

- [3] O. Zabolotnyi, A. Khodieiev, N. Koshevoy, and R. Trishch, “Control of water–diesel emulsion stability using turbidity measurements,” *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 16, no. 1, pp. 35–41, 2026.
- [4] O. S. Alade, M. Mahmoud, D. A. Al Shehri, and A. S. Sultan, “Rapid determination of emulsion stability using turbidity measurement incorporating artificial neural network (ANN): Experimental validation using video/optical microscopy and kinetic modeling,” *ACS Omega*, vol. 6, pp. 5910–5920, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00017.

УДК 620

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПОРУ БЕЗ ДЕМОНТАЖУ

Питель І. Д., Івах Р.,

Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна

E-mail: ivan.d.pytel@lpnu.ua, roman.m.ivakh@lpnu.ua

Енергетика є фундаментом господарської діяльності, яка визначає темпи економічного зростання, собівартість продукції та технологічний рівень суспільства. У контексті глобального зростання енергоспоживання особливої актуальності набуває розвиток атомної енергетики, як одного з найбільш надійних джерел генерації. На сьогодні у світі експлуатується 439 ядерних реакторів, які забезпечують 13,8% світового виробництва електроенергії.

Найпоширенішою конструкцією атомної електростанції (АЕС) є вододояний реактор під тиском (PWR – Pressurized Water Reactor), де вода виконує функції теплоносія першого контуру та сповільнювача нейтронів. Оскільки робота АЕС базується на генерації та передачі великої кількості теплової енергії, прецизійне вимірювання температури є критично важливим для забезпечення як безпеки, так і ефективності технологічного процесу.

На сучасних АЕС контроль умов експлуатації ядерного палива та ключових параметрів реакторної установки здійснюється системою внутрішньореакторного контролю. Ця система об’єднує численні перетворювачі та контролери, що працюють у режимі реального часу. Однією з пріоритетних задач галузі є забезпечення достовірності вимірювання температури теплоносія першого контуру, від вирішення якої залежить надійність, ресурс та економічні показники реактора.

Атомні електростанції спроектовані таким чином, щоб вони були безпечними під час експлуатації та безпечними у разі будь-якої несправності чи аварії, але помилково вважати будь-яку промислову діяльність гарантовано надійною. Інциденти та аварії можуть траплятися, але отримані знання та досвід призведуть до поступового підвищення безпеки. Ці покращення стосуються як нових конструкцій, так і модернізації існуючих станцій. Довгострокова експлуатація існуючих станцій досягається завдяки значним інвестиціям у їх модернізацію. Безпечна та ефективна експлуатація станції вимагає постійного моніторингу

критичних параметрів, таких як температура. Її відхилення може призвести до зниження продуктивності або, навіть становити загрозу безпеці. Досвід аварій та інцидентів на АЕС показує, що майже усі аварії могли бути виявлені операторам при своєчасному розпізнаванні сигналів контрольно-вимірювальних приладів. З погляду класифікації аварій на атомних електростанціях, аварії в активній зоні відносяться до малоймовірних подій. Проте через тяжкість їх наслідків, умовам експлуатації активної зони та контролю її безпеки приділяється значна увага.

Кількість контрольованих точок перетворювачами, що припадають на реакторну установку, може становити кілька сотень, і навіть тисяч. Більшість критичних температурних процесів на АЕС вимірюються за допомогою RTD (перетворювачів опору температури) та термопар.

На установці PWR температура першого контуру теплоносія та температура технологічної води вимірюються за допомогою RTD, а температура води, що виходить з активної зони реактора, вимірюється за допомогою термопар. Ці термопари в основному використовуються для контролю температури і тому зазвичай не підлягають дуже високим вимогам до точності та часу відгуку. На противагу цьому, RTD першого контуру теплоносія зазвичай видають сигнали для системи керування та безпеки станції і тому повинні бути точними та мати хороші динамічні характеристики. Основні переваги RTD порівняно з іншими типами перетворювачів температури – це їхня висока точність, широкий діапазон робочих температур, малі розміри, стійкість до вібрацій, лінійність номінальної статичної характеристики та відносно високе значення коефіцієнта температурного опору.

Методи, які використовують для перевірки стану перетворювача у ядерних реакторах використовують занурювальні випробування. Вони є незручними, оскільки перетворювач необхідно виймати з трубопроводу теплоносія реактора та доставляти до лабораторії для випробувань. Умови експлуатації ядерного реактора 150 бар та 300°C важко відтворити в лабораторії. Тому усі лабораторні випробування проводяться за набагато “м'якших” умов, а результати екстраполюються на умови експлуатації. Це призводить до значних похибок при вимірюванні температури.

У статті доповіді представлено аналіз методу LCSR (Loop Current Step Response) проаналізовано методи контролю статичних характеристик резистивних термоперетворювачів (RTD) безпосередньо в умовах експлуатації та використання методу на основі нагріву чутливого елемента електричним струмом діагностики термоперетворювача опору за початковою адіабатичною ділянкою самонагріву.

Окрему увагу приділено аналізу адіабатичної ділянки перехідної характеристики нагріву чутливого елемента, що дозволяє діагностувати стан перетворювача та верифікацію його класу точності без демонтажу обладнання.

Ключові слова: атомна енергетика, RTD, адіабатичний нагрів, клас точності.

Література

- [1] Modern problems of the scientific supply of energy, in Mat. 20th Int. sc. and pract. conf. of young scientists (dedicated to the 125th anniversary of Igor Sikorsky KPI), Kyiv, Ukraine, April 25-28, 2023, https://iate.kpi.ua/uploads/p_21_72711255.pdf.
- [2] Ma, J. and Jiang, J. «Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: a review», Progress in Nuclear Energy, 2011, April Vol. 53, No. 3, pp.255–266.
- [3] Mangum B. W., Furukawa G. T. «Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990» (ITS-90). NIST Technical Note 1265.
- [4] Саченко А., Мільченко В., Кочан В. «Вимірювання температури за допомогою вбудованих калібраторів», М., Енергоатом, 1986.
- [5] US Patent US4746256A – Thermocouple with in-situ calibration means.
- [6] Ivan Pytel, Roman Borukh, Maksym Vasylyk «Enhancement of temperature measurement in nuclear power plants» Вимірювальна техніка та метрологія Volume 85, no.3, 2024 DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.03.030>
- [7] Orest Kochan, Ivan Pytel, Roman Borukh «Enhancement of temperature measurement in nuclear power plants», Measurement 2025 15 International Conference on Measurement June 2-4 2025 Smolenice Castle, Slovakia.
- [8] Kollie T., W. «Analytical methods for interpreting In-Situ measurements of response times in thermocouples and resistance thermometers» Oak Ridge National laboratory, Report number ORNL/TM-4912, Oak Ridge, Tennessee, march 1976
- [9] AMS Fact Sheet: RTD Response Time Testing Using the LCSR Technique, 2016, Analysis and measurement services corporation AMS Technology Center, 9119 Cross Park Drive Knoxville, TN 37923 USA, www.ams-corp.com
- [10] Каталог «Прилади для вимірювання та контролю температури», Науково-виробниче об'єднання «Термоприлад», Львів, www.thermo.lviv.ua
- [11] Іван Питель, Дмитро Ковальчук «Діагностика термоперетворювачів опору в умовах експлуатації», ITCMTM. 2025, Випуск 86(3), Номер 3: 16-20 <https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.03.016>

УДК 621.396

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ У БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Зінченко М.О.

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Крут, Київ, Україна,
E-mail: mykhailo.zinchenko@viti.edu.ua*

Бездротові сенсорні мережі складаються з окремих вузлів – мініатюрних обчислювально-комунікаційних пристроїв – мотів (від англ. motes – порошинки). Мот є платою розміром зазвичай трохи більше одного кубічного дюйма, розташований у просторі та призначений для моніторингу параметрів навколишнього середовища або об'єктів, що знаходяться в ньому.

Конфігурація бездротової сенсорної мережі повинна бути гнучкою і змінюватися в залежності від поточного положення в просторі і можливостей електропостачання. Сенсорні вузли зазвичай функціонують у недружньому середо-