

ДІАГНОСТИКА ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПОРУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

¹Ivan Pytel, Ph.D., As - Prof, ²Dmytro Kovalchuk engineer NVH

¹Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

²BMW Munich, Germany

e-mail:ivan_pytel@yahoo.com

Анотація

З усіх галузей господарської діяльності людини енергетика найбільше впливає на наше життя. Прорахунки у цій галузі мають серйозні наслідки. Тепло та світло в будинках, транспортні потоки та робота промисловості – все це потребує витрат енергії. Оскільки світ прагне задовольнити потребу в енергії, що постійно зростає, питання про розвиток атомної енергетики (АЕ) як одного з надійних її джерел набуває все більшої актуальності.

Сучасні атомні електростанції оснащені складними системами автоматизованого контролю, які дозволяють відстежувати стан реакторного блоку та забезпечувати його безпечну експлуатацію. Ці системи включають безліч датчиків, контролерів та інших пристроїв, що працюють в реальному часі і забезпечують високу надійність роботи АЕ.

Проблема достовірного визначення температури першого контуру теплоносія в атомній енергетиці є однією з найважливіших, від успішного вирішення якої залежать можливості підвищення надійності, ефективності та ресурсу роботи ядерного реактора [1]. В статті аналізуються методи визначення статичних характеристик резистивних термоперетворювачів в умовах експлуатації при вимірюванні температури.

Ключові слова

датчик температури опору; метод випробувань; ідентифікація властивостей; діагностика.

Вступ

Безпека АЕС є однією з найважливіших проблем, пов'язаних з використанням ядерної енергії. АЕС мають величезний потенціал для надання додаткових енергетичних ресурсів та забезпечення життєво важливих послуг, однак при неправильній експлуатації вони можуть бути джерелом серйозних загроз для життя та здоров'я людей, навколишнього середовища та соціально-економічної стабільності.

Більшість критичних температурних процесів на атомних електростанціях вимірюються за допомогою RTD (датчиків опору температури) та термопар. На установці PWR (реактор з водою під тиском) 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 датчиків температури - це їх 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 датчик 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 всі лабораторні випробування проводяться за набагато м'якших умов, а результати екстраполюються на умови експлуатації. Це призводить до значних похибок при вимірюванні температури.

В статті представлені дослідження методики перевірки RTD без вилучення її з умов експлуатації та використанням методу «in-situ» на основі нагріву чутливого елемента електричним струмом.

1 Недоліки

Існуючі методи визначення метрологічних характеристик термоперетворювача передбачають зняття його з технологічного процесу, а це неможливо, бо порушується режим роботи реактора.

3 Мета

Метою представленої роботи є дослідження методу LCSR для діагностики статичних характеристик RTD.

4 Особливості використання термоперетворювачів опору

Вимірювання температури технологічних процесів необхідне в багатьох промислових застосуваннях. Датчики температури, наприклад, датчики опору на атомних електростанціях, є важливими елементами систем вимірювання, контролю та забезпечення безпеки об'єкта. З цієї причини вони повинні бути точними та мати

хороші динамічні характеристики Вимірювання температури - один із найпоширеніших видів вимірювань у системі моніторингу реактора.

Завдання термометра опору не показати температуру, а перетворити її на електричний опір, представивши її в більш зручний для вимірювання сигнал. Тобто термометр опору, по суті, не є вимірювальним приладом для температури, а бере участь у початковому етапі її вимірювання тобто в первинному перетворюванні.

Існує безліч стандартів на робочі індустриальні RTD, які мають локальний чи міждержавний статус. Серед найпоширеніших — «європейський» МЕК 60751 (DIN/IEC EN 60 751) і «північноамериканський» ASTM 1137. Стандарт МЕК 60751 - один з найбільш поширених та регламентує характеристики платинових PRT з номінальним опором 100 Ом при температурі 0°C та температурним коефіцієнтом опору $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Температурний коефіцієнт термометра опору характеризує зміну величини опору від температури:

$$\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_{100} \times 100^\circ\text{C}), \quad (1)$$

де R_{100} , R_0 - значення опору PRT з номінальної статичної характеристики (НСХ) при 100 і 0°C відповідно.

Для RTD існують класи точності, які визначені такими стандартами, як DIN EN 60751 та IEC 60751. Ці класи, зазвичай AA, A, B та C, визначають допустимий діапазон допусків для значень опору та температури датчика. Клас AA є найточнішим, тоді як клас C має найширший допуск. Промислові PRD наприклад, Pt100 мають точність від $0,15^\circ\text{C} \div 0,6^\circ\text{C}$.

4.1 Визначення метрологічних характеристик термоперетворювачів в умовах експлуатації

Можливість проведення випробувань термоперетворювачів на місці установки мають перевагу, оскільки умови технологічного процесу значно впливають на характеристики датчиків температури. В першу чергу це стосується методів визначення динамічних характеристик термоперетворювачів.

Огляди експериментальних методів тестування параметрів датчиків температури представлені в [2] передбачають визначення динамічних характеристик. Динамічні властивості датчика температури резистивного типу можна визначити за допомогою методу занурення та методу самонагрівання. Занурення виконується шляхом впливу на датчик зовнішньої ступінчастої зміни температури навколишньої рідини, або повітря. Потім тепло передається через внутрішню структуру датчика до чутливого елемента (або в протилежному напрямку, якщо ступінчаста зміна відбувається від вищої до нижчої температури). Під час тесту самонагріванням датчик збуджується внутрішньою ступінчастою зміною швидкості теплоутворення в чутливому елементі, що виникає внаслідок збільшення електричного струму, що проходить через нього (джоулеве нагрівання). Температура чутливого елемента підвищується, і тепло передається через шари датчика до навколишньої рідини. Метод випробування на самонагрівання зі ступінчастою зміною збудження відомий, як метод випробування на ступінчасту реакцію контурного струму «Loop Current Step Response» (LCSR) [3].

В загальному випадку всі ці методи знайшли застосування виключно для дослідження динамічних характеристик первинних перетворювачів температури.

На сьогоднішній день, для перевірки статичної характеристики первинних перетворювачів температури в умовах експлуатації певного розвитку набули так звані методи вбудованих калібраторів.

Відома публікація [4] про використання хімічно чистих елементів (або евтектичних сплавів) як опорних температурних фіксаторів усередині конструкції термоперетворювачів. Ідея полягає в тому, що певні хімічні елементи або сплави мають чітко визначені температури фазових переходів (плавлення, замерзання, поліформні переходи тощо), які використовуються як реперні точки для калібрування чи контролю стабільності характеристик термоперетворювачів безпосередньо в умовах експлуатації.

У [5] описана конструкція, де в корпусі термоперетворювача розташовують невеликі резервуари з чистими металами. При досягненні температури плавлення/кристалізації ці резервуари забезпечують різку зміну тепловіддачі чи інші фізичні ефекти, які можна зареєструвати для перевірки правильності показів сенсора.

Дослідження науково-дослідних інститутів (наприклад, NIST, PTB, VNIIM) [5] описують використання «замкнених металевих комірок» (sealed metal cells) в якості інтегрованих температурних фіксаторів у складі конструкцій для польових умов експлуатації.

Отже, є чимало публікацій і патентів, де описують ідею вбудовування хімічно чистих елементів або їх сплавів усередині термоперетворювачів для створення реперних температурних точок, необхідних для визначення чи контролю статичної характеристики сенсора під час експлуатації. Це особливо актуально в галузях, де критично важлива точність вимірювання температури (метрологія, енергетика, хімічна промисловість тощо).

Таким чином, в цих методах при досягненні температурою середовища значення температури внесеного елемента має місце певна стабілізація температури чутливого елемента. Реєстрація фазового переходу дає змогу ідентифікувати величину вхідного збурення. Такий підхід до діагностики статичної характеристики RTD може забезпечити високу точність, але він має ряд недоліків. По-перше, це значне ускладнення конструкції RTD. По-друге, значно збільшує постійну часу RTD. По-третє, температура фазових переходів внесених елементів має ряд спільних з статичною характеристикою чутливого елемента дестабілізуючих факторів (наприклад, дифузійні процеси).

4.2 Спосіб тестового збурення в умовах експлуатації для RTD

В середині 1970-х років був розроблений метод випробувань «in situ» під назвою LCSR - тест на ступінчасту реакцію струму петлі для дистанційного вимірювання часу відгуку RTD. В [6,7,8] описаний метод ступінчастої реакції петльового струму (LCSR) для аналізу термопари та датчика температури опору (RTD). Метод LCSR був валідований шляхом порівняння його результатів з традиційними випробуваннями занурення в контрольованому середовищі. У методі LCSR чутливий елемент нагрівається електричним струмом, струм викликає джоулів нагрів у датчику та призводить до температурного перехідного процесу всередині датчика. Температурний перехідний процес в елементі реєструється, і на основі цього перехідного процесу за допомогою перетворення LCSR визначається час відгуку датчика на зміни зовнішньої температури.

В загальному випадку процес нагріву чутливого елемента RTD описується виразом:

$$E(t) = Q_{\text{че}}(t) + Q(t), \quad (2)$$

де $E(t)$ — електрична енергія, яка підведена до чутливого елемента: $E(t)=P \cdot t$ (якщо $P=\text{const}$); $Q_{\text{че}}(t)$ — тепло, що акумулюється чутливим елементом (йде на його нагрів): $Q_{\text{че}}(t)=C \cdot T(t)$; $Q(t)$ — тепло, що відводиться у навколишнє середовище (через теплопровідність, конвекцію тощо). C — теплоємність чутливого елемента протягом нагріву ($C = \text{const}$).

Припустимо, створено в чутливому елементі стрибкоподібну потужність в $P=1$ Вт моменту часу $t=0$. Розглянемо короткий проміжок часу (наприклад, до 1 секунди), коли температура ще не досягла стаціонарного значення (рис.1).

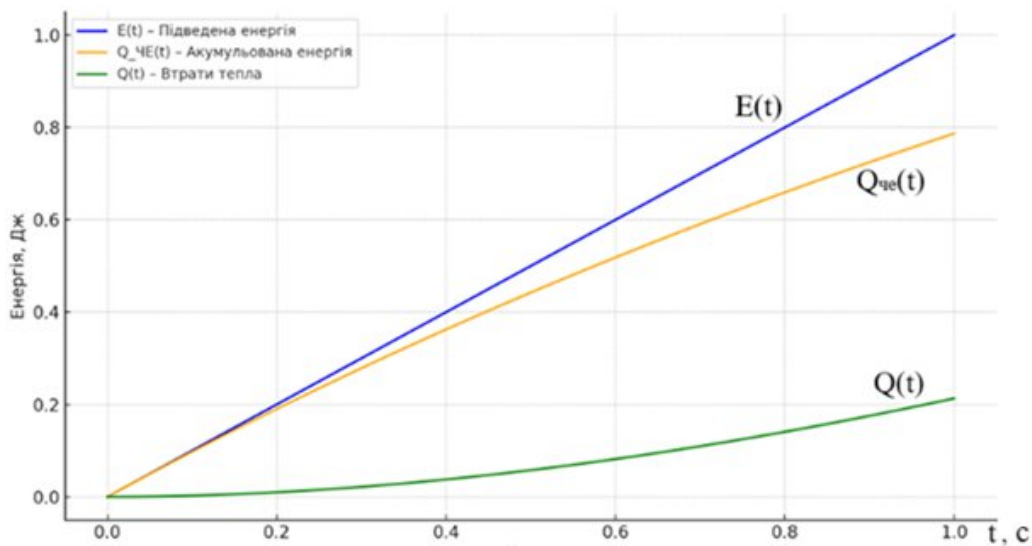


Рис 1 Тепловий баланс чутливого елемента RTD (1Вт нагріву).

На самому початку нагріву весь підведений тепловий імпульс іде на нагрів чутливого елемента, а втрати тепла в середовище ще дуже малі через інерційність теплообміну. З певним наближенням процес нагріву чутливого елемента на початковій ділянці можна вважати адіабатичним, отже, вільним від будь-яких зовнішніх впливів. Саме в цій короткій ділянці можна діагностувати теплоємність і температурний коефіцієнт опору α чутливого елемента, де відсутній вплив від коефіцієнтів тепловіддачі чи умов навколишнього середовища. Тривалість початкової ділянки теплового перехідного процесу визначається конструкцією чутливого елемента, його теплоємністю, особливостями теплопередачі між чутливим елементом і оточуючим середовищем. Таким чином, для RTD існує можливість формування вхідного збурення з визначеними амплітудно-часовими характеристиками при нагріванні електричним струмом певної тривалості.

4.3 Конструктивні елементи чутливого елемента та його властивості

Для оцінки параметрів початкової ділянки при нагріві чутливого елемента RTD електричним струмом та впливу на неї різних дестабілізуючих факторів розглянемо основні конструктивні елементи та проаналізуємо їх властивості. В якості матеріалу який використовується в атомних реакторах є платина. Платина має високу хімічну стабільність, достатньо лінійну температурну залежність електричного опору, а також вона стійка при дії оточуючого середовища при високих температурах. В атомній енергетиці широке застосування набули терморезистивні перетворювачі ТСП-1390 та ТСП 1790. В них використовується конструкція чутливого елемента, в якій платинову спіраль розміщено в каналах керамічної трубки (рис. 2). Отвори в кераміці з спіраллю заповнюють порошком оксиду алюмінію (Al_2O_3). Така конструкція забезпечує ізоляцію витків спіралі та мінімальну постійну часу. Габаритні розміри чутливого елемента наступні довжина 40мм, діаметр каркасу 2,8мм, товщина платинового джоту 0,03мм.

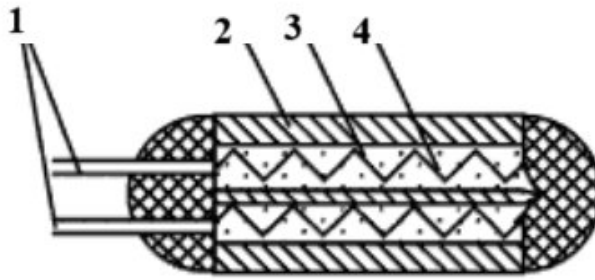


Рис.2 1 - виводи, 2 - керамічний каркас, 3 - порошок 4 - платинова спіраль.

Розглянемо початкову ділянку перехідного процесу в чутливому елементі при струмі сталої потужності. Припущення:

- Струм через чутливий елемент подається такий, щоб забезпечити сталу потужність нагріву $P = I^2 R = I B m = \text{const.}$
- Теплоємність C чутливого елемента вважається постійною в цій області для платини $C \approx 133 \text{ Дж/кг.}$
- Немає суттєвої тепловіддачі (тобто проходить адіабатичний нагрів).

Початкова динаміка нагріву наступна.

Рівняння енергетичного балансу у початковий момент (до впливу теплообміну) визначається:

$$P = C \cdot dT/dt \quad (3)$$

де P — потужність нагріву (сталий струм $\rightarrow$ стала потужність), C — теплоємність чутливого елемента, T — температура елемента.

Звідси:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{C} \quad T(t) = T_0 + \frac{P \cdot t}{C} \quad (4)$$

Тобто температура лінійно зростає в часі, поки діє лише внутрішнє нагрівання. А залежність опору від температури $R(T)$ для платини має вигляд:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha T) \quad (5)$$

З цього можна отримати:

$$R(t) = R_0 \left[1 + \alpha \left(T_0 + \frac{P}{C} t \right) \right] = R_0 \left(1 + \alpha T_0 + \alpha \frac{P}{C} t \right) \quad (6)$$

Таким чином на початковій ділянці перехідного процесу опір лінійно зростає з часом:

$$R(t) = A + B \cdot t, \quad B = \alpha \frac{P}{C} R_0 \quad (7)$$

Отже, за кутом нахилу B можна знайти добуток $\alpha \cdot R_0 / C$. Якщо P відомо, то:

$$\alpha = \frac{B \cdot C}{P \cdot R_0} \quad (8)$$

Звідси виходить, що можна діагностувати зміну статичних характеристик на протязі початкової ділянки перехідного процесу RTD. Щоб визначити межу адіабатичної ділянки (тобто проміжок часу, де теплообмін з навколишнім середовищем майже відсутній), потрібно аналізувати, коли втрати тепла $Q(t)$ починають становити суттєву частину підведеної енергії $E(t)$.

Аналіз як теоретичних міркувань, так і експериментальних досліджень показав, що для резистивних температурних детекторів (RTD) типів TSP-1390 та TSP-1790 класу точності С характерний адіабатичний час нагрівання становить приблизно 170 мс при застосованій потужності нагріву 1 Вт.

Отже, будь-яка зміна температурного коефіцієнта опору α (викликана, наприклад, деградацією сплаву, механічними дефектами або забрудненням поверхні) призводить до зміни функції опору-температури $R(T)$ і, відповідно, до зміни нахилу перехідної характеристики.

Порівнюючи вимірний нахил у адіабатичній частині перехідної характеристики з номінальним нахилом, можна оцінити, чи відповідає RTD заданому класу точності за фактичних умов експлуатації. Будь-яка

експериментальна крива, що потрапляє в цей діапазон, відповідає класу точності (рис.3). При використанні метода необхідно, щоб виконувались наступні умови:

- коефіцієнт α - повинен бути стабільним у потрібному діапазоні;
- теплоємність C - чутливого елемента не змінювалась з температурою;
- потужність нагріву P - стабільна (струм збудження не змінювався).

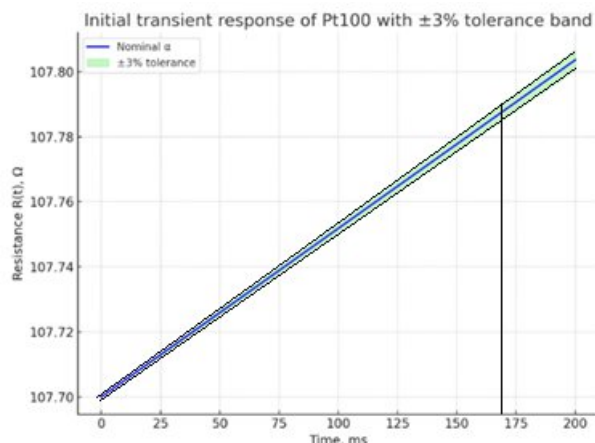


Рис. 3 Порівняння експериментально виміряного нахилу B з його номінальним значенням для класу C .

Висновок

Методи вбудованих калібраторів для визначення статичних характеристик RTD мають суттєві недоліки, а саме ускладнюють конструкцію RTD, збільшують постійну часу та змінюють свої параметри за рахунок дифузійних процесів.

Метод LCSR відносно простий у реалізації, оскільки він не вимагає складного обладнання для визначення статичної характеристики RTD в умовах експлуатації.

Отже, порівняння експериментально виміряного нахилу B з його номінальним значенням забезпечує діагностичний критерій. Якщо відхилення залишається в заданих межах ($\pm 1\%$ для класу A , $\pm 3\%$ для класу C), RTD можна вважати таким, що відповідає його класу точності за робочих умов. В іншому випадку це вказує на погіршення якості або несправність.

Запропонований у статті підхід може бути основою для визначення класу точності датчиків температури в умовах експлуатації. Це стало можливим завдяки вдосконаленню вимірювальних приладів та методів обробки сигналів.

Список літератури

- [1] Modern problems of the scientific supply of energy, in Mat. 20th Int. sc. and pract. conf. of youn 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] 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/istcmtn2024.03.030>
- [3] Orest Kochan, Ivan Pytel, Roman Borukh «Enhancement of temperature measurement in nuclear power plants», Measurement 2025 15th International Conference on Measurement June 2-4 2025 Smolenice Castle, Slovakia.
- [4] Sachenko A., Milchenko V., Kochan V., "Temperature measurement with built-in calibrators", M., Energoatom, 1986.
- [5] US Patent US4746256A – Thermocouple with in-situ calibration means.
- [6] Mangum B. W., Furukawa G. T. «Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990» (ITS-90). NIST Technical Note 1265.
- [7] 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
- [8] Ma, J. and Jiang, J. «Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclearpower plants: a review», Progress in Nuclear Energy, 2011, April Vol. 53, No. 3, pp.255–266.
- [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