

МЕТОД САМОДІАГНОСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА МІСЦІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Кочан О.В.

Анотація. В статті запропоновано метод самодіагностики степені деградації електродів термоелектричних перетворювачів в процесі їх експлуатації, без необхідності демонтування. В результаті самодіагностики отримуємо еквівалентний час експлуатації термоелектричного перетворювача, що дозволяє визначити його місце у моделі похибки від дрейфу функції перетворення та набутої термоелектричної неоднорідності. Умовою проведення самодіагностики термоелектричних перетворювачів є сталість температури його робочого кінця на час самодіагностики.

Abstract. The method of selfdiagnostic of thermocouples' electrodes degradation without replacement from operation place is considered in this paper. The equivalent operation time of thermocouple is obtained. This time allows determinum its place in conversional characteristic error dependence on drift and acquired inhomogeneity. The necessary condition that makes selfdiagnostic possible is constant hot junction temperature during procedure of selfdiagnostic.

Вступ. Термоелектричні перетворювачі (ТЕП) на сьогодні залишаються найбільш популярними первинними вимірювальними перетворювачами (давачами, сенсорами) температури вище 600°C, незважаючи на те, що вони є найменш точною ланкою вимірювального каналу [1, 2]. Методи корекції похибок ТЕП, розроблені за останні кілька десятиків років, дозволяють значно підвищити їх точність. Однак ці методи доволі трудомісткі та мають обмежені можливості. Для них повністю підходить правило – чим менша похибка, тим менша необхідна точність корекції, тим менше затрат вона потребує. Тому важливим заходом, що дозволяє надійно підвищити точність вимірювання температури, залишається заміна ТЕП або їх чутливих елементів – термопар. Однак на питання коли саме слід замінити дану термопару обґрунтована відповідь не відома.

На перший погляд здається, що час експлуатації ТЕП вигідно робити як найдовшим – крім економії самих ТЕП, зменшуються затрати, пов'язані з трудомісткістю заміни, втратами через імовірну необхідність зупинки експлуатації обладнання тощо. З іншого боку втрати через недостатню точність вимірювання та регулювання також можуть бути значними. Тому своєчасна заміна ТЕП (термопар) є важливою. Їх заміна за результатами періодичної метрологічної перевірки неефективна через встановлений стандартами відносно великий час між перевірками [3]. Тому створення методу самодіагностики ТЕП на місці експлуатації є актуальною задачею.

1. Міра деградації термоелектродів ТЕП

В процесі тривалої експлуатації, під дією високої температури, електроди чутливого елементу ТЕП, термопари, поступово деградують. Причин деградації багато, причому всі вони діють одночасно та з різною інтенсивністю. Тому швидкість деградації залежить від умов експлуатації – наявності та складу в оточуючому середовищі речовин, що впливають на

швидкість тих чи інших деградаційних процесів, термоударів, вібрації тощо. Прямі методи визначення степені деградації термоелектродів на сьогодні невідомі. Зазвичай про деградацію судять за зміною функції перетворення (ФП) термоелектродів або їх ділянок.

Традиційним методом визначення відхилень ФП ТЕП від номінальної, а також її зміни, є періодична метрологічна перевірка в лабораторних умовах. Однак, через вимогу стандарту використовувати для такої перевірки піч з рівномірним профілем температурного поля [3], вона „ховає” зміну ФП ТЕП в процесі експлуатації [4]. Запропонована в [4] метрологічна перевірка в профілі температурного поля, що імітує поле експлуатації виявляє зміни ФП ТЕП, викликані деградацією термоелектродів, однак такий метод вимагає вилучення ТЕП, доставки в лабораторію та назад, налаштування профілю температурного поля, монтажу ТЕП на об’єкті та запуску останнього. Аналогічні недоліки має метод корекції похибки від набутої неоднорідності [5], при реалізації якого теж можна оцінити ступінь деградації термоелектродів.

Кращими є методи визначення відхилень ФП ТЕП від номінальної та її змін на місці експлуатації. Однак температурні калібратори [6, 7] поки що не випускаються, а використання взірцевого ТЕП на місці експлуатації [8, 9] також трудомістке (вимагає обладнання, відповідного до взірцевого ТЕП) і суперечить стандартам на експлуатацію взірцевого обладнання.

Найменшу трудомісткість мають методи, що ґрунтуються на ефекті Пельтьє [10, 11]. Однак слід зазначити, що в [10, 11] не проведено аналіз похибок цих методів, тому їх використання вимагає відповідного обґрунтування.

Не достатньо обґрунтованим питанням є також вибір для оцінки ступеня деградації термоелектродів зміни ФП ТЕП. Така зміна дозволяє оцінити похибку даного ТЕП в момент її визначення, але не визначає його місце у загальній картині процесу деградації термоелектродів. Тому вибір зміни ФП ТЕП як міри деградації термоелектродів не можна вважати найкращим рішенням.

Пропонується для оцінки ступеня деградації термоелектродів вибрати еквівалентний час експлуатації ТЕП. Цей час може бути рівним фізичному часу експлуатації ТЕП, якщо умови експлуатації близькі до тих, що мали місце при експериментальних дослідженнях змін ФП однотипних ТЕП під дією основних впливаючих величин. Однак при зміні умов експлуатації еквівалентний час експлуатації ТЕП не буде рівний фізичному. Якщо умови експлуатації сприятливі (відсутні шкідливі домішки, термоудари тощо), то еквівалентний час експлуатації ТЕП буде меншим фізичного. Якщо умови експлуатації жорсткі, то еквівалентний час експлуатації ТЕП буде більшим фізичного.

В загальному еквівалентний час експлуатації даного ТЕП повинен вказувати місце цього ТЕП у загальній математичній моделі змін ФП ТЕП, побудованій на базі результатів експериментальних досліджень, наприклад, [12, 13] та їм подібних. В такому разі еквівалентний час експлуатації дозволить оцінити похибки ТЕП різного виду (зумовлену дією на даний ТЕП впливаючих величин) при його подальшій експлуатації та, враховуючи ефективність використовуваних методів корекції його похибок, прийняти обґрунтоване рішення про доцільність або необхідність заміни ТЕП.

Основою для уведення еквівалентного часу експлуатації як міри деградації термоелектродів може служити взаємна залежність між різними проявами ступеня деградації термоелектродів під дією домінуючих у більшості випадків впливаючих величин – температури та часу експлуатації ТЕП. Як показано в [14], дві домінуючі похибки ТЕП – часовий дрейф ФП ТЕП (зміна ФП ТЕП в залежності від часу експлуатації при високій температурі) та похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації неоднорідності термоелектродів ТЕП (залежність генерованої термо-е.р.с. від профілю температурного поля

вздовж термоелектродів при сталих температурах робочого з'єднання та з'єднань порівняння) є різними проявами процесу деградації термоелектродів ТЕП. В такому випадку еквівалентний час експлуатації даного ТЕП дозволяє, при наявності математичної моделі, що поєднує дію цих впливаючих величин, визначити його місце в математичній моделі та оцінити відповідні похибки ТЕП в даних умовах експлуатації.

Таким чином, визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП дає змогу комплексної оцінки стану його термоелектродів, що забезпечує кращі умови для вирішення питання про доцільність або необхідність заміни ТЕП. **Метою** статті є створення методу самодіагностики ТЕП на місці їх експлуатації шляхом визначення еквівалентного часу експлуатації їх чутливих елементів – електродів термопар.

2. Метод самодіагностики ТЕП

Як було вказано вище, похибки часового дрейфу ФП ТЕП та набутої неоднорідності є проявами однієї причини – деградації електродів термопари під дією часу експлуатації при високій температурі [14]. Тому, знаючи одну з цих похибок під дією впливаючої на неї величини, можна оцінити іншу похибку під дією відповідної впливаючої величини. Зокрема, визначивши (експериментально) похибку від набутої неоднорідності (зміну генерованої термо-е.р.с. від дії заданої зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів), можна оцінити відповідний часовий дрейф ФП ТЕП. При цьому, знаючи фізичний час експлуатації та відповідну йому похибку від набутої неоднорідності від дії заданої зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів, та порівнявши цю похибку із визначеною під час експерименту, можна визначити еквівалентний часу експлуатації даного ТЕП [15]. За значенням отриманого еквівалентного часу експлуатації термопари можна оцінити подальші похибки часового дрейфу ФП ТЕП і набутої неоднорідності в даних умовах експлуатації та порівняти їх з допустимими значеннями. Відповідно до результатів порівняння можна прийняти обґрунтоване рішення про продовження експлуатації ТЕП або про його заміну.

Для реалізації пропонованого методу необхідно змінити заданим чином профіль температурного поля вздовж термоелектродів в зоні, яка генерує основну термо-е.р.с. ТЕП (рис. 1), тобто в зоні градієнту профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури [15]. Зміна профілю температурного поля в зоні, яка знаходиться в рівномірному температурному полі та генерує відносно малу термо-е.р.с. дозволяє оцінити стан тих ділянок які мало впливають на сумарну термо-е.р.с. ТЕП, тому вона не доцільна. Таку зміну проводять коли температура робочого з'єднання та з'єднань порівняння залишається постійною, що можна визначити за результатами вимірювання температури об'єкта іншими датчиками, сталістю умов експлуатації, споживаної або генерованої потужності тощо.

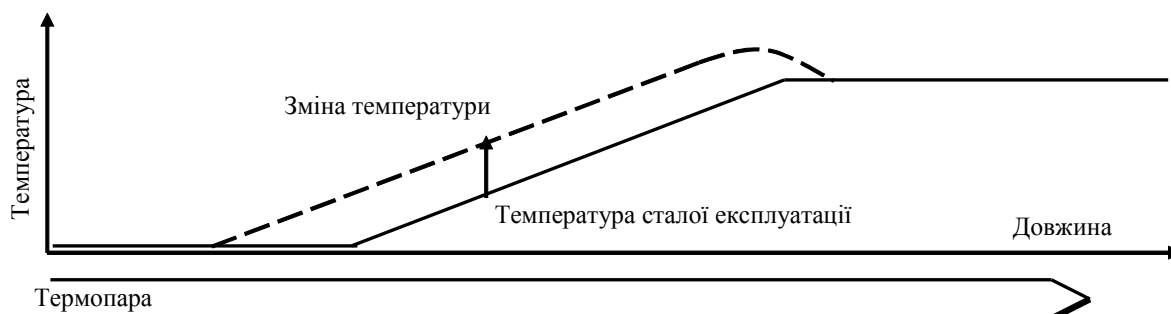


Рис. 1. Профілі температурного поля вздовж термоелектродів при проведенні самодіагностики

В результаті запропонованої зміни профілю температурного поля ті ділянки ТЕП, що генерують основну термо-е.р.с., змінять температуру. Якщо термоелектроди не деградували (тобто залишилися однорідні), то сумарна термо-е.р.с. ТЕП не зміниться [16]. Якщо термоелектроди деградували (тобто мають набути в процесі експлуатації неоднорідність), то сумарна термо-е.р.с. ТЕП зміниться. За значенням зміни будемо судити про еквівалентний час експлуатації ТЕП.

Нехай часовий дрейф термо-е.р.с. термопар $E_{\Sigma DR}^T$, одержаний в результаті експериментальних досліджень однотипних термопар в аналогічних умовах експлуатації, описується функцією

$$E_{\Sigma DR}^T = \sum_{i=1}^n E_{DRi} = \sum_{i=1}^n \varphi_i(t_{Ei}, t_{Di}, \tau) \quad (1)$$

де n – номер ділянки, на які умовно розбита термопара (згідно [4], умовою розбиття є настільки мала різниця часових дрейфів для температур кінців ділянок, що цією різницею можна нехтувати); t_{Ei} – температура експлуатації i -тої ділянки, причому $i = \overline{1, n}$; t_{Di} – температура, в якій ділянка опинилася після зміни профілю температурного поля; τ – фізичний час експлуатації ділянок, тобто термопар в цілому.

Прийемо, що в результаті зміни профілю температурного поля отримано експериментальне значення зміни генерованої термопарою термо-е.р.с. $\Delta E_{\Sigma NEOD}^E$, викликане термоелектричною неоднорідністю її електродів (якщо би електроди були однорідними, то зміна $\Delta E_{\Sigma NEOD}^E$ була би близькою до нуля, такий результат можна отримати на початку експлуатації термопар, коли електроди термопар ще практично однорідні). Для даних умов експлуатації також обчислимо, на основі (1), теоретичне значення цієї зміни $\Delta E_{\Sigma DR}^T$, що відповідає новим значенням t_{Ei} та t_{Di} (в цьому випадку $t_{Di} \neq t_{Ei}$). Якщо температура робочого кінця залишається сталою (це можна проконтролювати, як вказано вище, за попереднім і наступним станом об'єкта, станом керуючої дії, яку формує регулятор температури об'єкта або за результатами вимірювань іншими давачами температури об'єкта), то зміну генерованої термопарою термо-е.р.с. $\Delta E_{\Sigma NEOD}^E$ можна повністю віднести до прояву похибки неоднорідності ТЕП, самодіагностика якого проводиться.

Як відомо з [14], похибки неоднорідності та часового дрейфу є проявами одного і того ж явища (деградації електродів термопар), крім того, вони можуть бути обчислені на основі (1). При обчисленні часового дрейфу слід прийняти $t_{Di} = t_{Ei}$, а змінною буде час експлуатації τ . При обчисленні похибки від набутої неоднорідності для деякого фіксованого часу $\tau = const$, який відповідає моменту зміни профілю температурного поля, слід враховувати, що $t_{Di} \neq t_{Ei}$.

Таким чином, в ідеальному випадку, повинна виконуватися рівність

$$\Delta E_{\Sigma NEOD}^E = \sum_{i=1}^n \varphi_i(t_{Ei}, t_{Di}, \tau) - \sum_{i=1}^n \varphi_i(t_{Ei}, t_{Ei}, \tau) \quad (2)$$

Якщо рівність (2) справджується, то це означає, що ТЕП, самодіагностика якого проводиться, експлуатується в умовах, які в цілому відповідають умовам дослідження однотипних ТЕП, тому його похибки визначаються результатами експериментальних досліджень. Однак частіше рівність (2) не справджується, що означає відмінність або умов

експлуатації цього ТЕП від умов досліджень аналогічних ТЕП, або індивідуальних властивостей самого ТЕП від досліджуваних. В обох випадках пропонується знайти такий еквівалентний час τ_E експлуатації ТЕП, самодіагностика якого проводиться, (точніше його чутливого елемента – термопари), який відповідав би (з точки зору степені деградації термоелектродів) часу експлуатації досліджуваних ТЕП (а значить і похибки діагностованої термопари відповідали би похибкам досліджуваних термопар). Умову, що дозволяє визначити τ_E , можна сформулювати наступним чином

$$\Delta E_{\Sigma NEOD}^E - \sum_{i=1}^n \varphi_i(t_{Ei}, t_{Di}, \tau_E) - \sum_{i=1}^n \varphi_i(t_{Ei}, t_{Ei}, \tau_E) \rightarrow 0 \quad (3)$$

Значення τ_E з умови (3) може бути знайдене довільним способом. Якщо функції φ_i задані аналітично та є однорідними, доцільне аналітичне знаходження τ_E . В іншому випадку можна застосувати довільні чисельні методи (поділу відрізка навпіл, Ньютона, хорд тощо). Слід відзначити, що похибка визначення τ_E , по відношенню до похибки вимірювання температури, є похибкою другої степені малості, тому висока точність його знаходження не потрібна.

Знаючи еквівалентний час експлуатації термопари τ_E можна визначити за допомогою (1) відповідні до цього часу максимальні межі часового дрейфу ФП термопари та максимальну похибку від набутої неоднорідності при характерних для даного об'єкта вимірювання змінах профілю температурного поля, а також прийняти рішення про заміну ТЕП в цілому або (при можливості), лише його термопари.

3. Конструктивна схема ТЕП з самодіагностикою

Реалізувати зміну профілю температурного поля, показано на рис. 1, можна при використанні ТЕП з керованим профілем температурного поля [17]. Однак такий ТЕП доволі складний конструктивно, з точки зору самодіагностики його конструкція явно надлишкова. Пропонований метод самодіагностики доцільно реалізувати так, щоби максимально використати елементи існуючих ТЕП.

Конструктивна схема ТЕП, що дає змогу реалізувати пропонований метод самодіагностики, подана на рис. 2. В склад пропонуваного ТЕП входять основна 1 та додаткова 2 термопари, захисний металевий або керамічний чохол 3, чотирьохканальні ізоляційні втулки (буси) 4, одна з яких, 5, повинна мати довжину, що приблизно відповідає довжині зони градієнта профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури (див. рис. 1). Крім того, в склад пропонуваного ТЕП (див. рис. 2) входять нагрівач 6, розміщений на поверхні втулки 5, та головка ТЕП 7, яка має чотири контакти 8.

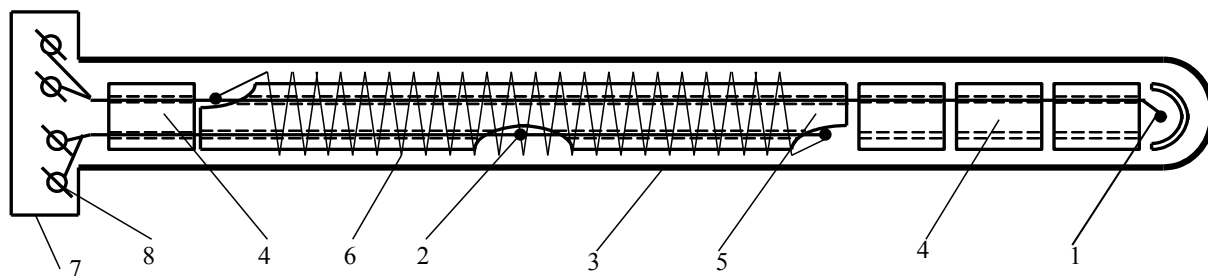


Рис. 2. Конструктивна схема пропонуваного ТЕП із самодіагностикою

Коли температура об'єкта вимірювання (тобто робочого кінця термопары 1) залишається стабільною (її зміни не передбачаються), вмикається нагрівач, що змінює профіль температурного поля вздовж електродів термопары 1 (див. штрихову лінію профілю температурного поля на рис. 1). Зміна профілю контролюється в одній точці з допомогою термопары 2 (див. рис. 2). За відомою за результатами вимірювання термопарою 2 зміною температури для відповідної до робочого кінця термопары 2 ділянки можна визначити приблизні зміни температури інших ділянок. Для цього можна використати аналітичний розв'язок рівняння теплопровідності вздовж корпусу ТЕП або результати експериментальних досліджень макетного взірця пропонованого ТЕП на етапі його проектування. Далі отримані значення температури t_{Di} використовують при складанні умови (3). Наявність тільки одного нагрівача та одної додаткової термопары суттєво спрощує пропонований ТЕП порівняно з ТЕП з керованим профілем температурного поля [17], але дозволяє діагностувати стан термоелектродів з достатньою точністю.

Для створення можливості використання в пропонованому ТЕП максимальної кількості деталей серійних ТЕП нагрівач 6 запропоновано виконати як напилене покриття (металом або сплавом) однієї ізоляційної втулки (буси) 5, яка, для усунення необхідності створення контактів між різними втулками, виконана достатньо довгою (такі довгі втулки широко використовуються при виготовленні серійних ТЕП). Залежно від потрібного опору нагрівача 6 напилення може бути суцільним або, з допомогою маски, використаної при напиленні, сформоване у вигляді спіралі (спіраль може бути сформована також шляхом прорізання суцільного напиленого шару, аналогічно, як це робиться при виготовленні метало-плівкових резисторів).

Для розміщення робочого кінця додаткової термопары 2 у центрі нагрівача у втулці 5 (після напилення нагрівача 6) зроблено виріз (рис. 3), що відкриває два канали втулки 5. Саме в ці канали протягують електроди термопары 2, електроди термопары 1 протягують в канали, не відкриті вирізом в центрі. Вирізи роблять також на кінцях втулки 5 (до напилення), при цьому торці втулки 5 захищають від напилення. Виводи нагрівача 6 підключають до робочого кінця термопары 2 (для чого до її робочого кінця приварюють відповідний провідник або продовжують один з її електродів) та до одного з електродів термопары 1 (для чого до нього приварюють відповідний провідник). Підключення плівкових виводів нагрівача 6 до виводів може бути здійснене шляхом зварювання, пайки високотемпературним припоєм або напилення нагрівача 6 на втулку 5, на якій вже закріплені дотові або стрічкові виводи нагрівача 6. Нагрівач 6 виявляється підключеним між термопарами 1 та 2.

Таким чином, крім вузла, пов'язаного з втулкою 5, решта деталей пропонованого ТЕП із самодіагностикою, повністю відповідають деталям серійних ТЕП.

Схема підключення пропонованого ТЕП приведена на рис. 4. Як видно з цієї схеми, підключення нагрівача 6 між основною 1 та додатковою 2 термопарами мало на меті зменшення кількості контактів пропонованого ТЕП до чотирьох. Такі чотирьохконтактні головки ТЕП доволі часто використовуються в ТЕП з подвійними термопарами. Слід відзначити, що вимірювально-керуюча підсистема (рис. 4) повинна мати достатню обчислювальну потужність для того, щоби за (1) ... (3) визначити еквівалентний час експлуатації ТЕП.

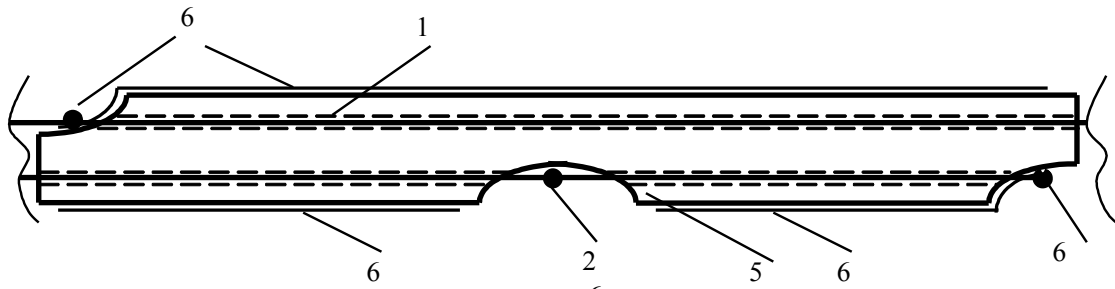


Рис. 3. Конструктивна схема вузла нагрівача ТЕП із самодіагностикою

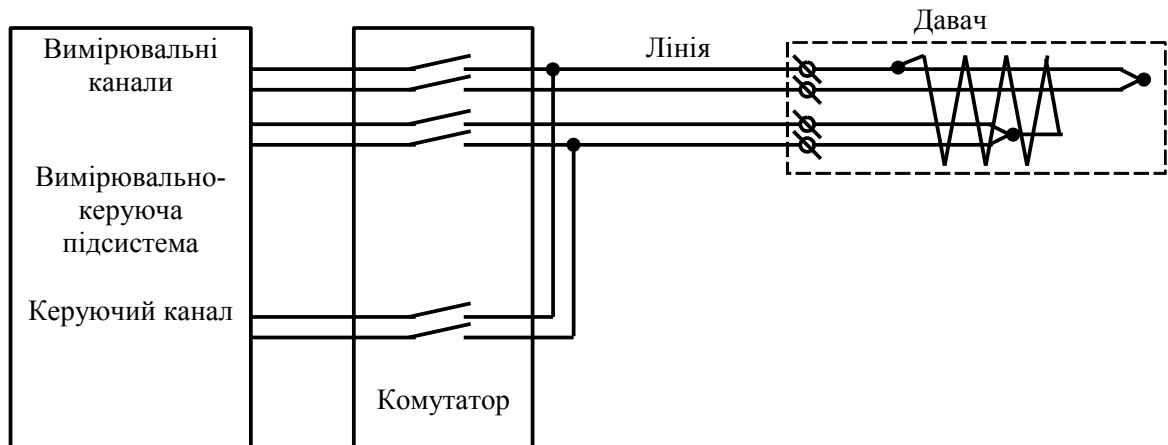


Рис. 4. Схема підключення запропонованого ТЕП із самодіагностикою

Висновки

Як видно із представлених конструктивних схем, запропонований ТЕП із самодіагностикою має нескладну конструкцію, використовує більшість деталей та конструктивних вузлів існуючих ТЕП, але забезпечує реалізацію запропонованого методу самодіагностики. Цей метод не використовує взірцеві засоби, самодіагностика може бути проведена практично в довільний момент, єдиною умовою її проведення є сталість температури об'єкта вимірювання на час проведення самодіагностики (для термопар з діаметром електродів до 1,5 мм – 15 ... 20 хвилин). Тому цей метод може бути широко використаний для підвищення метрологічної надійності систем вимірювання та керування різноманітних термоагрегатів, особливо тих, які вимагають високої точності підтримання температурних режимів. Також запропонований метод самодіагностики доцільно використовувати у вимірювальних та керуючих системах, давачі яких працюють в складних, слабо вивчених умовах, при наявності агресивних речовин, які можуть відносно швидко змінити ФП ТЕП. В цих умовах запропонований метод самодіагностики може значно підвищити метрологічну надійність вимірювальних та керуючих систем.

З викладеного можна зробити висновок, що простота конструкції ТЕП із самодіагностикою отримана за рахунок ускладнення оброблення результатів самодіагностування. Визначення еквівалентного часу експлуатації вимагає вирішення наступних задач:

Побудови достатньо повної та точної математичної моделі похибки ТЕП, точніше термоелектродів термопар як функції дії впливаючих величин. Це вимагає виявлення результатів дослідження про залежність похибки термоелектродів від різних впливаючих величин (або проведення відповідних експериментальних досліджень) та їх об'єднання в спільну базу даних. Далі необхідно розробити методи узагальнення цих даних та побудови

математичних моделей, що відбивають залежності похибки термоелектродів від потрібних впливаючих величин (тих, що діють в даному місці експлуатації ТЕП).

Розроблення методів достатньо точного опису зміни профілю температурного поля (див. рис. 1) за відомими потужністю нагрівача (або енергією, що поступила на нагрівач), отриманою від цього зміною температури в одній точці (ця зміна визначається термопарою 2), та конструкцією ТЕП (розмірами елементів, що входять в ТЕП і впливають на зміну профілю температурного поля, матеріалами, з яких ці елементи виготовлені та параметрами цих матеріалів).

Методики обчислення еквівалентного часу експлуатації ТЕП запропонованим методом на основі результатів виконання пп. 1, 2.

Оцінки похибки визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП запропонованим методом. Через відносно малу чутливість відомих ТЕП (від 8 до 70 мкВ/°С) точність визначення змін термо-е.р.с. ТЕП під дією впливаючих величин невисока, тому похибка визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП може бути досить велика. Можливо аналітичні обчислення змін профілю температурного поля при нагріві (при реалізації п. 2) не дозволять визначити ці зміни достатньо точно (щоби отримати прийнятну похибку визначення еквівалентного часу експлуатації ТЕП), тоді необхідно розробити методику проведення відповідних експериментальних досліджень.

Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94 . - [Чинний від 1986-04-01] – К.: Держстандарт України, 1994. – (Національний стандарт України)

Fluke and Philips Catalog. 2006.

Термопреобразователи технических термоэлектрических термометров. Методы и средства поверки: ГОСТ 8.338 -78 ГСИ. - [Чинний від 1999-01-01.]. – Минск: ИПК Издательство стандартов 1998. – (Міждержавний стандарт)

Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрологическое обеспечение по отраслям»/ В.Ю. Мильченко. – Москва, - 1984. – 25 с.

Васильків Н.М. Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Н.М. Васильків . – Львів, 2011. – 20 с.

Alf Hundves, Henz G. Buschfort. Self calibrating temperature sensing probe and probe – indicator combination-United State Patent 3.499.340. 73-1, G01 -15/00.

Саченко А.А. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами / А.А. Саченко , В.Ю. Мильченко , Кочан В.В. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.

Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis.- Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S.- 498.

Пат. № 2262087, Российская федерация, МПК G01K 15/00. Способ бездемонтажной оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя / Шевченко А.И., Каржавин В.А., Каржавин А.В., Белевцев А.В. - заявл. 10 октября 2005 г.

Браилов Э.С. Определение погрешности измерения температуры встроенными термоэлектрическими термометрами / Э.С. Браилов, Ю.А. Скрипник, Г.В. Юрчик // Измерительная техника. - 1986.-N5.-С.20-22.

Столярчук В.П. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин / Столярчук В.П. – Львівю - 2012. – 20 с.

Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др. – Киев.:Наукова думка, 1972. – 223 с.

Рогельберг Н.А. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°С продолжительностью до 10000 ч. Том III. / Н.А. Рогельберг, Э.Н. Пигидина, Г.Н. Покровская и др. – Сб. Исследование сплавов для термопар. – Труды института Гипроцветметобработка. – Москва: Металлургия, 1969.

Su Jun. The Mechanism of the Occurrence of Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples and its Effect on the Result of Temperature Measurement / Su Jun, O. Kochan // Measurement Techniques. - 2015. - Volume 57. - Issue 10. – P. 1160-1166.

Заявка на патент № а201213269 Україна, G01k. Спосіб корекції похибки головної термопары на місці експлуатації та пристрій для його реалізації / Кочан О.В., Кочан Р.В. - Заявл. 21.11.2012.

Васильків Н.М. Дослідження похибки вимірювання температури від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар / Н.М. Васильків, О.В. Кочан, В.В. Кочан, А.О. Саченко. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2009. – №70. – С. 110–117.

Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 - 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.