

# Аналіз нестабільності генерування відновлюваними джерелами енергії з урахуванням їх технічного стану

О.О. Рубаненко

Вінницький національний технічний університет  
Україна

E-mail: [olenarubanenko@ukr.net](mailto:olenarubanenko@ukr.net)

**Анотація** – В статті досліджено актуальність переходу від традиційних джерел енергії до відновлюваних. Виділено найбільш популярні відновлювані джерела енергії (ВДЕ) для України і світу. Проаналізовано тенденцію зміни генерування електроенергії фотоелектричними станціями. Розглянуто особливості функціонування електричних мереж з ВДЕ. Представлена математична модель задачі оптимального керування параметрами нормального режиму електроенергетичної системи (ЕЕС) з високим рівнем інтеграції фотоелектричних станцій (ФЕС). Виділено основні складові критерію оптимальності при керуванні ЕЕС, які потрібно враховувати при його визначенні. В статті більш детально досліджено такий компонент критерію оптимальності, як потужність еквівалентна збитку через недовідпуск електроенергії, викликаний нестабільним генеруванням. Нестабільність генерування ВДЕ, зокрема, ФЕС, може бути викликана як непередбачуваною зміною метеорологічних факторів, так і зміною технічного стану обладнання ФЕС. Фотоелектричний модуль є основним елементом будь-якої ФЕС, тому стаття сфокусована на визначенні технічного стану саме ФЕМ. Тому основним дослідженням представленим в статті є розробка нейро-нечіткого моделі для визначення технічного стану ФЕМ, який представлений коефіцієнтом загального залишкового ресурсу. З цією метою проаналізовано і представлено характерні пошкодження ФЕМ, зокрема, пошкодження каркасу ФЕМ; пошкодження ізоляції кабелів; наслідки зростання опору та нагріву контактів в місці з'єднання cell busbar ФЕМ; пошкодження герметичності ФЕМ та інші.

**Ключові слова** – відновлювані джерела енергії, технічний стан, фотоелектрична станція, фотоелектричний модуль, нестабільність генерування електроенергії.

## I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З часів індустріальної революції більшість країн світу все ще залежні від викопних видів палива. Ця залежність спричиняє серйозні наслідки для клімату, а також для здоров'я людини. Три чверті глобальних викидів парникових газів є результатом спалення викопного палива для генерування електроенергії. Також, використання викопного палива призводить до забруднення повітря і щороку призводить до щонайменше 5 мільйонів передчасних смертей [1]. Зокрема в [1] зазначено, щоб зменшити викиди CO<sub>2</sub> та забруднення повітря, світ повинен швидко перейти до

низьковуглецевих джерел енергії – ядерних та відновлюваних технологій.

Сьогодні найпопулярнішими відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) є: сонячна енергія; енергія вітру; гідроенергія; енергія припливів; геотермальна енергія; енергія біомаси.

Стати першим у світі кліматично нейтральним континентом до 2050 року є метою Європейської енергетичної стратегії зеленого курсу, найамбітнішого пакету заходів, який повинен дозволити європейським громадянам та бізнесу отримати вигідні умови для реалізації стратегії сталого розвитку. Використання відновлюваної енергії має багато потенційних переваг, включаючи зменшення викидів парникових газів, диверсифікацію енергопостачання та зменшення залежності від вартості викопного палива (зокрема, нафти та газу).

Швидкі темпи будівництва нових об'єктів ВДЕ може також стимулювати зайнятість населення в ЄС шляхом створення робочих місць у нових «зелених» технологіях. У [2] подано останні статистичні дані щодо частки енергії з відновлюваних джерел загалом та у трьох секторах споживання (електроспоживання, опалення та охолодження та транспорт) у Європейському Союзі (ЄС) [2]. За даними NREL ([National Renewable Energy Laboratory](http://www.nrel.gov)), за одну годину на Землю надходить більше енергії сонця, ніж використовується населенням Землі за один рік. Сьогодні використовується енергія сонця по-різному – для обігріву будинків і підприємств, для нагрівання води або генерування електроенергії [3]. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства попит на ВДЕ зростає, незважаючи на негативний вплив ситуації, викликані Covid-19 [4].

За даними IRENA з кожним роком зростає світове генерування електроенергії ВДЕ, одним з найпопулярніших видів ВДЕ є сонячна. Світова тенденція збільшення генерування електроенергії фотоелектричними станціями за даними IRENA представлена на Fig. 1.

В Україні теж є позитивна динаміка зміни генерування ВДЕ та їх встановленої потужності (Fig. 2).

Тенденція збільшення встановленої потужності ВДЕ в Україні, які реалізують генеровану

потужність за «зеленим» тарифом за даними НКРЕКП показана на Fig. 3.

Але швидкі темпи інтегрування ВДЕ в електричні мережі викликають певні особливості їх функціонування, які особливо гостро відчуються в сучасних умовах (Fig. 4.).

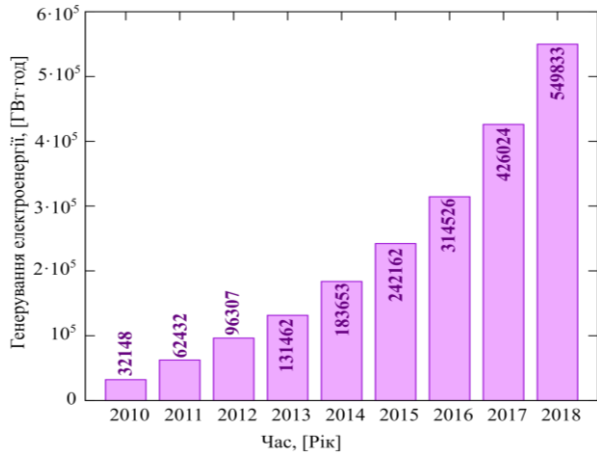


Fig. 1. Світова тенденція збільшення генерування електроенергії фотоелектричними станціями за даними IRENA [5]

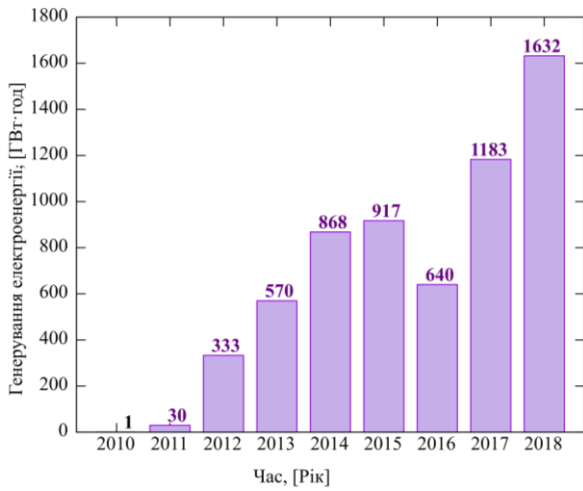


Fig. 2. Тенденція збільшення генерування електроенергії фотоелектричними станціями в Україні за даними IRENA [5]

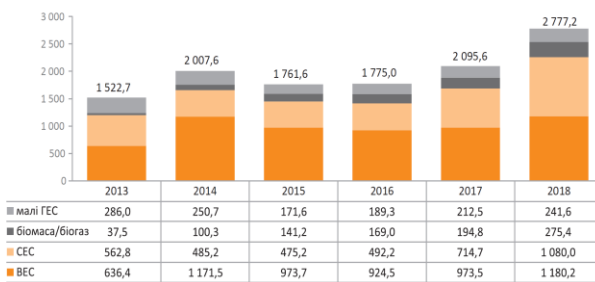


Fig. 3. Тенденція збільшення встановленої потужності ВДЕ в Україні, які реалізують генеровану потужність за «зеленим» тарифом за даними НКРЕКП



Fig. 4. Особливості функціонування електричних мереж в сучасних умовах.

## II. ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

Задача оптимального керування параметрами нормального режиму електроенергетичної системи з високим рівнем інтеграції фотоелектричних станцій може бути описана інтегральним критерієм, та в загальному випадку сформульована як задача теорії оптимального керування з квадратичним критерієм якості [6, 7]:

мінімізувати функцію керування

$$F(u) = \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{x}_t(t) \mathbf{H} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}_t(t) \mathbf{L} \mathbf{u}(t)] dt \quad (1)$$

в просторі станів системи

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t); \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0; \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t), \quad (3)$$

де  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  – відповідно вектори стану, керування і спостереження;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{L}$  – матриці постійних коефіцієнтів, за фізичним змістом узагальнені параметри ЕЕС;  $t_0$ ,  $t_k$  – початок і кінець інтервалу часу, при якому мінімізується функція керування (для ЕЕС це зазвичай 15хв.);  $\mathbf{x}_0$  – початкове значення вектора стану.

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(t) \\ \hat{\mathbf{U}}_{\Delta}(t) \\ U_{\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{S}}_g(t) \\ \hat{\mathbf{I}}_g(t) \\ \mathbf{U}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{k}(t) \\ \mathbf{Q}_{ДРП}(t) \\ \hat{\mathbf{S}}_{ВДЕ}(t) \\ \mathbf{P}_{НЕ}(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{J}(t) = \hat{\mathbf{U}}_{\delta}^{-1}(t) \hat{\mathbf{S}}(t)$  – вектор струмів у вузлах ЕЕС;  $\hat{\mathbf{U}}_{\delta}(t)$  – діагональна матриця вузлових напруг;  $\hat{\mathbf{S}}(t) = \mathbf{P} + j\mathbf{Q}$  – вектор потужностей у вузлах;  $\hat{\mathbf{U}}_{\Delta}(t)$  – вектор напруг вузлів відносно базисного;  $U_{\delta}$  – напруга базисного вузла;  $\hat{\mathbf{U}}(t)$  – вектор напруг вузлів;  $\hat{\mathbf{S}}_g(t) = \mathbf{P}_g + j\mathbf{Q}_g$ ,  $\hat{\mathbf{I}}_g(t)$  – вектори потужностей і струмів у вітках ЕЕС, де здійснюються телевиміри;  $\mathbf{k}(t)$ ,  $\mathbf{Q}(t)$ ,  $\hat{\mathbf{S}}_{ВДЕ}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{НЕ}(t)$  – вектори коефіцієнтів трансформації,

навантажень джерел реактивної потужності, потужностей ВДЕ і накопичувачів електроенергії. При цьому основні елементи критерію оптимальності при керуванні можуть бути показані на Fig. 5.

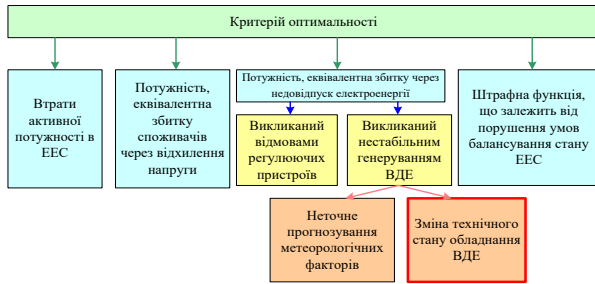


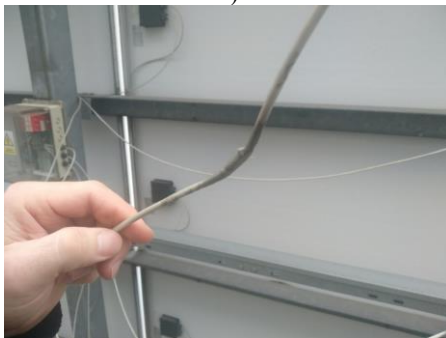
Fig. 5. Основні елементи критерію оптимальності при керуванні ЕЕС.

### III. ПОШКОДЖЕННЯ ФЕМ

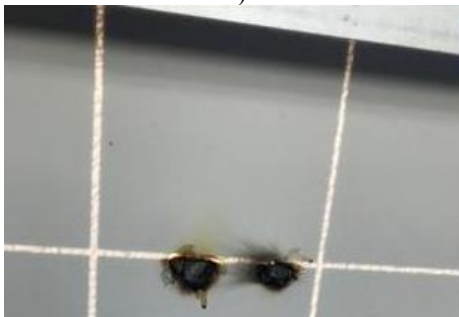
Проаналізувавши Fig. 5, можна зробити висновок, що є актуальною задача дослідження технічного стану фотоелектричних станцій [8-10]. Одним із основних елементів фотоелектричної станції є фотоелектричний модуль (ФЕМ). Основні пошкодження ФЕМ показані на Fig. 6 і Table 1.



а)



б)



в)



г)

Fig. 6. Основні пошкодження ФЕМ: а) пошкодження каркасу ФЕМ б) пошкодження ізоляції; в) наслідок зростання опору та нагрів контактів в місці з'єднання cell busbar ФЕМ; г) пошкодження герметика ФЕМ.

Враховуючи те, що пошкодження кожного з вузлів ФЕМ (зазначених в Table 1) призводить до пошкодження всього ФЕМ (Fig. 7), то коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (7) [7]:

$$k_{\text{рес}} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (7)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ по  $\tau$ -му діагностичному параметру (вважаємо, що кожний контрольований діагностичний параметр, наприклад, температура, опір ізоляції, струм, напруга та інші впливають на залишковий ресурс елементів ФЕМ за мультиплікативним виразом (7), а кожний із діагностичних параметрів  $k_1 - k_6$  впливає на коефіцієнт загального залишкового ресурсу всього ФЕМ),  $\tau$  –  $\tau$ -тий діагностичний параметр,  $\nu$  – кількість діагностичних параметрів відповідно до кількості вузлів (табл. 1),  $p_{\tau}$  – ймовірність відхилення контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра (8):

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (8)$$

де  $y_{\tau}$  – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю  $\tau$ -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення,  $m_2$  – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.



Fig. 7. Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

TABLE I. ПОШКОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ФЕМ

Елемент ФЕМ	Вид пошкодження	Результат	Параметр*	Пошкоджуваність, од.; в.о.; %**
cell	пробій напівпровідникового переходу	понад нормоване зменшення опору фотодіода в зворотному напрямку – зменшення опору села	Опір фотодіода, Ом	k <sub>1</sub> , в.о. 101 од.; 0.034 в.о.; 3.36%
	перегорання селу	обрив з'єднувальних провідників (плоскої шини busbar), які з'єднують cell в ФЕМ	Опір провідів, Ом	
busbar	погіршення контакту в місці з'єднання cell та busbar	зростання температура-тури в місці контакту та зменшення струму	Температура, °C Струм, А	k <sub>2</sub> , в.о. 43 од.; 0.014 в.о.; 1.43%
	корозія	зменшення струму, нагрівання busbar	Струм, А	
	пошкодження діода Шоттки (пробій)	нагрів	Температура, °C Струм, А	
клемний термінал – junctionbox	збільшення опору контактів	нагрів	Температура, °C Струм, А	k <sub>3</sub> , в.о. 2504 од.; 0.833 в.о.; 83.3%
алюмінієвий каркас герметиком	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °C Струм, А	k <sub>4</sub> , в.о. 54 од.; 0.018 в.о.; 1.8%
захисне скло	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °C Струм, А	k <sub>5</sub> , в.о. 80 од.; 0.027 в.о.; 2.66%
кабель, що з'єднує cells з клемним терміналом	пошкодження кабелю	ізоляція та опір коннектора	Опір ізоляції, МОм Температура °C	k <sub>6</sub> , в.о. 225 од.; 0.075 в.о.; 7.48%

Відповідно до виразу (7) коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ визначається за виразом (9):

$$k_{заг.рес} = k_1^{p_{k1}} \cdot k_2^{p_{k2}} \cdot k_3^{p_{k3}} \cdot k_4^{p_{k4}} \cdot k_5^{p_{k5}} \cdot k_6^{p_{k6}}, \quad (9)$$

де  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу по відповідних діагностичних параметрах,  $p_{k1}, p_{k2}, p_{k3}, p_{k4}, p_{k5}, p_{k6}$  – ймовірності пошкоджень вузлів ФЕМ, виявлених шляхом контролю діагностичних параметрів з урахуванням загальної кількості пошкоджень. Так, відповідно до табл. 1:  $p_{k1}=0.034$  в.о.,  $p_{k2}=0.014$  в.о.,  $p_{k3}=0.833$  в.о.,  $p_{k4}=0.018$  в.о.,  $p_{k5}=0.027$  в.о.,  $p_{k6}=0.075$  в.о. Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ФЕМ, але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан, він лише вказує на певні зміни технічного стану ФЕМ. На даному етапі розвитку сучасного комп'ютерного забезпечення використання для вирішення поставленої задачі, методів теорії нечітких множин є не складним завданням. Це дає змогу враховувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ФЕМ і створити базу правил їх взаємодії. За допомогою програмного забезпечення MATLAB створена математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. З цією метою створено та скореговано вибірку навчальних даних, за якими отримано аналітичну залежність коефіцієнта

залишкового ресурсу ФЕМ від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Отримана залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ФЕМ. Формування початкових навчальних даних було проведено таким чином: для шести вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ. Для зручності оперування даними і зменшення похибки навчання моделі, спрощення поточних розрахунків у MATLAB вхідні параметри моделі зводились до відносних одиниць їх відхилення від норми. Шість вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу деталей та вузлів ФЕМ, які залежать від поточних значень десяти діагностичних параметрів. Кількість параметрів може бути більшою. Фрагмент навчальної вибірки представлений в Table II.

TABLE II. ФРАГМЕНТ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ КОЕФІЦІЄНТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ФЕМ

k <sub>1</sub> в.о.	k <sub>2</sub> в.о.	k <sub>3</sub> в.о.	k <sub>4</sub> в.о.	k <sub>5</sub> в.о.	k <sub>6</sub> в.о.	k <sub>ресФЕМ</sub> в.о.
0.01	0.099	0.01	0.099	0.01	0.099	0.013431
0.02	0.098	0.02	0.098	0.02	0.098	0.022028
...	...	...	...	...	...	...
0.93	0.93	0.007	0.93	0.93	0.93	0.245720543

З метою наближення параметрів математичної моделі до реальних умов експлуатації необхідно опитати фахівців, що експлуатують, діагностують та ремонтують

ФЕМ. Інформація, яка надана цими фахівцями врахована під час створення тестової вибірки даних.

Похибка навчання нейро-нечіткої моделі за навчальною вибіркою даних становила  $\delta_n=1.7\%$  (0.017 в.о.). Отже нульове значення коефіцієнта залишкового ресурсу по будь-якому з цих діагностичних параметрів зменшує до нуля значення загального залишкового ресурсу ФЕМ.

Повна таблиця містить 534 (Table II) розглянутих варіантів вибірок діагностичних параметрів та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ФЕМ. Відкориговані експертами дані були використані як навчальні дані при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. 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 використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ (з використанням методу субкластеризації).

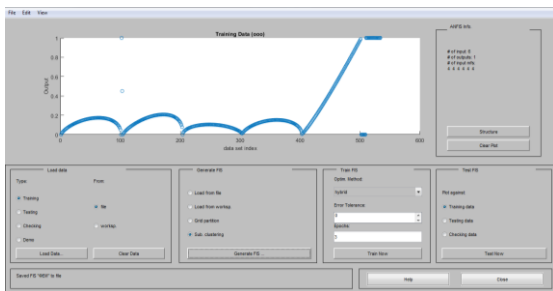


Fig. 8 Завантаження даних в ANFIS редакторі MATLAB

Структура отриманої нейро-мережі показана на Fig. 9.

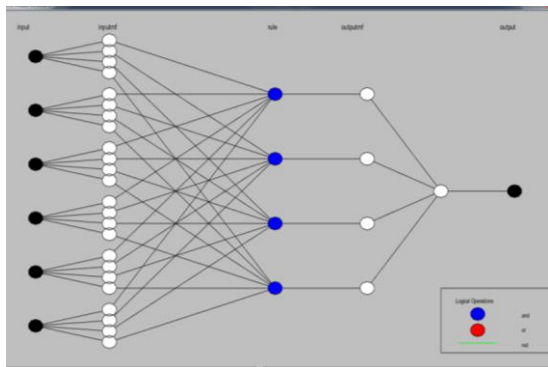


Fig. 9. Структура отриманої нейро-мережі

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

$$k_{рес.іl} = f(x_{il}; \sigma_{il}; c_{il}) = e^{-\frac{(x_{il} - c_{il})^2}{2 \cdot \sigma_{il}^2}} \quad (10)$$

У виразі (10):  $\sigma_{il}$  та  $c_{il}$  – числові параметри,  $\sigma_{il}^2$  в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу, а

другий параметр  $c_{il}$  – математичним сподіванням,  $i_l$  – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру,  $x_{il}$  – значення  $i_l$  – го вхідного параметра моделі:  $x_1=k_1$ ;  $x_2=k_2$ ;  $x_3=k_3$ ;  $x_4=k_4$ ;  $x_5=k_5$ ;  $x_6=k_6$ .

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 загальнозалишкового 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 (11).

$$k_{ресФЕМ} = F(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) \quad (11)$$

де  $F$  – нечітке функціональне перетворення.

Математична модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу є системою логічних рівнянь:

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

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

$$k_{ресФЕМ} = \sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2} \left( a_{j_2 1} \cdot k_1 + a_{j_2 2} \cdot k_2 + a_{j_2 3} \cdot k_3 + a_{j_2 4} \cdot k_4 + a_{j_2 5} \cdot k_5 + a_{j_2 6} \cdot k_6 + c_{j_2} \right) \quad (12)$$

де  $0 \leq w_{j_2} \leq 1$  – ступінь виконання (вага)  $j_2$ -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ФЕМ, що відображені у  $j_2$ -



му правилі. 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 ФЕМ модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатопарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження, яка містить адаптивні вузли, використовуючи правила навчання, параметри цих вузлів налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між реальним виходом моделі  $K_{рес.ФЕМ}$  та реальним коефіцієнтом загального залишкового ресурсу  $K_{рес.ФЕМ}$ . ФЕМ (13):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k_3=0}^{M_1-1} (k_{рес.ФЕМ k_3} - k_{зар.ФЕМ k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (13)$$

де  $N_1$  – кількість рядків у навчальній вибірці,  $k_3$  – номер рядка в навчальній вибірці, починаючи з рядка з порядковим номером «0». Використовується гібридний навчальний алгоритм, кожна епоха якого складається з прямого та зворотного оптимізаційних розрахунків. З метою зменшення часу на навчання нейро-нечіткої моделі в системі комп'ютерної математики MATLAB [7–16] використовуємо метод субкластеризації.

Субкластеризація – це об'єднання об'єктів у групи на основі однаковості ознак для об'єктів однієї групи та неоднаковості ознак між групами. Більшість алгоритмів кластеризації не ґрунтуються на традиційних для статистичних методів припущеннях. Вони можуть використовуватись в умовах майже повної відсутності інформації про закони розподілу даних.

Кластеризацію використовують для об'єктів з кількісними (числовими), якісними або змішаними ознаками. Початковою інформацією для кластеризації є матриця спостережень, кожен рядок якої являє собою значення  $n$  ознак одного з  $M$  кластерів. Задача кластеризації полягає в розбитті об'єктів на декілька підмножин (кластерів), в яких об'єкти більш схожі між собою, ніж з об'єктами з інших кластерів. В матричному просторі «однаковість» зазвичай визначають через відстань. Відстань може розраховуватись як між початковими об'єктами (рядками матриці), так і від цих об'єктів до прототипу кластерів.

Зазвичай координати прототипів не відомі і вони знаходяться одночасно з розбиттям даних на кластери. Використовувались такі параметри методу кластеризації: рівень впливу вхідних змінних (Range of influence) – 0.99; коефіцієнт послаблення (Squash factor) – 1.5; коефіцієнт, який встановлює, у скільки разів потенціал даної точки має бути вищим за потенціал центра першого кластера для того, щоб центром одного з кластерів була призначена точка, яка розглядається (Accept radio) – 0.5; коефіцієнт, який встановлює, у скільки разів потенціал даної точки має

бути меншим за потенціал центра першого кластера, щоб ця точка була виключена з можливих центрів кластерів (Reject radio) – 0.15. Тому, наприклад, при подальшому моделюванні для коефіцієнта залишкового ресурсу  $k_{рес.ФЕМ}$  діагностичного параметра  $k_1$  першого правила значення гаусової функції належності було взято такі значення параметрів:  $\delta k_1 = 0.3650$  в.о.,  $C_{k1} = 0.9951$  в.о. Для навчання мережі використовувався гібридний алгоритм навчання.

Після тридцяти епох навчання середньоквадратична похибка навчання склала 0.0128 в.о. (на тестовій вибірці 0.041 в.о.). В результаті навчання були отримані параметри гаусових функцій належності, які в подальшому були використані при створенні нейро-нечіткої моделі ФЕМ. З урахуванням проведених ітераційних обчислювальних експериментів визначено вектор параметрів функцій належності та отримано математичну модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ для розглянутого прикладу (Table .III). На рис. 10 показано фрагмент віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox системи комп'ютерної математики MATLAB. Ця мережа має шість входів, один вихід та передбачає використання алгоритму нечіткого висновку Сугено.

```

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  $k_{рес.ФЕМ} = 1,048 \cdot k_1 - 0,0492 \cdot k_2 - 0,1529 \cdot k_3 + 0 \cdot k_4 +$ 
 $+ 1,02 \cdot k_5 - 0,006532 \cdot k_6 + 0,8857;$ 
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  $k_{рес.ФЕМ} = 0,53 \cdot k_1 + 1,01 \cdot k_2 + 0,34 \cdot k_3 + 0,1000 \cdot k_4 -$ 
 $- 0,84 \cdot k_5 - 0,15 \cdot k_6 + 0,00238;$ 
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  $k_{рес.ФЕМ} = 0,01 \cdot k_1 + 0,13 \cdot k_2 + 0,91 \cdot k_3 + 0,05 \cdot k_4 - 0,05 \cdot k_5 +$ 
 $- 0,03 \cdot k_6 - 0,01155;$ 
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  $k_{рес.ФЕМ} = 0,1698 \cdot k_1 + 0,0389 \cdot k_2 + 0,2309 \cdot k_3 + 0,145 \cdot k_4 + 0,15k_5 +$ 
 $+ 0,2731 \cdot k_6 - 0,00890.$ 
    
```

Сформована структура нейро-нечіткої моделі ФЕМ має шість входів та один вихід. Кожен з шести входів має по чотири терми. Тобто кожна множина можливих значень вхідних параметрів моделі умовно поділена на чотири підмножини: «нормальні» значення вхідного параметра, «незначні відхилення» значення вхідного параметра, «передаварійні» значення вхідного параметра, «аварійні» значення вхідного параметра.

Побудована нейро-нечітка модель Сугено має такі характеристики: ступінь належності кожного значення вхідного параметра до відповідної цьому параметру множини значень, що визначається гаусовою функцією належності; модель призначена для знаходження числового значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ, тому має один вихід. Модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ

залежно від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів. Так, якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0.5 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ дорівнює 0,332 в.о., якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ (з похибкою 2%) дорівнює 0,98 в.о., якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ (з похибкою 0,5%) дорівнює 0 в.о (Fig.10 – Fig.12).

Вхідні параметри моделі	Назва терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функції належності	
			$\delta$	$C$
$k_1$	нормальні	1	0.35	0.21
	незначні відхилення	2	0.35	0.78
	передаварійні	3	0.35	0.81
	аварійні	4	0.35	0.91
$k_2$	нормальні	1	0.35	0.21
	незначні відхилення	2	0.35	0.78
	передаварійні	3	0.35	0.81
	аварійні	4	0.35	0.93
$k_3$	нормальні	1	0.35	0.022
	незначні відхилення	2	0.35	0.21
	передаварійні	3	0.35	0.81
	аварійні	4	0.35	0.93
$k_4$	нормальні	1	0.35	0.019
	незначні відхилення	2	0.35	0.079
	передаварійні	3	0.35	0.078
	аварійні	4	0.35	0.93
$k_5$	нормальні	1	0.35	0.21
	незначні відхилення	2	0.35	0.078
	передаварійні	3	0.35	0.081
	аварійні	4	0.35	0.93
$k_6$	нормальні	1	0.35	0.019
	незначні відхилення	2	0.349	0.019
	передаварійні	3	0.35	0.079
	аварійні	4	0.35	0.93

TABLE III. ПАРАМЕТРИ ФУНЦІЇ НАЛЕЖНОСТІ

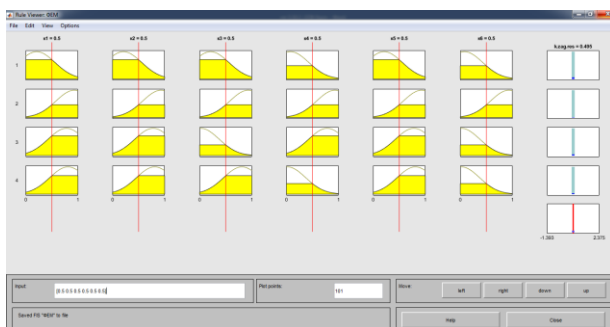


Fig. 10. Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 в.о.

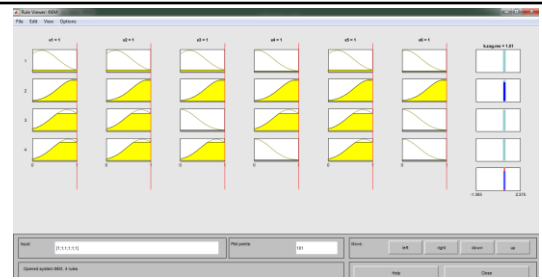


Fig.11 Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях всіх вхідних параметрів 1 в.о.

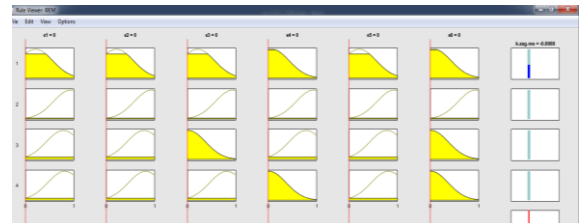


Fig.12. Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях всіх вхідних параметрів 0 в.о.

Складність залежностей вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на Fig. 13–17.

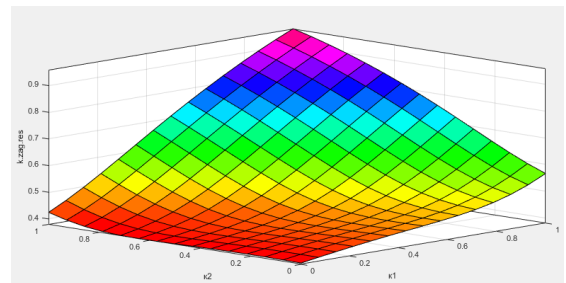


Fig.13. Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від  $k_1$  та  $k_2$ .

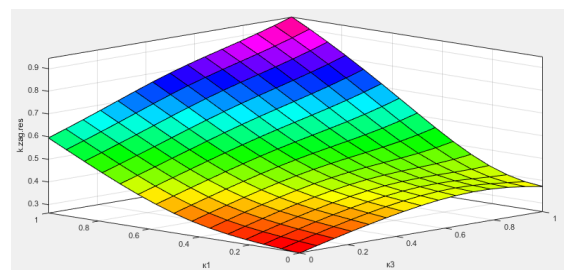


Fig.14. Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від  $k_1$  та  $k_3$ .

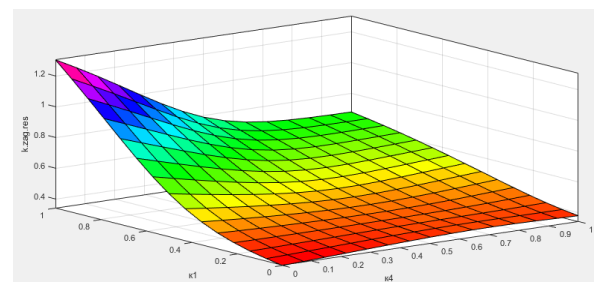


Fig. 15. Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від  $k_1$  та  $k_4$ .

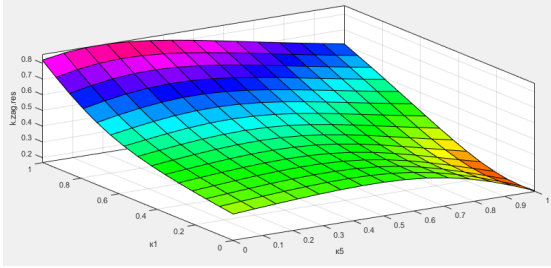


Fig.16. Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від  $k_1$  та  $k_5$ .

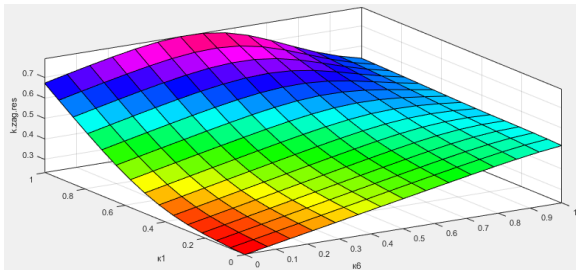


Fig.17. Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від  $k_1$  та  $k_6$ .

#### IV. ВИСНОВКИ

В статті описано метод визначення 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.

#### V. ЛІТЕРАТУРА

- [1] H. Ritchie and M. Roser. (2020). *Renewable Energy*. Available: <https://ourworldindata.org/renewable-energy#citation>
- [2] R. e. statistics. (2020). *A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent*. Available: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [3] L. Shinn. (2018). *Renewable Energy: The Clean Facts* Available: <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts>
- [4] IEA. (2020). *Global Energy Review 2020*. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>

- [5] T. I. R. E. A. (IRENA). (2020). *Electricity Generation Trends. Navigate through the filters to explore trends in renewable energy*. Available: <https://www.irena.org/>
- [6] 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*, Article vol. 96, no. 10, pp. 32-38, 2020.
- [7] O. Y. Petrusenko, Y. O. Petrusenko, and E. A. Rubanenko, "The dvoistoy problem solution of the optimal control by normal regimes of EPS with using neurofuzzy modelling," *Technical Electrodynamics*, Note no. 2, pp. 36-37, 2012.
- [8] M. Bělik, J. Škorpil, and J. Muhlbacher, "Mathematical model of 20 kWp photovoltaic system," in *Proceedings of the 4th International Scientific Symposium on Electric Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2007*, 2007, pp. 197-199.
- [9] M. Belik, "PV panels under lightning conditions," in *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2014*, 2014, pp. 367-370.
- [10] M. Belik, "Simulation of photovoltaic panels thermal features," in *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2017*, 2017.
- [11] Рубаненко О.О., Рубаненко О.Є. Використання методів нечіткого моделювання в прогнозуванні стану високовольтних вводів. *Вісник Хмельницького національного університету*, vol. 2, pp. 202–209, 2013.
- [12] O. Buslavets, P. Lezhniuk, and O. Rubanenko, "Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Article vol. 2, no. 8, pp. 35-41, 2015.
- [13] A. Kylymchuk, P. Lezhnyuk, and O. Rubanenko, "Impact of linear regulator, installed in the electric grid of energy supply company, on power losses," in *2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017 - Proceedings*, 2017, pp. 411-416.
- [14] A. V. Kylymchuk et al., "Control of power flow and voltage in parallel working electrical GRIDS," *Przegląd Elektrotechniczny*, Article vol. 93, no. 3, pp. 88-92, 2017.
- [15] O. Rubanenko, O. Kazmiruk, V. Bandura, V. Matvijchuk, and O. Rubanenko, "Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Article vol. 4, no. 3-88, pp. 66-79, 2017.
- [16] O. E. Rubanenko, O. I. Kazmiruk, T. Zyska, K. Gromaszek, and M. Junisbekov, "Study of the impact of the technical state of the transformers with the LTC on the parameters of the EES modes optimal control," in *Recent Advances in Information Technology*, 2017, pp. 173-191.

## The instability analysis of electricity generation of renewable energy sources, taking into account their technical condition

O. Rubanenko

Vinnitsa National Technical University,  
Ukraine

The relevance of the transition from traditional to renewable energy sources is investigated in the paper. The most popular renewable energy sources (RES) for Ukraine and the World are highlighted. The trend of changing electricity generation by photovoltaic stations is analyzed. Peculiarities of the functioning of electric networks with RES are considered. A mathematical model of the problem of optimal control of the parameters of the normal mode of the power system (PS) with a high level of integration of photovoltaic power plants (PPS) is presented. The main components of the criterion of optimality in the control of the power system, which must be taken into account when determining it. The article investigates in more detail such a



---

component of the optimality criterion as power equivalent to the loss due to power failure caused by unstable generation. The instability of RES generation, in particular, FES, can be caused by both unpredictable changes in meteorological factors and changes in the technical condition of FES equipment. The photovoltaic module is the main element of any FES, so the article focuses on determining the technical condition of the FEM. Therefore, the main study presented in the article is the development of a neuro-fuzzy model to determine the technical condition of the FEM, which is represented by the coefficient of the total residual resource. For this purpose, the characteristic fault to the FEM, in particular, the fault to the frame of the FEM is analyzed and presented; the fault to cable insulation; the consequences of increasing resistance and heating of the contacts at the junction of the cell busbar FEM; the decrease to the impermeability of the FEM and others.

*Keywords: renewable energy sources, technical condition, photovoltaic station, photovoltaic module, instability of electricity generation.*