

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ І МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ  
ДЛЯ АНАЛІЗУ СПОСОБІВ РЕЗЕРВУВАННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ГРАФІКІВ  
ГЕНЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ (ВДЕ), А ТАКОЖ  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА  
ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ**

**Науковий керівник:** д.т.н., проф. Лежнюк П. Д.

**Відповідальний виконавець:** д.т.н., проф. Комар В.О.

**Строки виконання:** початок – 01.06.2022, закінчення – 31.12.2022.

**Обсяг коштів, виділених на виконання НДР:** 117,6 тис. гривень.

## ОДЕРЖАНІ НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ ВІДПОВІДНО ДО ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Заплановані результати	Отримані результати
<p>Удосконалений критеріальний метод для визначення і узагальнення коефіцієнтів деградації ФЕМ.</p> <p>Метод і спосіб визначення несправностей ФЕМ в польових умовах та оцінювання їх впливу на генерування електроенергії ФЕС з використанням критеріального моделювання теорії подібності.</p> <p>Анотований звіт.</p> <p>Науково-технічний звіт.</p>	<p>Адаптовано критеріальний метод теорії подібності для порівняння відносних значень коефіцієнтів деградації ФЕМ та узагальнення їх для перенесення на ФЕС, які подібні за технічними параметрами і відповідають умовам третьої теореми подібності Кирпичова.</p> <p>Розроблено метод і спосіб визначення несправностей фотоелектричних модулів в умовах експлуатації та оцінювання їх впливу на генерування електроенергії фотоелектричних станцій з використанням критеріального моделювання теорії подібності.</p> <p>Визначено основні дефекти фотоелектричних модулів, які експлуатуються на ФЕС в ЕЕС. Розвинуто метод визначення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ для уточнення фактичного генерування ФЕС з врахуванням їх деградації. Розроблено програмно-апаратний комплекс визначення технічного стану обладнання ФЕС з використанням коефіцієнтів-індикаторів аномальної роботи ФЕМ.</p>

За результатами дослідження передбачається: видання розділу в колективній монографії; 2 статті у фахових журналах, 1 з них у журналах, що входять до наукометричних баз даних WoS та/або Scopus; участь в конференціях, що організовуються IEEE: IEEE International Conference on Energy Smart Systems (ESS–2022), осінь 2022; **2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology October 3–7, 2022, Kharkiv, Ukraine.**; Міжнародна науково-технічна конференція «Контроль і управління складними системами (КУСС-2022)» (ВНТУ, 19–21.10.2022 р.)

**Опубліковані за темою статті в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS)**

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити</u> прізвища авторів, які належать до списку виконавців	Наукометр. база даних
1	<u>Lezhniuk P., Komar V., Hunko I., Jarykbassov D.</u> (2022). Natural-simulation Model of Photovoltaic Station Generation in Process of Electricity Balancing in Electrical Power System. Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 12(3), 40-45. <a href="https://doi.org/10.35784/iapgos.3030">https://doi.org/10.35784/iapgos.3030</a> (Scopus)	Scopus

**Опубліковані англomовні статті у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються у наукометричній базі Scopus або WoS**

№	Повні дані про статті та тези доповідей з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити</u> прізвища авторів, які належать до списку виконавців	Наукометр. база даних
1	<u>P. Lezhniuk, M. Belik and O. Rubanenko.</u> Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids, 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 2022, Kremenchuk, Ukraine. (Presented in conference)	Scopus

## Опубліковані статті у журналах, що входять до переліку фахових видань України

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії, або вихідні дані про охоронні документи; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , які належать до списку виконавців
1	<u>Лежнюк П. Д., Комар В. О., Добровольська Л. Н., Повстянко К. О.</u> Відносно оцінювання засобів балансування режимів електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ВПІ. – № 3. – 2022. – С. 24–30. <a href="https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-24-30">https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-24-30</a>

## Опубліковано монографії

№	Повні дані про монографії; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , які належать до списку виконавців
1	Вітроенергетика / За заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2023. – 230 с. Розділ 7. Кудря С.О., <u>Лежнюк П.Д., Рубаненко О.О.</u> Характеристика водневих технологій для сумісного використання з вітроелектростанціями. С. 86–116.

## Отримано патенти

№ з/п	Повні дані про охоронні документи; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців
1	Не планувалося.
2	

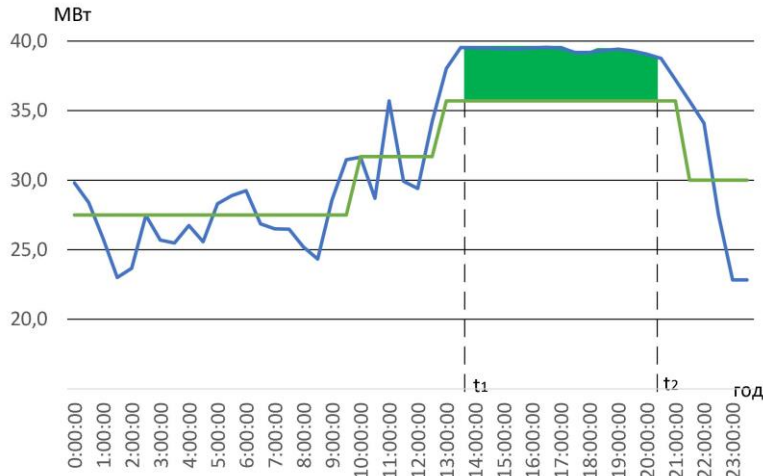
## Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора та кандидата наук

№	Повні дані про дисертації
1	Прокопенко І. О. «Оптимальне керування фотоелектричними станціями в електричних мережах енергосистеми», дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Подана до захисту в спеціалізованій вченій раді ВНТУ, науковий керівник д.т.н. Лежнюк П. Д.
2	

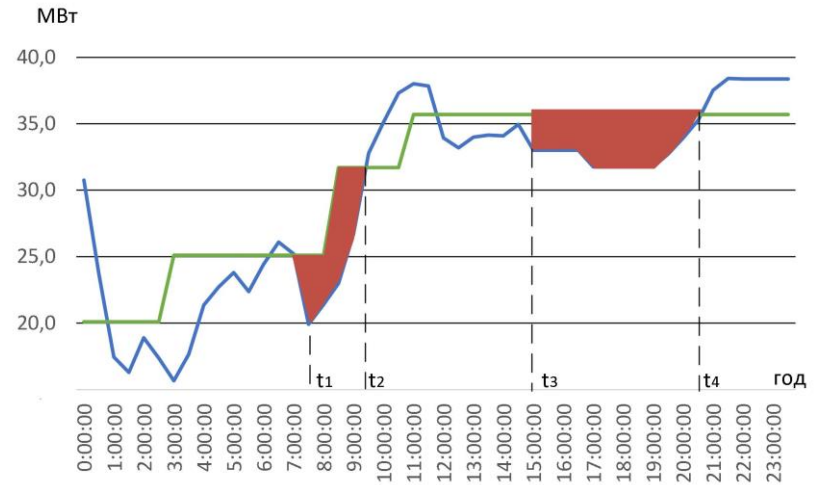
## Участь в конференціях

1. XXIII Міжнародна НПК «Відновлювана енергетика та енегоефективність у XXI столітті», Київ, 19–20.05.2022 р.
2. Міжнародна НПК «Инновации в науке и технике», Бишкек, 20–21.04.2022 р.
3. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 2022, Kremenchuk, Ukraine.
4. 2022 IEEE 3<sup>rd</sup> KhPI Week on Advanced Technology, Kharkiv, Ukraine, 3–7.10.2022.
5. XVI Міжнародна НПК «Контроль і управління в складних системах, КУСС-2022», Вінниця, ВНТУ, 15–17.11.2022 р.

# Резервування ВДЕ в задачі балансування режимів ЕЕС



а)



б)

Рис. 1. Добові графіки генерування ВЕС під час надлишку виробленої електроенергії (а) та під час недостатнього фактичного вироблення електроенергії (б)

Якщо за критерій оптимальності прийняти сумарні витрати  $V_{рез}$  на резервування  $P_{рез}(t)$  в (1) несталого генерування ВДЕ, то з врахуванням реально можливих на сьогодні способів резервування задача мінімізації  $V_{рез}$  запишеться [9]:

$$V_{рез} = B_x(P_x) + B_6(P_6) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) + B_k(P_k) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $B_x(P_x)$  – витрати на резервування накопичувачами електрохімічного типу;  $B_6(P_6)$  – витрати на водневі технології;  $B_z(P_z)$  – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву;  $B_c(P_c)$  – витрати на користування системним резервом, що є фактично компенсацією за утримання резерву на енергоагрегатах ТЕС, що працюють за ціновими заявками;  $B_n(P_n)$  – витрати на запаси пропускної спроможності ліній електропередачі, що необхідно для транспортування електроенергії з/до місця під'єднання резервної потужності до ЕЕС;  $B_k(P_k)$  – витрати на реалізацію координації графіків генерування і споживання електроенергії в ЕЕС;  $P_x, P_6, P_z, P_c, P_n, P_k$  – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування.

Враховуючи тенденцію резервування ВДЕ в ЕЕС, математичну модель оптимізації питомих витрат на 1 кВт резервної потужності для урівноваження генерування ВДЕ, в якій враховуються особливості режимів ЕЕС, можна представити у такому вигляді:

$$V_{рез} = \frac{C_1}{P_x} + C_2 P_6 + C_3 P_z + \frac{C_4}{P_c} + C_5 \frac{P_x^2 P_c^2}{P_6 P_z} \rightarrow \min, \quad (2)$$

за умови, що  $P_c \leq G_c, P_x \leq G_x$  або  $g_c P_c \leq 1, g_x P_x \leq 1$ ,

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – узагальнені константи, що містять вихідні дані задачі (в першу чергу це цінові показники);  $G_c$  – максимальна потужність системного резерву, яку можна використати для урівноваження генерування ВДЕ ( $g_c = 1/G_c$ );  $G_x$  – максимально доступна потужність накопичувачів електрохімічного типу ( $g_x = 1/G_x$ ).

## Визначальні критерії подібності

Задача (3) не відповідає умові канонічності [11], коли міра її складності  $s=m-n-l=0$ , де  $m$  – кількість членів цільової функції,  $n$  – кількість змінних  $P_i$ . У нашому випадку  $s=7-4-1=2$ . Згідно критеріальному методу запишемо систему ортогональних і нормованих (ортонормованих) рівнянь для (3) [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\pi_1 + 2\pi_5 + \pi_7 = 0; \\ \pi_2 - \pi_5 = 0; \\ \pi_3 - \pi_5 = 0; \\ -\pi_4 + 2\pi_5 + \pi_6 = 0; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1; \end{array} \right. \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Оскільки в цій системі рівнянь всі параметри дійсні і мають певні допустимі межі існування, то такі рівняння мають дійсну множину рішень стосовно двох (оскільки  $s=2$ ) з параметрів. Множину рішень можна будувати, прийнявши за базові будь-які зі складових резервування в (3). В нашому випадку доцільно за базові складові прийняти витрати на системний резерв як найбільш стійку і з якою можна порівнювати решту складових та витрати на електрохімічні накопичувачі, для яких встановилися цінові показники. Якщо прийняти витрати на користування системним резервом та на електрохімічні накопичувачі за базові змінні, то система рівнянь (4) розв'язується відносно  $\pi_6$  і  $\pi_7$ . Тоді, шляхом лінійних перетворень розв'язок системи рівнянь (4) і відповідна множина допустимих рішень відносно  $\pi_6$  і  $\pi_7$  отримується у вигляді:

$$\boldsymbol{\pi} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_n \begin{bmatrix} \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{b}_0$  – вектор нормалізації;  $\mathbf{b}_n$  – вектори нев'язки.

$$\text{У нашому випадку} \quad \mathbf{b}_0 = \frac{1}{7} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_n = \frac{1}{7} \begin{bmatrix} -2 & 5 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ 5 & -2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Критерії подібності, які виражено через критерії  $\pi_6$  та  $\pi_7$ :

## Чутливість витрат до зміни потужності системного резерву

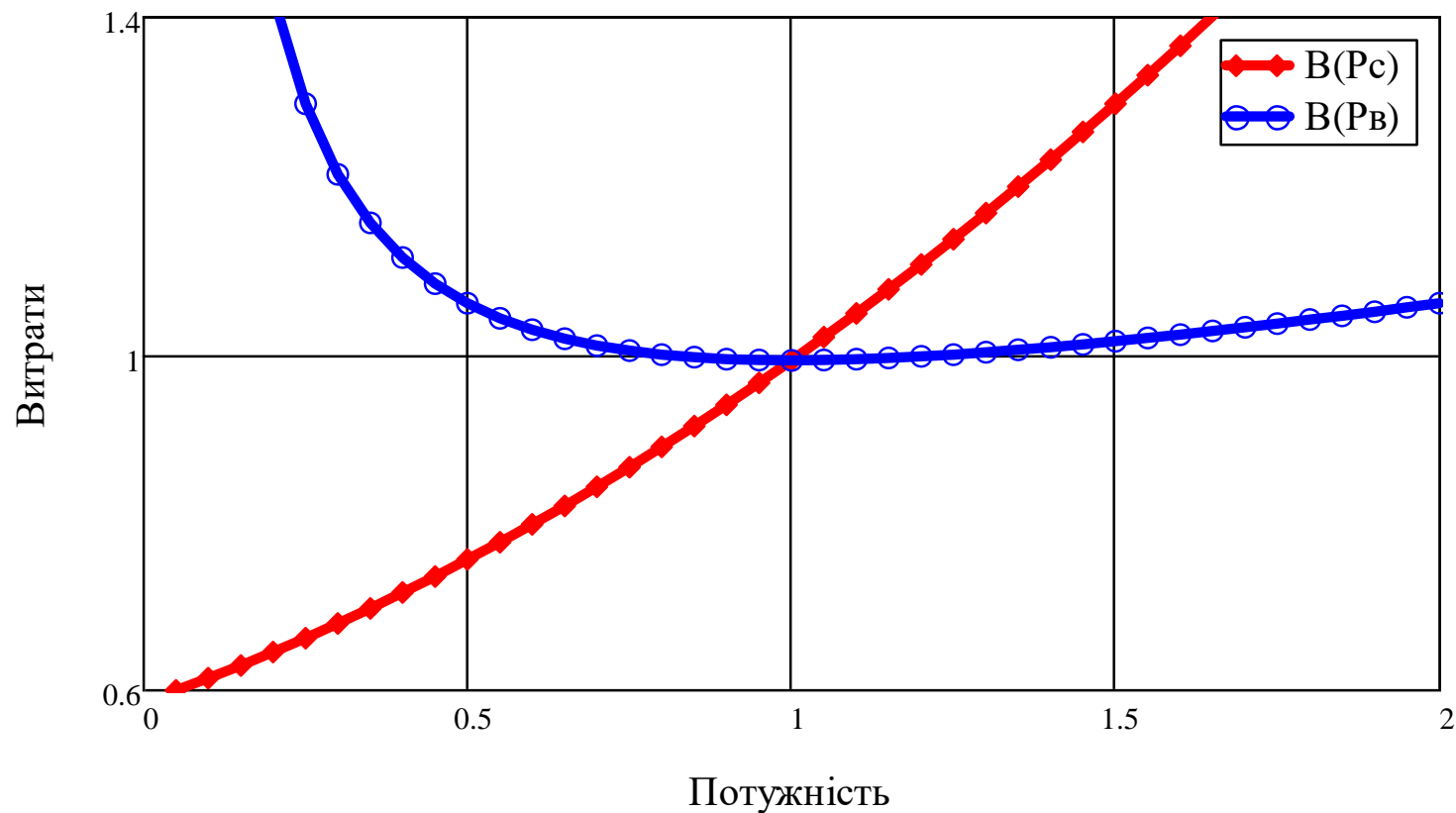
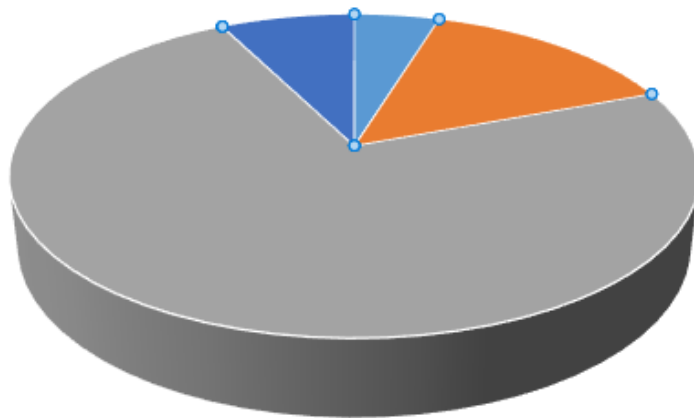


Рисунок 1 - Чутливість витрат до зміни потужності системного резерву (червона крива) та до змін потужності водневих технологій (синя крива)

## Пошкоджуваність ФЕС до 1000 В

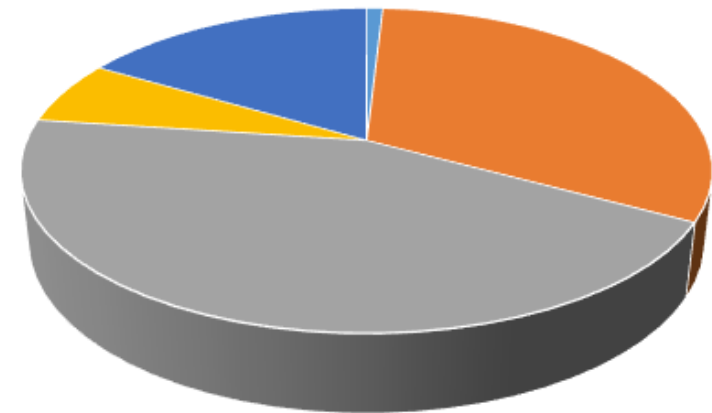
	Кількість	Відмови	ВО	Огляд	ВО	ВВ	ВО	ТВК	ВО
<b>Обладнання до 1000 В</b>									
КЛ 0,4 кВ	124565	76	0,06101	2	0,00161	4	0,00321	249	0,1999
Комутаційна апарати	143786	267	0,18569	82	0,05703	0	0	415	0,28862
Інвертор	15234	143	0,93869	12	0,07877	0	0	72	0,47263
ФЕМ	4221193	18	0,00043	476	0,01128	0	0	9992	0,23671
Контактні з'єднання проводів та шин	325680	313	0,09611	96	0,02948	0	0	5506	1,69062

### Відмови в роботі електрообладнання



- КЛ 0,4 кВ
- Комутаційна апарати
- Інвертор
- ФЕМ
- Контактні з'єднання проводів та шин

### Дефекти виявлені під час огляду



- КЛ 0,4 кВ
- Комутаційна апарати
- Інвертор
- ФЕМ
- Контактні з'єднання проводів та шин

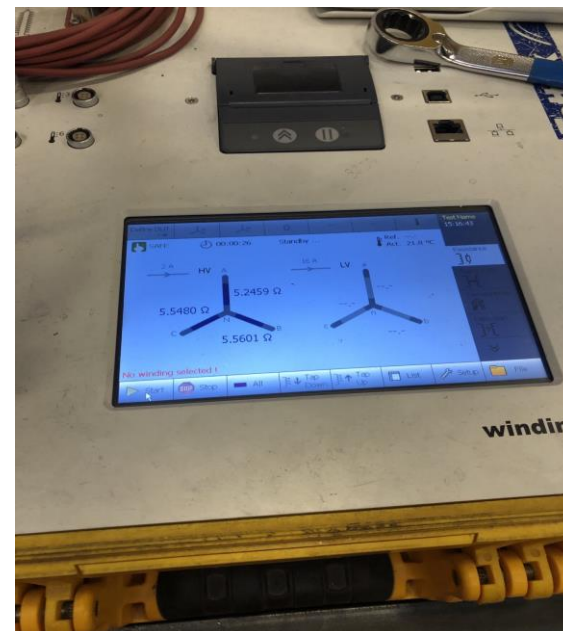
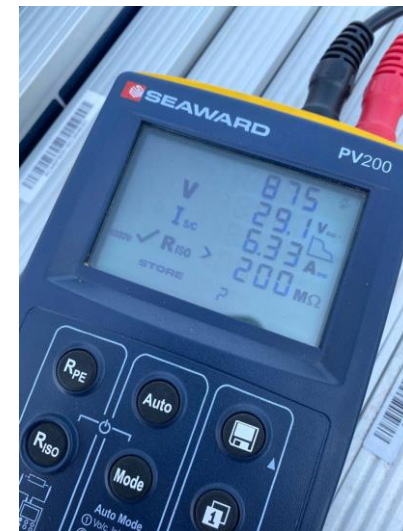
## Пошкоджуваність ФЕС



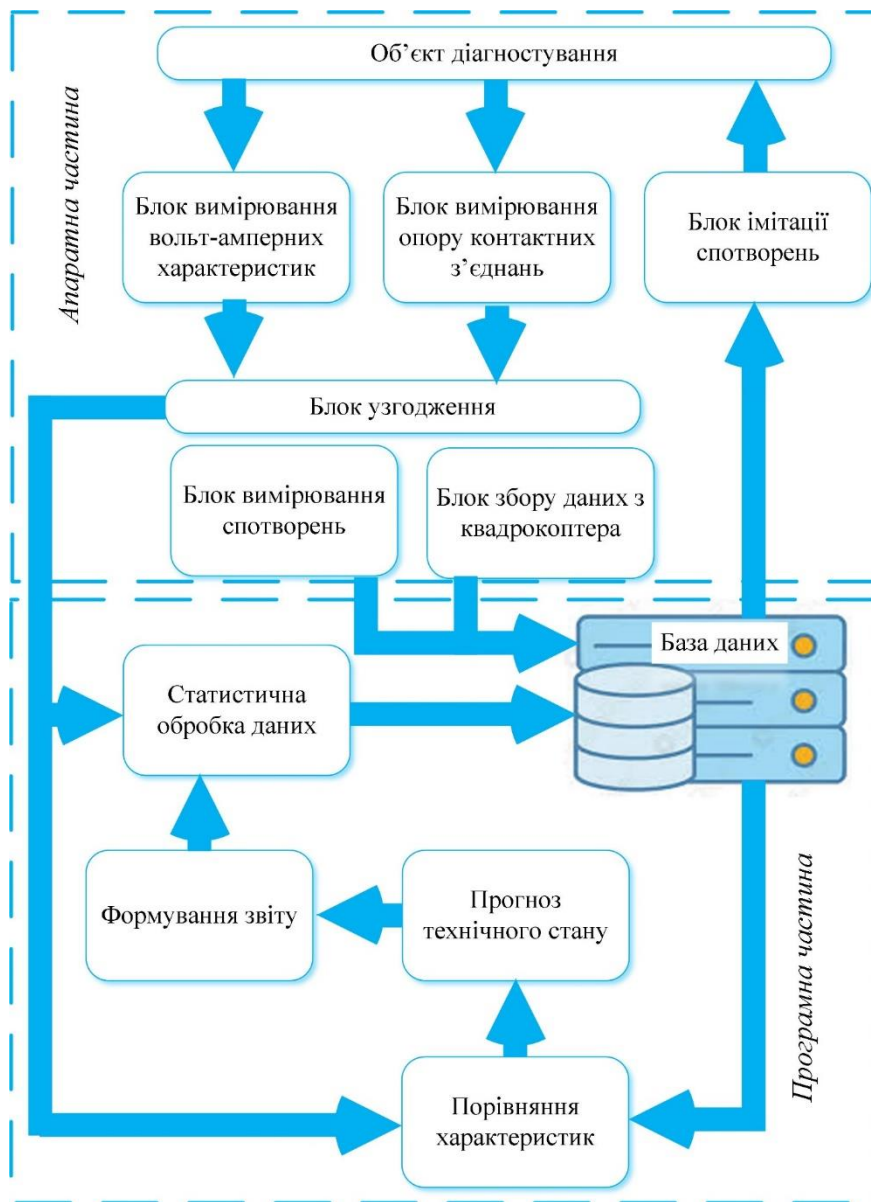
Широке Solar Park с. Підгородне, Веселе, Широке  
Запорізької обл.

Виміряно АЧХ діючих СТ, за місцем їх розташування,  
встановлених на ФЕС «ПИСАРІВКА» (Хмельницька  
обл.), оскільки на ФЕС пошкодився СТ типу ТМГ  
1000/10 У1 .





# Блок-схема програмно-апаратного комплексу визначення технічного стану ФЕМ



# Коефіцієнти-індикатори стану ФЕМ

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

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

$$k_3 = \frac{I_{cp}^{\max} - I_i^{\max}}{I_{cp}^{\max}}$$

$$k_4 = \frac{I_{cp}^{\min} - I_i^{\min}}{I_{cp}^{\min}}$$

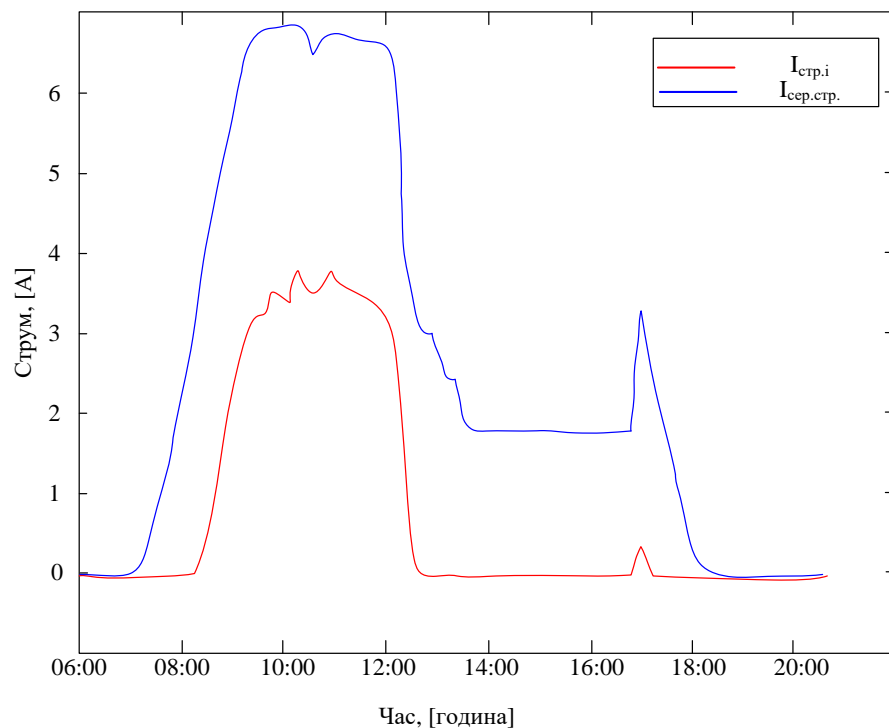


Рисунок 1 – Несправності датчика струму

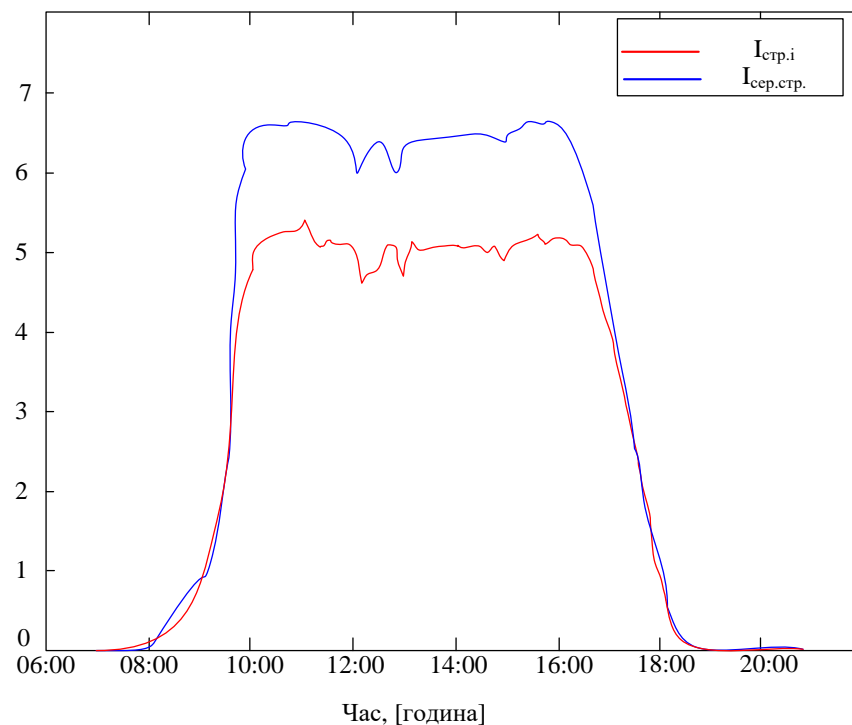


Рисунок 2 – Наявності «гарячих точок»

## Коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ

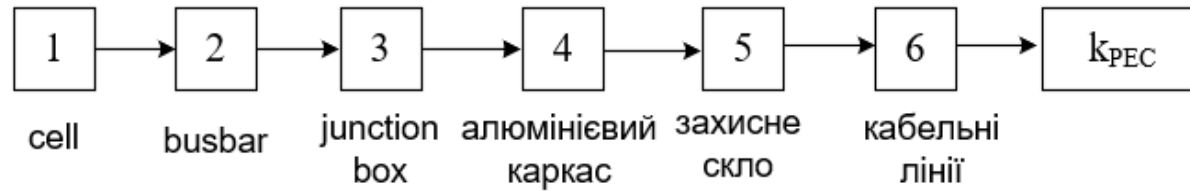


Рисунок 4 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

$$k_{pec} = \prod_{j=1}^d k_j^{p_j}$$

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.

$$k_{pec.i1} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1} - c_{i1})^2}{2 \cdot \sigma_{i1}^2}}$$

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,  $i = \overline{1, d}$ .

## ПАК оцінювання деградації ФЕМ



Рисунок 1 – Апаратна частина комплексу визначення технічного стану ФЕС



Рисунок 2 – Визначення пошкоджених ФЕМ за допомогою квадрокоптеру

# ПАК оцінювання деградації ФЕМ



Рисунок 1 – Пошкодження виявлені на ФЕМ шляхом візуального огляду

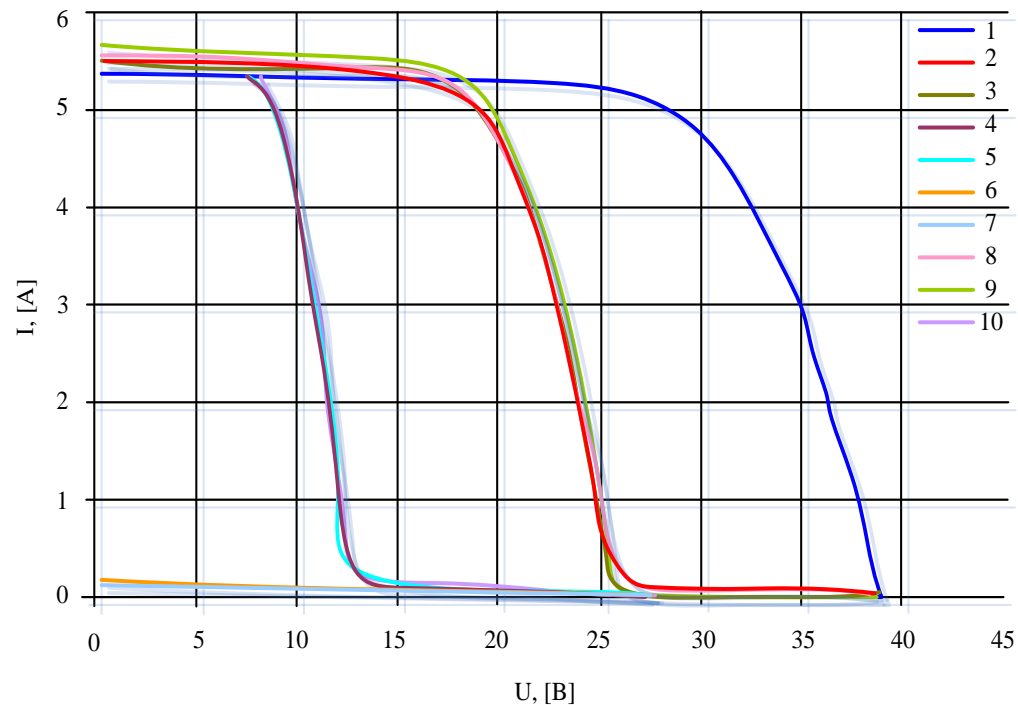


Рисунок 2 – ВАХ непошкодженого ФЕМ та ВАХ пошкоджених ФЕМ з різними дефектами

**Дякую за увагу!**