

масштабування системи, а також із застосуванням методів інтерпретаційного штучного інтелекту для з'ясування того, які саме параметри найбільше впливають на рішення моделі щодо наявності забруднення. Інтеграція таких моделей у систему водного моніторингу дозволяє підвищити точність, повноту та коректність аналізу інформації й моделювати сценарії еволюції фізико-хімічних параметрів води.

Ключові слова: моніторинг водних ресурсів, глибинне навчання, ІВС, якість води, часові ряди.

Література:

- [1] L. Bytsyura, L. Dubchak, M. Palka, N. Vivchar – Application of Machine Learning for Water Pollution Index Prediction (р. Іква, Україна) *The Second International Conference of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development (YAISD)*. 2025. (CEUR-WS, Vol. 3974) <https://ceur-ws.org/Vol-3974/short01.pdf>
- [2] K. Sergieieva, O. Kavats, V. Vasyliiev, O. Kovrov – Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *ICST-2024: Information Control Systems & Technologies*. 2024. (CEUR-WS, Vol. 3790) <https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper37.pdf>
- [3] L. Bytsyura, A. Sachenko, T. Kapusta, Kh. Lipianina-Honcharenko, R. Brukhanskyi – Modelling Hydroecomonitoring of Surface Water in Ukraine Using Machine Learning *Profit AI*. 2024. (Cambridge, MA) <https://ceur-ws.org/Vol-3777/paper15.pdf>
- [4] Singh Y, Walingo T. Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2024; 24(9):2871. <https://doi.org/10.3390/s24092871>
- [5] Campos, D., Galvão, V., de Rezende, M.L. et al. Automated machine learning achieves accurate water quality prediction with reduced parameter requirements. *Scientific Reports*. 2026. 16, 4431. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-34448-8>

УДК 519.713

ОЦІНЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЕФЕКТІВ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

*Божко К.М., Мушкет К.Я., Однорог О.В., Сидоренко С.Ю.,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», Київ, Україна
E-mail: bozhkonew@ukr.net; k.mushcat@gmail.com;*

Для контролю сонячних елементів і панелей з метою виявлення в них прихованих дефектів традиційно використовують метод інфрачервоної термографії. Теоретичним підґрунтям для застосування інфрачервоної термографії у задачах фотовольтаїки є фундаментальна праця Отвіна Брайтенштайна із співавторами [1]. Ще раніше колективом інституту Фраунгофера було встановлено зв'язок між характером зображення теплового поля сонячного елемента та його послідовним опором [2]. Так були закладені основи для діагностики сонячних елементів і панелей на основі інфрачервоної термографії. Дослідження в цьому напрямку проводяться також в КПІ ім. Ігоря Сікорського [3].

Під час дослідження були відтворені умови тесту на деградацію сонячної панелі при тривалому впливі високої напруги (Power Induced Degradation Test або скорочено PID-тесту) з метою термографічного контролю дефектів за локальними неоднорідностями її температурного поля. На рисунку 1 наведено термограму полікристалічної кремнієвої сонячної панелі із номінальною потужністю 60 Вт.

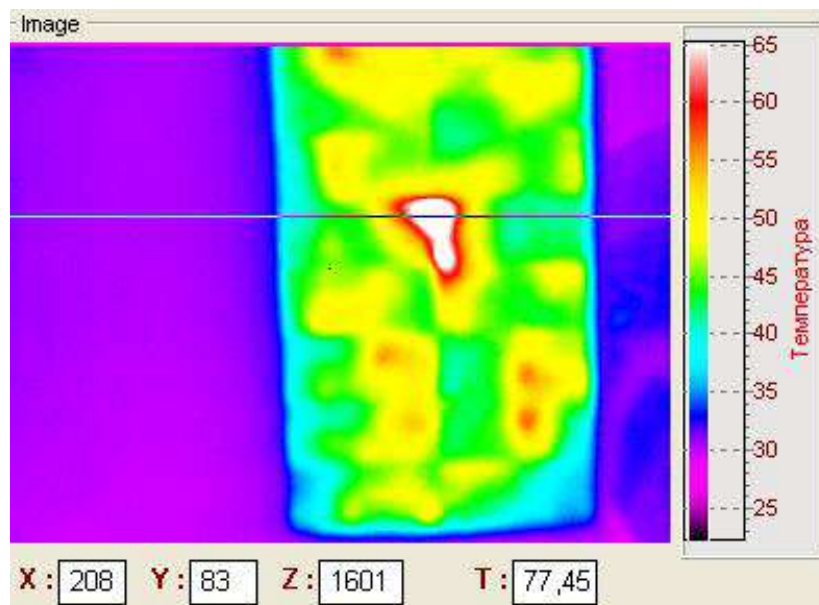


Рис. 1. Термограма сонячної панелі: матеріал – полікристалічний кремній; номінальна потужність 60 Вт; зворотна напруга 670 В; струм 170 мА; максимальна температура в центрі зони дефекту становить 77,45 С; границя жовтий-зелений має температуру 46 С; границя білий-червоний - 63 С

За допомогою програми Terplovisio була визначена роздільна здатність термографу за координатами X,Y (розмір пікселя). Ширина нагрітої частини панелі становить 305 мм, на котрі припадає 152 пікселя (рис. 1). Таким чином, один піксель відображає квадрат з розмірами 2мм x 2 мм.

Далі термограма була збільшена програмою Paint.Net та підготовлена для подальшої попиксельної обробки (Рис. 2). Обробка зображення в графічному редакторі показала, що дефект насправді складається з двох різних за величиною областей.

Пікселі зони дефекту були відсортовані за абсолютною середньою температурою для кожного відтинку: T_i – середня температура в підзоні з номером i в Кельвінах; N_i – кількість пікселів в i -той підзоні.

Таблиця 1. Розподіл пікселів по температурним областям зони дефекту

i	1, біл.	2	3	4	5	6	7	8	9, чорн.
T_i , K	328,5	331,5	334,5	337,5	340,5	343,5	346,5	349,5	352,5
N_i	504	326	224	169	150	122	73	43	27

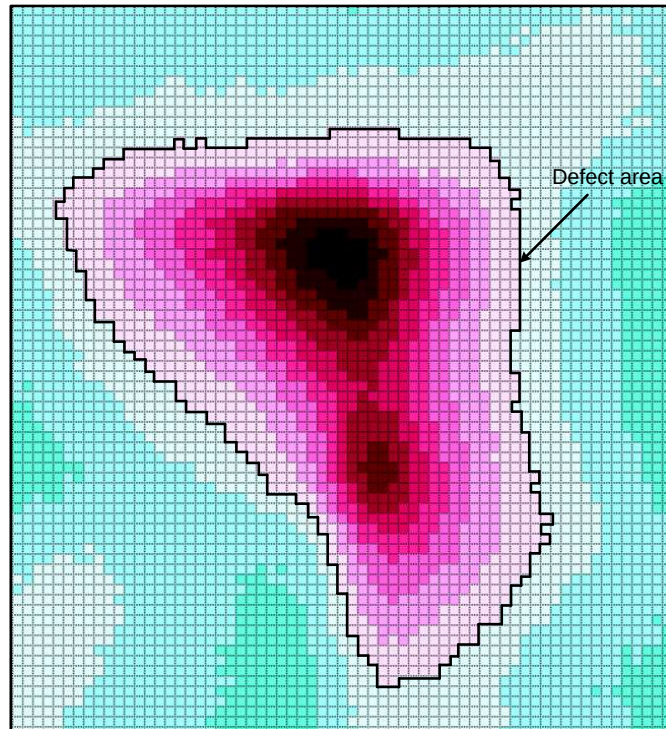


Рис. 2. Зона дефекту сонячної панелі: збільшення 800%; градація температур по відтинкам пікселів з кроком 3 °С; границя білий-блакитний має температуру 54 °С.

Розподіл пікселів за температурою наведено в таблиці 1.

Баланс теплової потужності забезпечується стаціонарним характером теплообміну між нагрітою темновим струмом панелі та оточуючим середовищем. Стаціонарність процесу досягнута постійною величиною електричної потужності, що прикладається до сонячної панелі протягом тривалого часу (20 хвилин). Прикладена електрична потужність дорівнює потужності теплового потоку від панелі до оточуючого середовища (повітря в лабораторії, де проводяться вимірювання).

Прикладена електрична потужність дорівнює:

$$P = 670 \text{ В} \cdot 0,17 \text{ А} = 114 \text{ Вт}.$$

Вся прикладена потужність перетворюється в теплову потужність сонячної панелі. Площа S нагрітої частини панелі складає половину загальної її поверхні і дорівнює:

$$S = 61 \cdot 30,5 = 1860,5 \text{ см}^2.$$

Середня густина теплового потоку $\rho = P/S$; $\rho = 61,2 \text{ мВт/см}^2$. Потужність сонячного випромінювання, відповідає стандарту AM1.5 дорівнює 100 мВт/см^2 , що має значення, наближене до умов описаного експерименту.

Визначимо теплову потужність дефекту як таку, що локалізована в зоні з густиною теплової потужності, яка перевищує середню густина для нагрітої частини сонячної панелі. При цьому розрахунок виконаємо для різниці температур: температури піксела зони дефекту та середньої температури панелі, яка в експерименті складає 47 °С (320 К).

Баланс теплообміну дефекту складають три механізми: теплопровідність, конвекція та радіаційне випромінювання. Перша компонента враховується автоматично, оскільки ми збільшуємо зону дефекту (теплова пляма «розповзається» в горизонтальній площині). Розрахунок проводимо для лицевої поверхні. Загальний тепловий потік дефекту повинен враховувати і теплообмін тильного боку панелі, тому в кінці розрахунку необхідно подвоїти отримане значення (вважаємо, що тепловий потік панелі є симетричним відносно площини розділу лицевого та тильного боку).

Конвекційна компонента додаткового теплового потоку, що генерується дефектом, при конвекційному теплообміні [4] дорівнює:

$$q_c = h_c S (T_d - T_1), \quad (1)$$

де T_d – температура в зоні дефекту;

T_1 – середня температура нагрітої частини ФЕСБ;

S – площа зони дефекту;

h_c – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі від скла до повітря; $h_c = 5$ Вт/м²К [4].

Радіаційна компонента додаткового теплового потоку, що генерується дефектом, дорівнює:

$$q_r = \sigma S \varepsilon (T_d^4 - T_1^4), \quad (2)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴ – стала Стефана-Больцмана;

ε – коефіцієнт чорноти скла; $\varepsilon = 0,937$.

Загальну потужність дефекту виразимо як суму елементарних дефектів, що мають розмір одного пікселя та забезпечуючи конвекційний та радіаційний механізми теплообміну з оточуючим середовищем:

$$P_d = \sum_i (q_c^i + q_r^i) N_i, \quad (3)$$

Площа пікселю $S = 4 \cdot 10^{-6}$ м². В таблиці 2 надано зведені результати розрахунків теплових потоків пікселей з різною температурою у відповідності з формулами (2), (3).

Сумарний тепловий потік зони дефекту чільного боку сонячної панелі знаходимо як суму потоків всіх пікселей за відповідною формулою (3) та даними таблиць 1 та 2:

$$P_d = 1220 \text{ мВт.}$$

Таблиця 2. Теплові конвекційний та радіаційний потоки для пікселей з різною температурою

$T_i, \text{ K}$	328,5	331,5	334,5	337,5	340,5	343,5	346,5	349,5	352,5
$q_c^i, \text{ мВт}$	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65
$q_r^i, \text{ мВт}$	0,246	0,338	0,432	0,529	0,628	0,73	0,835	0,942	1,053
$q_c^i + q_r^i, \text{ мВт}$	0,416	0,558	0,722	0,879	1,038	1,2	1,365	1,632	1,703

Після подвоєння величини теплового потоку з метою врахування тильного боку сонячної панелі маємо:

$$P_d^{\text{full}} = 2P_d = 2,44 \text{ Вт.}$$

Перевіримо баланс теплової потужності Q ФЕСБ при її нагріванні темновим струмом. Враховуючи симетричне відведення тепла від чільного та тильного боків сонячної панелі маємо:

$$Q = 2(Q_c + Q_r), \quad (4)$$

Конвекційна компонента теплового потоку сонячної панелі:

$$Q_c = h_c S_1 (T_1 - T_0), \quad (5)$$

де $S_1 = 0,186 \text{ м}^2$ – площа нагрітої частини сонячної панелі;

$T_0 = 293 \text{ К}$ – температура повітря в лабораторії під час проведення експерименту.

$$Q_c = 5 \cdot 0,186(320 - 293) = 25,1 \text{ Вт.}$$

Радіаційна компонента:

$$q_r = \sigma S_1 \varepsilon (T_1^4 - T_0^4) \quad (6)$$

$$q_r = 30,8 \text{ Вт.}$$

Тоді загальний тепловий потік від сонячної панелі дорівнює:

$$Q = 2(25,1 + 30,8) = 111,8 \text{ Вт.}$$

Отримане значення загального теплового потоку сонячної панелі дуже близьке до значення прикладеної електричної потужності, що дорівнює 114 В. Відносна похибка розрахованої величини складає 1.9%.

Дефект, займаючи малу область панелі, може бути причиною значного локального перегріву (до 77°C) в порівнянні з середньою температурою (45°C). При цьому тепла потужність дефекту порівняно невелика (2.44 Вт на фоні 114 Вт надісланої до сонячної електричної потужності або 2% від підведеної потужності).

Наступна задача дослідження така.

Розрахувати радіаційну складову теплової потужності дефекту сонячної панелі за формулою Стефана-Больцмана.

При цьому замінити попиксельний розрахунок на розрахунок для еквівалентного однорідного квадратного елемента з ефективним розміром $60 \times 60 \text{ мм}$ з ефективною температурою 345 К .

Порівняти отриманий результат з результатом попиксельного розрахунку. Ввести корекцію в значення температури за необхідності та повторити розрахунок.

Надлишкову теплову потужність розраховувати від середнього значення температури панелі 320 К .

За таких умов в результаті отримали 730 мВт радіаційної складової теплової потужності дефекту для одностороннього випромінення. Цей результат відповідає попіксельному розрахунку теплового балансу дефекту.

Висновок: попіксельний розрахунок теплової потужності дефекту можна замінити розрахунком для ефективної площі зони дефекту і ефективної температури.

Ключові слова: сонячний елемент, сонячна панель, тепла потужність дефекту.

Література

- [1] Breitenstein O. Lock-in Thermography – Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials [Текст] /O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp. – Berlin: Springer. – 2010. – 256 p.
- [2] Breitenstein O. Series Resistance Imaging in Solar Cells by Lock-in Thermography [Текст] /O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, A.S.H. van der Heide, J. Carstensen //Prog. Photovolt: Res. Appl., no13, pp. 645 – 660, 2005.
- [3] Божко К. М. Інфрачервона термографія сонячних елементів, нагрітих темновим струмом /К. М. Божко, В.І. Дунаєвський, В.Й. Котовський, В.П. Маслов, В.А. Порєв //Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 46. – С. 56-63.
- [4] Kreith F. Basic Heat Transfer. [Текст] /F. Kreith, W.Z. Black. – NewYork. : Harper and Row. – 1980. – 512 p.