. Lezhniuk P., Rubanenko O. Optimal solutions sensitivity analysis in complex systems in relative units. *Chapter of*

- book: Scientific research of the XXI century.* 2021. Vol. 2. P. 111–118.
9. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем автоматического управления. – Ленинград: Энергия, 1969. 208 с.
  10. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2019. 208 с.
  11. Lezhniuk P., Komar V., Kravchuk S. Macromodeling of electrical grids with renewable energy sources for assessing their energy efficiency. *Computational Problems of Electrical Engineering*. Lviv: Lviv Politechnic Publishing House, 2019. Vol. 9. No 1. P. 14–20.
  12. Petro Lezhniuk, Olexander Rubanenko, Olena Rubanenko. Determination of Optimal Transformation Ratios of Power System Transformers in Conditions of Incomplete Information Regarding the Values of Diagnostic Parameters. – Chapter of book: “Fuzzy Logic”. 2019. P. 97–124. <https://doi: 10.5772/intechopen.84959>.
  5. M. Köntges et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. URL: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS\\_T13-01\\_2014\\_Review\\_of\\_Failures\\_of\\_Photovoltaic\\_Modules\\_Final.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf) (accessed 03/05/2021).
  6. Petr Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Olena Rubanenko, Natalia Ostra. The sensitivity of the process of optimal decision making in electrical networks with renewable energy sources // *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020. Vol. 10. P. 32–38. <https://doi:// 10.15199/48.2020.10.05>.
  7. Supervision and fault detection system for photovoltaic installations based on classification algorithms. Castellà M., Kampouropoulos K., Urbano E., Romeral L., *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2020. Vol. 18. P. 375–379.
  8. Lezhniuk P., Rubanenko O. Optimal solutions sensitivity analysis in complex systems in relative units. Chapter of book: *Scientific research of the XXI century.* 2021. Vol. 2. P. 111–118.
  9. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. Sensitivity of automatic control systems. - Leningrad: Energy, 1969. 208 p.
  10. Gogolyuk P.F., Grechyn T.M. Theory of automatic control. - Lviv: Lviv Polytechnic University Publishing House, 2019. 208 p.
  11. Lezhniuk P., Komar V., Kravchuk S. Macromodeling of electrical grids with renewable energy sources for assessing their energy efficiency. *Computational Problems of Electrical Engineering*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2019. Vol. 9. No. 1. P. 14–20.
  12. Petro Lezhniuk, Olexander Rubanenko, Olena Rubanenko. Determination of Optimal Transformation Ratios of Power System Transformers in Conditions of Incomplete Information Regarding the Values of Diagnostic Parameters. – Chapter of book: “Fuzzy Logic”. 2019. P. 97–124. <https://doi: 10.5772/intechopen.84959>.

#### REFERENCES

1. On approval of the Transmission System Code, 2018. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=31909>
2. 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, 14, 4278. <https://doi.org/10.3390/en14144278>
3. M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle, Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 159. 2022, 112160, ISSN 1364-0321,
4. Rahimi K., Mohajeryami S., Majzoobi A. Effects of photovoltaic systems on power quality, 2016 North American Power Symposium (NAPS). 2016. R. 1–6.