

КОРЕКЦІЯ ПОХИБОК ДРЕЙФУ ТА НАБУТОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ У ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З КЕРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

© Кочан Орест, 2016

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери 28, 79013, Львів, Україна orestvk@gmail.com

Набута термоелектрична неоднорідність терморпар та її негативний вплив на похибку вимірювання температури термоелектричними перетворювачами відомі понад століття. Сучасні дослідники вважають її основним джерелом похибки вимірювання температури, а саме явище однозначно негативним. Однак останнім часом запропоновано ефективні методи боротьби з цією похибкою. Розроблено підхід, що дає змогу використати набуту термоелектричну неоднорідність терморпар для оцінювання метрологічних характеристик термоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: промислове вимірювання температури, терморпара, термоелектричний перетворювач, термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, похибка вимірювання температури, термоелектрична неоднорідність.

Приобретенная термоэлектрическая неоднородность терморпар и ее негативное влияние на погрешность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями известны больше столетия. Современные исследователи считают ее главным источником погрешности измерения температуры, а само явление однозначно негативным. Однако в последнее время предложены эффективные методы борьбы с этой погрешностью. В статье предложен подход, позволяющий использовать приобретённую термоэлектрическую неоднородность терморпар для оценки метрологических характеристик термоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: промышленное измерение температуры, терморпара, термоэлектрический преобразователь, термоэлектрический преобразователь с управляемым профилем температурного поля, погрешность измерения температуры, термоэлектрическая неоднородность.

Thermocouples are the most popular sensors of temperature used in measuring praxis for temperatures in the range 600–2500 °C, in spite of their drawbacks. The most important among them is their error, which is often too big for many cases in industry and science. The total error of thermocouples is much greater than that of their measurement channels.

The main errors proper for thermocouples are as follows:

- 1. Considerable initial deviation of their conversion characteristic (CC) from the nominal one. The likely deviation in CC for the most popular type of thermocouples (type K) may reach 5,5 °C at 600 °C and 8 °C at 1100 °C.*
- 2. Considerable drift of CC during operation at high temperatures, that is a change of CC in time. It may vary in the range of 0,5 °C to 10 °C for the mentioned above type K of thermocouples during 1000 hours at 600 °C or at 1100 °C respectively.*
- 3. Thermoelectric inhomogeneity of thermocouple legs acquired during operation at high temperatures. The error due to inhomogeneity may reach 10 °C when measuring 1100 °C during 1000 hours using type K thermocouples, or even more in some cases.*

The error due to acquired inhomogeneity stems from changes in thermocouple legs at high temperatures in time. These changes are caused by the effect of chemical and physical processes (such as oxidation, diffusion, recrystallization etc.) in legs. If a thermocouple is split into imaginative sections, each section operates at its own temperature. That is the reason why, during prolonged operation, CC of each section changes in time in accordance with its particular operating temperature. If the temperature field along the thermocouple legs changes, the temperatures of each section changes correspondingly. Therefore, the error of each section is not constant, so the total error of a thermocouple varies even when the temperatures of the measuring and the reference junctions remain constant. This is an appearance of the

error due to thermoelectric inhomogeneity when the developed emf depends on the distribution of temperature along thermocouple legs. Many researchers consider that it is the main reason of thermocouple error. Sometimes the high thermocouple error after extended use is thought to be inevitable and impossible to correct. However, recent studies have discovered new methods for decreasing the influence of the error due to acquired inhomogeneity on measurements of temperature using thermocouples.

There are three stages of understanding of the error due to inhomogeneity during the history of thermocouples. The first stage began in 1906, when the problem of the inhomogeneity in thermocouples was posted. Since then the problem has been studied by various researchers. In 1976 professor Kirenkov drawn conclusion that inhomogeneous thermocouples cannot be used in measuring praxis because of a big error which is impossible either to correct or compensate. No methods how to deal with the error due to acquired during operation inhomogeneity were suggested. This is the second stage of the problem – direct prohibition of use of inhomogeneous thermocouples. The third stage began in 1984, when some methods of correction for the error due to inhomogeneity were suggested. The first of them was thermocouple calibration in situ, or in a temperature field similar to that of operation. Also the method for computation of the thermocouple error in an operating conditions based on the thermocouple calibration in a laboratory was suggested in the same year. However, the most effective method for compensating the error due to inhomogeneity was suggested in 2006. The idea of the method is to stabilize a temperature field along a thermocouple using additional subsystems for temperature control. Implementation of the method requires a new sensor which was suggested in 2006 and was called the thermocouple with controlled profile of temperature field. This is the third stage of the problem. At this stage some effective methods to compensate the error due to inhomogeneity were suggested.

This paper suggest the next stage, that is the fourth one, which implies development of the method suggested in 2006 and the thermocouple with controlled profile of temperature field. The idea of the stage is to use thermoelectric inhomogeneity of thermocouples to assess the metrological properties of thermoelectric thermometers.

Key words: industrial temperature measurement, thermocouple, thermocouple with controlled profile of temperature field, thermoelectric thermometer, temperature measurement error, thermoelectric inhomogeneity,

Актуальність. Термоелектричні перетворювачі (ТЕП) на базі термопар (ТП) є найвідомішими і найпоширенішими первинними вимірювальними перетворювачами (давачами, сенсорами) температури (особливо для температур понад 500 °С) [1, 2], хоча вони мають істотні недоліки – малу чутливість, нелінійність функції перетворення (ФП), необхідність врахування температури вільних кінців. Але головним їхнім недоліком є порівняно великі похибки. Під час короткочасних вимірювань похибки ТП визначаються здебільшого початковими індивідуальними відхиленнями ФП від номінальної (для найпоширеніших ТЕП типу ХА – до 6,5 °С за температури 800 °С, [3]). Методи визначення та корекції цих похибок відомі [4, 5]. Вони забезпечують їх зменшення майже до рівня використаних зразкових засобів.

Під час тривалих вимірювань високих температур похибки ТП визначаються в основному деградаційними процесами в їхніх електродах. Ці процеси проявляються як [6]:

1) похибка від дрейфу (поступової зміни) ФП ТП під дією температури і часу експлуатації [2, 7]. Наприклад, для ТЕП типу ХА – до 8 °С за 1000 годин за температури експлуатації 800 °С [7];

2) похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації за високої температури термоелектричної неоднорідності електродів термопар.

Похибка від дрейфу ФП ТП звичніша, вона проявляє себе завжди, коли вимірювана температура (температура експлуатації ТП) перевищує поріг, за якого інтенсивність деградаційних процесів стає помітною. Методи визначення та корекції цієї похибки достатньо досліджені [8, 9]. У разі використання температурного калібратора [10, 11] або перевірки ТЕП на місці експлуатації за допомогою зразкового ТЕП [2] можна отримати похибку вимірювання температури, не більше за 1–1,5 °С [2, 10]. За результатами калібрування або перевірки здійснюють корекцію похибки від дрейфу ФП ТП. Для зменшення кількості перевірок доцільно побудувати індивідуальну математичну модель дрейфу ФП ТП [8, 9], зокрема, з використанням нейронних мереж. Останні методи високоефективні. Тому проблему корекції дрейфу ФП ТП можна вважати якоюсь мірою вирішеною.

Похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП проявляється як зміна термо-ЕРС, генерованої ТП, за зміни профілю температурного поля вздовж її електродів (за сталих температур робочого і вільних

кiнцiв ТП). Тобто ця похибка проявляється далеко не завжди. Отже, хоча згадували про цю похибку доволi давно [12], вона значно менш дослiджена i вважається найнебезпечнiшою [13]. Причиною похибки вiд набутої в процесi тривалої неоднорiдностi електродiв ТП є залежнiсть ступеня їх деградацiї вiд температури експлуатацiї [2, 7, 14, 15]. Тому дiлянки термоелектродiв, що розмiщенi в зонi градиєнта температурного поля експлуатацiї, деградують по-рiзному, тобто вiдхилення їх ФП вiд номiнальної залежать вiд температури, за якої вони експлуатуються. Згiдно з [16, 17], для ТЕП типу ХА при 1000 годин експлуатацiї за температури 800 °С в найгiршому випадку похибка вiд набутої неоднорiдностi досягає 11 °С, чим не можна нехтувати. Іншi джерела [18] наводять ще бiльшi максимальнi значення цiєї похибки.

Отже, зменшення впливу набутої термоелектричної неоднорiдностi ТП на результат вимiрювання температури є складною науково-технiчною проблемою само по собi. Крім того, без її вирiшення ефективнiсть методiв корекцiї похибки вiд дрейфу ФП ТП значно знижується. Для аналізу цiєї похибки розглянемо стадiї пiдходу до явища набутої термоелектричної неоднорiдностi ТП.

1. Чотири стадiї пiдходу до явища набутої термоелектричної неоднорiдностi термодар. Про те, що термоелектрична неоднорiднiсть електродiв є головним джерелом похибки пiд час вимiрювання температури за допомогою ТП, вiдомо давно [12]. Однак у той час основнi зусилля були спрямованi на створення методiв дослiдження, їх проведення та зменшення початкової неоднорiдностi, спричиненої недосконалiстю технологiї виготовлення електродiв ТП. Такий пiдхiд до явища набутої термоелектричної неоднорiдностi ТП можна позначити як першу стадiю розумiння проблеми.

Однак згодом виявили, що початкова термоелектрична неоднорiднiсть електродiв ТП є малою порiвняно iз набутою в процесi тривалої експлуатацiї пiд час вимiрювання високих температур. Для ТП типу ХА похибка вимiрювання температури вiд її впливу не перевищує 1–2 °С [19]. А набута термоелектрична неоднорiднiсть призводить до можливої значно бiльшої похибки вимiрювання температури – до 11 °С [16, 17] i навiть 30 °С [18]. Цей стан пiдходу до набутої термоелектричної неоднорiдностi ТП можна вважати другою стадiєю розумiння проблеми. Цю стадiю можна характеризувати деякою розгубленiстю – набуто термоелектричну неоднорiднiсть називають “схрипкою Пандори” [18], попереджають [13] про її

небезпеку (але не дають рекомендацiї, що у разi її прояву робити). У [20] навiть прямо заборонено проводити перевiрку ТЕП, якi побували у експлуатацiї. Згiдно з [20] така перевiрка (i використання її результатiв для корекцiї похибок ТП) веде лише до “уявного пiдвищення точностi”. Через набуто термоелектричну неоднорiднiсть результат перевiрки придатний лише для того профiлю температурного поля, у якому здiйснювалась перевiрка. Оскiльки профiль температурного поля експлуатацiї об’єкта не збiгається з профiлем температурного поля перевiрки, виникає додаткова похибка, яка у [20] визнана великою, але не оцiнена.

Зауважимо, що метод перевiрки ТЕП на мiсцi експлуатацiї [2], а також методи прогнозу та корекцiї дрейфу ФП ТП, розробленi в цей час [8, 9], стосувалися лише об’єктiв, профiль температурного поля яких залишається незмiнним. Тобто умов, коли похибка вiд набутої термоелектричної неоднорiдностi ТП не могла проявитись.

На змiну другiй стадiї розумiння проблеми термоелектричної неоднорiдностi електродiв ТП прийшла третя – у [21] запропоновано проводити перевiрку ТП у печi, що iмiтує профiль температурного поля експлуатацiї. Також у [21] запропоновано метод перерахунку похибки вiд набутої термоелектричної неоднорiдностi ТП з одного профiлю температурного поля у iнший профiль роздiленням ТП на виртуальнi дiлянки, в межах яких набута неоднорiднiсть ще не проявляється. Цей метод дав змогу оцiнити невиключену похибку, яка виникає у разi використання результатiв перевiрки ТЕП у разi його перевiрки у печi, що iмiтує профiль температурного поля експлуатацiї. Недолiком цих методiв є те, що вони основанi лише на результатах попередньої перевiрки групи однотипних ТП у аналогiчних умовах експлуатацiї. Тобто вони не враховують iндивiдуальнi особливостi деградацiї термоелектродiв ТП.

У [22] запропоновано пiдвищити точнiсть попередньо розглянутих методiв [21], урахувавши результати перiодичних перевiрок ТП. Однак пiд час перевiрки отримуємо сумарне вiдхилення прогнозованої змiни термо-ЕРС всiх виртуальних дiлянок ТП. А для корекцiї моделей похибок окремих дiлянок необхідно розподiлити це вiдхилення на всi дiлянки. Чотири емпиричнi критерiї такого розподiлу проаналiзовано у [23]. Однак достовiрнiсть цих критерiїв не доведена, а неправильний розподiл сумарної похибки мiж дiлянками може вести не до зменшення похибки корекцiї, а до її збiльшення.

Метод достовірного розподілу, отриманого під час перевірки сумарного відхилення термо-ЕРС ТП між його окремими ділянками, запропоновано у [16, 24]. Метод полягає у тому, що розподіл проводять так, щоби під час перевірки ТЕП у температурних полях різних профілів отримані під час перевірки сумарні відхилення термо-ЕРС ТП були мінімальними. Фактично під час перевірки імітується робота ТП у різних профілях температурного поля та відповідність математичних моделей похибки всіх ділянок таким умовам роботи. Можливі два випадки:

1) кількість профілів температурного поля перевірки дорівнює кількості всіх віртуальних ділянок ТП. Тоді можна скласти систему рівнянь, розв'язання якої дасть відповідні поправки для кожної ділянки;

2) кількість профілів температурного поля перевірки не перевищує 6–8, а визначення поправки для кожної ділянки проводить відповідно навчена нейронна мережа.

Цей метод дає добрі результати, якщо зміни профілю температурного поля експлуатації не змінюють характеру дрейфу ФП окремих ділянок ТП, тобто ці зміни є чіткими та нетривалими (наприклад, особливі режими експлуатації об'єкта вимірювання). Однак за плавних постійних змін профілю температурного поля (наприклад, добові зміни) ефективність методу значно знижується.

Ефективнішим є запропонований у [25] та досліджений у [26] метод компенсації дії змін профілю температурного поля експлуатації ТП стабілізацією цього профілю. У такому випадку похибка від термоелектричної неоднорідності електродів ТП (як початкова, так і набута в процесі тривалої експлуатації за високої температури) не може проявитись. У [27] досліджено спеціалізовану конструкцію ТЕП з керуванням профілем температурного поля (ТЕП з КПТП), запропоновану в [25]. Однак ця конструкція доволі складна. Тому в [28, 29] запропоновано спеціалізовану піч, яка стабілізує профіль температурного поля стандартного ТЕП.

Отже, третю стадію розуміння проблеми термоелектричної неоднорідності електродів ТП можна визначити як стадію конструктивну – запропоновано методи, що дають змогу більшою або меншою мірою знизити вплив набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП на результат вимірювання температури. Це дає змогу підвищити точність вимірювання температури неоднорідними ТП за рахунок переходу до їх індивідуальної ФП. На цій стадії набуто термоелектричну неоднорідність

електродів ТП теж вважають безумовно негативним явищем, але з цим явищем можна успішно боротися.

Як видно з викладеного, підхід до явища набутої термоелектричної неоднорідності ТП змінювався в процесі розвитку термоелектричної термометрії.

Метою статті є аналізування цих змін для створення можливості використання явища набутої в процесі тривалої експлуатації за високої температури термоелектричної неоднорідності електродів ТП для підвищення точності та метрологічної надійності вимірювання температури за допомогою ТЕП. Отже, необхідно перейти до четвертої стадії підходу – набуто термоелектричну неоднорідність ТП необхідно використати для оцінки метрологічних характеристик ТЕП.

2. Методологія використання набутої термоелектричної неоднорідності ТП. Основою для використання набутої термоелектричної неоднорідності ТП є її основна властивість – здатність змінювати генеровану ТП термо-ЕРС за зміни профілю температурного поля вздовж її термоелектродів. Таку зміну можна реалізувати, наприклад, за допомогою ТЕП з КПТП. Зазначимо, що в [25, 26] здійснюється не керування профілем температурного поля вздовж електродів головної ТП, а лише його стабілізація. Однак цілеспрямована зміна профілю цього температурного поля, тобто дійсне керування цим профілем, дає значно більші можливості. Необхідно пам'ятати, що похибки ТП від дрейфу ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності, згідно з [6], тісно пов'язані між собою (обидві похибки є наслідком того самого явища – деградації електродів ТП під час експлуатації). Зокрема, їх максимальні значення, згідно з [6], рівні. Саме виявлена у [6] взаємна залежність дрейфу ФП ТП у процесі тривалої експлуатації та її похибки від набутої термоелектричної неоднорідності дає змогу використати останню для оцінювання метрологічних характеристик ТП.

Розглянемо ТЕП з КПТП, розміщений у стінці об'єкта вимірювання (рис. 1, а). На рис. 1, а ТЕП з КПТП подано, згідно з [28, 29], як сукупність головки 1 та чохла 2 стандартного ТЕП, розміщеного по осі багатозонної печі 3 (яка саме створює заданий профіль температурного поля для розміщених у чохлі 2 електродів ТЕП з КПТП). Піч 3 кріпиться довільно у стінці об'єкта вимірювання 4.

Профіль температурного поля вздовж електродів ТЕП 2 спрощено подано знизу на рис. 1, б відповідно до розміщеного у стінці об'єкта вимірювання 4 ТЕП з

КПТП 1, 2. Як профіль А позначено профіль температурного поля самого об'єкта вимірювання 4. Як профіль В позначено профіль, який формує багатозонна піч 3 (тобто профіль температурного поля, заданий під час експлуатації ТЕП з КПТП1, 2). Як видно з рис. 1, б, профіль температурного поля ТП, розміщеної у чохлі 2, можна умовно розділити на три зони – зона вільних кінців, зона градієнта температурного поля та зона вимірюваної (високої) температури.

Розглянемо можливості підвищення точності вимірювання температури, які створює цілеспрямоване керування профілем температурного поля вздовж електродів ТП за допомогою печі 3.

За допомогою багатозонної печі 3 можна профіль температурного поля В вздовж електродів ТП, розміщеної у чохлі 2, спрямувати до профілю поля А (вимкнути піч 3). У зону градієнта температурного поля електродів ТП, що формують, згідно з рис. 1, генеровану ТП термо-ЕРС, потраплять ділянки термоелектродів, які експлуатуються (постійно перебувають) за вищих температур. Оскільки швидкість перебігу деградаційних процесів у термоелектродах приблизно пропорційна до температури, зміна ФП ТП

у профілі температурного поля А повинна зрости порівняно із постійним дрейфом ФП ТП, що відповідає профілю температурного поля В. Однак такий варіант зміни профілю температурного поля мало що дає. Профіль температурного поля А (тобто профіль температурного поля об'єкта вимірювання) нестабільний, тому зміна генерованої термо-ЕРС не прогнозована. В такому випадку похибка від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП повністю проявлятиметься.

Також можна, за допомогою багатозонної печі 3, профіль температурного поля В вздовж електродів ТП, розміщеної у чохлі 2, спрямувати до профілю поля С. У зону градієнта температурного поля електродів ТП, що формують, згідно з рис. 1, генеровану ТП термо-ЕРС, потраплять ділянки термоелектродів, які експлуатуються (постійно перебувають) за нижчих температур. Оскільки швидкість перебігу деградаційних процесів у термоелектродах приблизно пропорційна до температури, зміна ФП ТП у профілі температурного поля С повинна зменшитися порівняно із постійним дрейфом ФП ТП, що відповідає профілю температурного поля В. Це явище можна використати для зменшення дрейфу ФП ТП без заміни ТП.

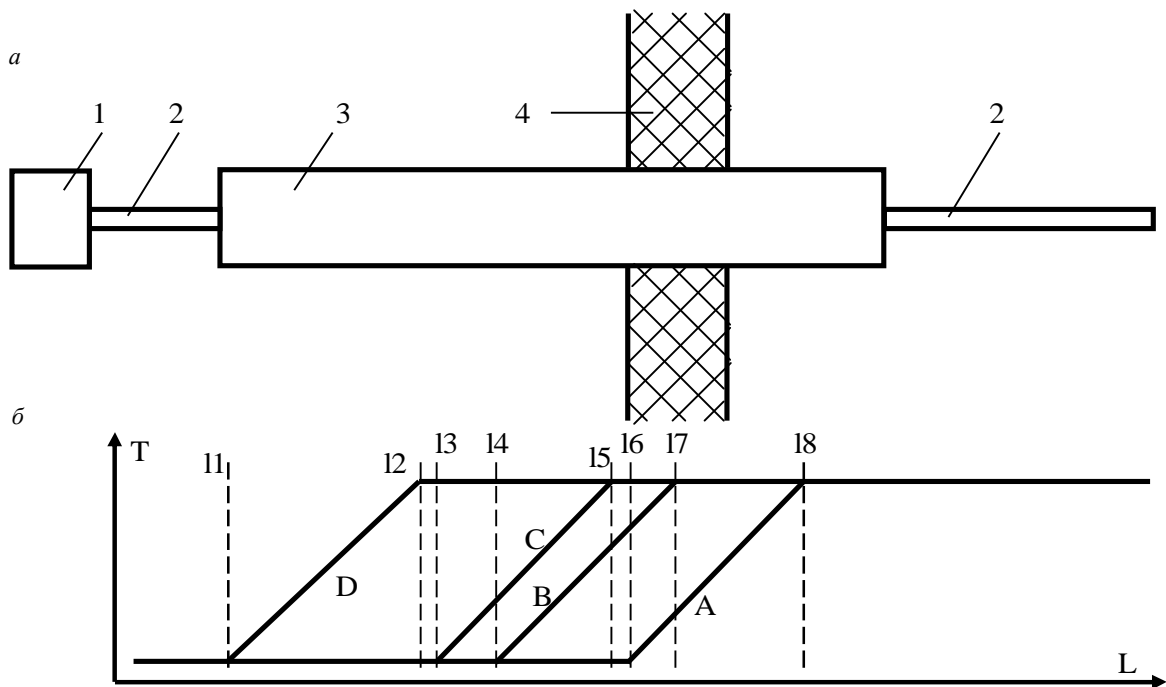


Рис. 1. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, розміщений у стінці печі (а); розподіл температури (б)

Fig. 1. The thermocouple with controlled temperature field mounted in a furnace wall (a); temperature distribution (b)

Одночасно, за результатами вимірювання термо-ЕРС ТП у різних профілях температурного поля, можна оцінити ступінь деградації електродів ТП. Це, за наявності відповідних математичних моделей, дасть змогу робити висновки про можливі похибки ТП у різних умовах експлуатації. Для цього треба встановити комплексний показник, який би характеризував саме ступінь деградації електродів ТП.

Якщо за допомогою багатозонної печі з профіль температурного поля В вздовж електродів ТП, розміщеної у чохлах 2, спрямувати до профілю поля D, то у зону градієнта потраплять ділянки, що постійно перебувають за температури вільних кінців, тобто не дрейфують (не змінюють свою ФП через практичну відсутність деградаційних процесів). Отже, ТП у профілі температурного поля D відновлює свою ФП – вона ніби не експлуатувалася. Це явище теж доцільно використати, зокрема, для визначення дрейфу ФП ТП.

Як видно з проведеного аналізу, активний вплив на профіль температурного поля вздовж електродів ТП (керування профілем температурного поля) дає змогу створити методи оцінювання стану електродів ТП та підвищення його точності. Розглянемо детальніше деякі із цих методів.

3. Методи підвищення точності та достовірності результатів вимірювання температури. Найпростішим очевидним методом підвищення точності вимірювання є поступове “оновлення” термоелектродів ТП поступовим зміщенням (зсувом) стабілізованого профілю температурного поля у бік вільних кінців. Тобто після деякого часу експлуатації ТЕП профіль температурного поля В, який формує піч 3, пересувається у профіль С. Як вже було сказано, тоді основну термо-ЕРС генеруватимуть ті ділянки ТП, які експлуатувалися за нижчих температур і у яких менший ступінь деградації, тобто менший дрейф ФП. До “оновлення” термоелектродів термо-ЕРС $E_{PROF_B}^{TC}$ ТП у профілі температурного поля В можна визначити як [1]

$$E_{PROF_B}^{TC} = \int_{I_1}^{I_4} e_{PROF_B}^{TC} dt + \int_{I_4}^{I_7} e_{PROF_B}^{TC} dt + \int_{I_7}^{I_8} e_{PROF_B}^{TC} dt, \quad (1)$$

де $e_{PROF_B}^{TC}$ – питома термо-ЕРС ТП у профілі температурного поля типу В; $I_1..I_8$ – координати профілю температурного поля (див. рис. 1, б).

Через те, що $T_{I_1} = T_{I_4}$, ділянки $I_1..I_4$ не генерують термо-ЕРС, тобто $\int_{I_1}^{I_4} e_{PROF_B}^{TC} dt \rightarrow 0$. Аналогічно

$T_{I_7} = T_{I_8}$, тому $\int_{I_7}^{I_8} e_{PROF_B}^{TC} dt \rightarrow 0$. Отже, (1) можна спростити

$$E_{PROF_B}^{TC} = \int_{I_4}^{I_7} e_{PROF_B}^{TC} dt. \quad (2)$$

Аналогічно можна визначити термо-ЕРС $E_{PROF_C}^{TC}$ ТП для профілю температурного поля С (тобто після “оновлення” ТП)

$$E_{PROF_C}^{TC} = \int_{I_3}^{I_5} e_{PROF_C}^{TC} dt. \quad (3)$$

Оскільки інтенсивність деградаційних процесів у електродах ТП приблизно пропорційна до температури [2, 7], зміна питомої термо-ЕРС $\Delta e_{PROF_B}^{TC}$ ділянок електродів ТП, що розміщені (експлуатуються) у профілі поля В, буде більшою за зміну питомих термо-ЕРС $\Delta e_{PROF_C}^{TC}$ ділянок електродів ТП, що розташовані (експлуатуються) у профілі поля С. Тому для профілів температурного поля В і С похибки ТП можна порівняти як $\Delta E_{PROF_B}^{TC} > \Delta E_{PROF_C}^{TC}$. Тобто у разі пересування зони градієнта вліво (див. рис. 1, б), похибка дрейфу ФП ТП буде зменшуватися. Похибка від набутої термоелектричної неоднорідності ТП як не могла проявитись під час стабілізації профілю температурного поля В, так і не зможе проявитись під час стабілізації профілю температурного поля С.

Однак через те, що $\Delta E_{PROF_B}^{TC} > \Delta E_{PROF_C}^{TC}$, похибка ТП після зміни профілю температурного поля зміниться. Тому треба заново визначити похибку ТП. Для цього можна використати один з відомих методів – перевірку в лабораторних умовах (адже профіль температурного поля головної ТП стабілізовано, він не залежить від профілю температурного поля печі, у якій проводиться перевірка) або на місці експлуатації за допомогою еталонного термоелектричного перетворювача [2] чи температурного репера [10].

Отже, описаний метод “оновлення” термоелектродів ТП дає можливість зменшити значення похибки від дрейфу ФП ТП. Ступінь зменшення залежить від ступеня пересування профілю температурного поля. Якщо у зону градієнта потраплять ділянки термоелектродів ТП, які під час експлуатації не перебували за високої температури (ділянки $I_1..I_4$), то ФП ТП відновиться повністю, адже $\int_{I_1}^{I_4} e_{PROF_B}^{TC} dt \rightarrow 0$ навіть за довільної температури експлуатації робочого

кінця. Це явище можна використати для визначення похибки ТП. Якщо за час пересування профілю температурного поля від В до D температура робочого кінця не зміниться, тобто $T^{RK} = const$, то можна записати

$$\Delta E_{DR} = \Delta E_{PROF_B}^{TC} - \Delta E_{PROF_D}^{TC}, \quad (4)$$

де ΔE_{DR} – значення дрейфу ФП ТП на момент переміщення профілю температурного поля від В до D.

Однак зазначимо, що ділянки 11...14 електродів ТП мають похибку, яка визначається початковим (до експлуатації) відхиленням їх ФП від номінальної. Для врахування цієї похибки необхідно під час випуску з виробництва здійснити первинну метрологічну перевірку ТП у профілі температурного поля D [30, 31]. У такому випадку ми знатимемо похибку $\Delta E_{PROF_D}^{PERV}$ первинної перевірки (її треба записати у паспорт ТП) і можемо здійснити корекцію поточної похибки ТП за результатами поточної перевірки у профілі температурного поля D за формулою

$$E_{SKOR}^{TC} = E_{POT}^{TC} - (\Delta E_{PROF_D}^{PERV} + \Delta E_{DR}), \quad (5)$$

де E_{POT}^{TC} – поточне значення вимірної термо-ЕРС ТП після повернення до профілю температурного поля В; E_{SKOR}^{TC} – скориговане поточне значення вимірної термо-ЕРС ТП.

Отже, можливість переміщення профілю температурного поля вздовж електродів ТП уможливило визначення її поточної похибки в процесі експлуатації, без демонтажу ТП і без використання зразкових засобів у робочих умовах. У такому випадку описане раніше “оновлення” термоелектродів ТП поступовим переміщенням профілю температурного поля у бік вільних кінців, здається, не має сенсу. Однак оброблення результатів такого переміщення дає змогу оцінити ступінь деградації електродів ТП у процесі експлуатації, також без демонтажу ТП і без використання зразкових засобів у робочих умовах. Як вже було сказано, для такої оцінки насамперед потрібно встановити комплексний показник, який би характеризував саме ступінь деградації електродів ТП, тобто ввести міру деградації електродів ТП.

Головними величинами, що впливають на ФП ТП в нормальних умовах експлуатації (коли не діють домішки, що різко пришвидшують деградацію електродів), є час та висока температура. Модель похибки вимірювання температури ТП, електроди якої деградували, повинна пов’язувати значення цієї

похибки та згаданих головних впливних величин. Її можна записати як

$$\Delta E^{TC} = \sum_{i=1}^n \Delta e_i = \sum_{i=1}^n f_i(T_i^{EXP}, \tau_i^{EXP}, T_i^{DIAP}), \quad (6)$$

де ΔE^{TC} – поточне значення похибки ТП; $i = \overline{1, n}$ – номер віртуальної ділянки, на які розділена ТП; Δe_i – поточне значення питомої зміни термоелектричної здатності i -х ділянок обох електродів ТП; $f_i(\bullet)$ – функції, що описують поточний дрейф ФП ТП для i -х ділянок обох електродів ТП; T_i^{EXP} – температура постійної експлуатації i -х ділянок обох електродів ТП; τ_i^{EXP} – тривалість постійної експлуатації i -х ділянок обох електродів ТП; T_i^{DIAP} – температура, у яку потрапили i -ті ділянки обох електродів ТП у результаті зміни профілю температурного поля.

Модель (6) пов’язує три змінні, які здебільшого визначають похибку вимірювання температури у разі експлуатації на певному місці (у середовищі). Однак ці змінні не “рівноцінні” з погляду встановлення міри деградації електродів ТП. Адже T_i^{EXP} може не змінюватися під час тривалої експлуатації, а T_i^{DIAP} характеризує лише конкретну зміну профілю температурного поля (яка може і не настати). А час експлуатації змінюється (наростає) постійно, аналогічно до деградаційних процесів у термоелектродах. Тому лише τ_i^{EXP} може характеризувати міру деградації електродів ТП.

У [32, 33] запропоновано використати для характеристики ступеня деградації електродів ТП еквівалентний час її експлуатації. Він повинен вказувати місце електродів цього ТП у математичній моделі похибки ТП (наприклад, виду (6)), яка відповідає заданим умовам експлуатації. Але очевидно, що еквівалентний час експлуатації тільки у ідеальному випадку збігатиметься для усіх віртуальних ділянок. У такому випадку справді можна говорити про значення еквівалентного часу експлуатації ТП загалом. Але для реальної ТП еквівалентний час експлуатації τ_{TC}^{EXP} можна визначити агрегацією (об’єднанням) значень еквівалентного часу τ_i^{EXP} окремих віртуальних ділянок. Для цього спочатку виміряємо термо-ЕРС ТП ΔE_i^{TC} , коли профіль температурного поля поступово посувається вліво (див. рис. 1, б), тобто від профілю В до профілю D. За результатами вимірювань складемо систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta E_1^{TC} = \sum_{i=1}^n f_1(T_1^{EXP}, \tau_1^{EXP}, T_1^{DIAP}) \\ \dots\dots\dots \\ \Delta E_j^{TC} = \sum_{i=1}^n f_i(T_i^{EXP}, \tau_i^{EXP}, T_i^{DIAP}), \\ \dots\dots\dots \\ \Delta E_k^{TC} = \sum_{i=1}^n f_n(T_n^{EXP}, \tau_n^{EXP}, T_n^{DIAP}) \end{array} \right. \quad (7)$$

де $j = \overline{1, k}$ – кількість профілів температурного поля, у яких вимірювалися зміни термо-ЕРС ТП, спричинені заданими змінами профілю температурного поля.

Якщо у системі (7) $k = n$, маємо систему рівнянь, що має однозначний розв'язок – кількість невідомих τ_i^{EXP} дорівнює кількості рівнянь. Але значення еквівалентного часу експлуатації τ_i^{EXP} кожної ділянки характеризуватиме міру деградації лише цієї, i -ї ділянки електрода ТП. Як вже було сказано, тільки у ідеальному випадку еквівалентні часи експлуатації для всіх віртуальних ділянок збігатимуться. Але і різниці між τ_i^{EXP} зазвичай будуть невеликі. Якщо використана для визначення функцій $f_i(\bullet)$ модель дрейфу ФП ТП адекватно описує дрейф ТП у цих умовах експлуатації, то різниці між τ_i^{EXP} характеризуватимуть лише індивідуальні відхилення дрейфу ФП ТП для віртуальних ділянок. Тоді як еквівалентний час експлуатації ТП загалом τ_{TC}^{EXP} можна використати середнє або максимальне значення τ_i^{EXP} . Зауважимо, що τ_{TC}^{EXP} слугує лише для оцінювання ступеня деградації електродів ТП, можливих похибок під час її подальшої експлуатації та прийняття рішення про необхідність її заміни. Тому висока точність визначення τ_{TC}^{EXP} не є необхідною.

Великі розходження (понад 20 %) між отриманими в результаті розв'язання системи рівнянь (7) значеннями τ_i^{EXP} свідчать про слабку адекватність моделі дрейфу ФП ТП, за допомогою якої визначено функції $f_i(\bullet)$, дійсним умовам експлуатації ТП. У такому випадку треба переглянути моделі дрейфу ФП ТП. Для цього можна використати визначення поточної похибки ТП у процесі експлуатації за допомогою розглянутого раніше методу. До перегляду моделі дрейфу ФП ТП результатами оцінки τ_{TC}^{EXP} треба користуватися обережно, за τ_{TC}^{EXP} краще приймати максимальне значення серед τ_i^{EXP} .

Зазначимо, що ТЕП з КПТП дає змогу доволі плавно поступово посувати профіль температурного поля вліво (від профілю В до профілю D згідно з рис. 1, б). Тобто можна забезпечити доволі велику кількість рівнянь у системі (7) за рахунок $k > n$. Тоді розв'язувати систему рівнянь (7) необхідно за допомогою методу найменших квадратів. Але це, швидше за все, не приведе до суттєвого підвищення точності визначення τ_{TC}^{EXP} . Як показали результати імітаційного моделювання, значно більше впливають на розкид значень τ_i^{EXP} похибки моделей дрейфу ФП ТП та індивідуальні відхилення дрейфу ФП окремих віртуальних ділянок, на які розділена ТП.

4. Узагальнена структурна схема вимірювальної системи, що передбачає використання пропонованих методів. Реалізація пропонованих методів у традиційних вимірювально-керуючих системах нашоветується на деякі труднощі, зокрема, спричинені доволі істотним часом визначення похибки ТП або діагностуванням її термоелектродів. Як було показано у [34], за рахунок збільшення потужності нагрівачів ТЕП з КПТП можна зменшити час нагрівання у разі пересування профілю температурного поля вліво (див рис. 1, б). Однак час охолодження після повернення до початкового профілю температурного поля залишається великим (година і більше). Упродовж цього часу ТЕП з КПТП з погляду вимірювання температури об'єкта та її регулювання залишається непрацездатним. Тому пропонується використати двоконтурну структуру системи, у якій перший контур призначений для вимірювання температури об'єкта та її регулювання, а другий – для коригування похибок ТП, що входить у перший контур.

Узагальнену структурну схему такої системи подано на рис. 2. В неї входять традиційний контур регулювання температури зі стандартним ТЕП 1, його вимірювальний канал ВК 2, блок задання значення регульованої температури Зад. 2, канал регулятора РК 2 та нагрівач. Особливістю цього контура є блок корекції похибки ТЕП 1. Корекція здійснюється за рахунок додаткового вимірювального каналу, в який входять ТЕП з КПТП, його вимірювальний канал ВК 1, блок задання профілю температурного поля ТЕП з КПТП Зад. 1, багатоканального регулятора РК 1 та нагрівачів, що входять до складу печі, яка формує профіль температурного поля головної ТП ТЕП з КПТП (на рис. 2 не показано). Особливістю додаткового вимірювального каналу є наявність блока *Похибка*, призначеного для визначення

1. Вимірювання температури: теорія та практика / Луцук Я. Т., Гук О. П., Лах О. І, Стадник Б. І. – Львів: Бескид Біт, 2006. – 560 с. 2. Kortvelyessy L. *Thermoelement Praxis* / Kortvelyessy L. – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. – S. 498. 3. IEC 60584-2-am1 (1989-06) *Amendment 1 – Thermocouples. Part 2: Tolerances Maintenance Result Date: 2012*. 4. Саченко А. А. Совершенствование методов измерения температуры / А. А. Саченко, Е. Я. Твердый. – К.: Техніка, 1983. – 104 с. 5. Brignell J. *Digital compensation of sensors* / E. J. Brignell // *Scientific Instruments*. – 1987. – 20. No. 9. – P. 1097–1102. 6. Кочан О. В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар / О. В. Кочан, Р. В. Кочан, В. Я. Яскілка, Н. М. Васильків // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. – 2007. – № 1. – С. 122–129. 7. Рогельберг Н. А. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800 °С продолжительностью до 10000 ч. Т. III / Рогельберг Н. А., Пигидина Э. Н., Покровская Г. Н. и др. // *Исследование сплавов для термопар* / Труды института Гипроцветметобработка. – М.: Металлургия, 1969. 8. Саченко А. А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий: дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.16 / Саченко Анатолий Алексеевич. – Ленинград, 1988. – 278 с. 9. Kochan V. *Instrumentation for Data Gathering* / V. Kochan, A. Sachenko, V. Turchenko // *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. – 2003. – Vol. 6. – No. 3. – P. 34–40. 10. Саченко А. А. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами / А. А. Саченко, В. Ю. Мильченко, В. В. Кочан. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. 11. Rudtsch S. *Stray Thermal Influences in Zinc Fixed-Point Cells* / S. Rudtsch, A. Aulich, C. Monte // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8, AIP Conf. Proc.* – 2013. – No. 1552. – С. 265–270. 12. White W. P. *The constancy of thermoelements* / W. P. White // *Physical review*. – 1906. – No. 23. – С. 449–474. 13. Southworth D. J. *Temperature Calibration with Isotech Block Baths* / D. J. Southworth–*Handbook of Isothermal Corporation Limited*, 1999. 14. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г. В. Самсонов, А. И. Куц, О. А. Кюздени и др. – К.: Наукова думка, 1972. – 223 с. 15. Yang Q. *Investigation of Thermocouple's Drift Speed Influence on Error of their Heterogeneity Correction* / Q. Yang, R. Kochan // *Sensors and Transducers*. – 2013. – No. 160. – С. 514–521. 16. Васильків Н. М. Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.04 “Прилади та методи вимірювання теплових величин” / Н. М. Васильків – Львів, 2010. – 158 с. 17. Su J. *The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement* / J. Su, O. Kochan // *Measurement techniques*. – 2014. – No. 57. – С. 1160–1166. 18. Sloneker K. C. *Thermocouple inhomogeneity* / K. C. Sloneker // *Ceramic industry*. – Vol. 159. – Issue 4. – April 2009. P. 1318. 19. Бейлин В. М. Влияние термоэлектрической неоднородности на градуировочную характеристику термопар / В. М. Бейлин // *Исследование сплавов для термопар*. – М.: Металлургия, 1976. – С. 87–95. 20. Киренков И. И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности / И. И. Киренков // *Исследование в области температурных измерений: сб. трудов*. – М.: ВНИИМ. – 1976. – С. 11–15. 21. Мильченко В. Ю. *Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из благородных металлов: автореф. дис. ...канд. техн. наук : спец. 05.11.15 “Метрологическое обеспечение по отраслям”* / В. Ю. Мильченко. – М., 1984. – 25 с. 22. Чирка М. І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.04 “Прилади та методи вимірювання теплових величин” / М. І. Чирка. – Львів, 1997. – 20 с. 23. Чирка М. І. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів / М. І. Чирка, Н. М. Васильків, Р. В. Кочан. // *Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання*. – 1999. – № 6. – С. 37–42. 24. Su Jun, Kochan O. V., Vasylkiv N. M., Kochan R. V. *A method of correcting the error of temperature measurements due to acquired inhomogeneity of the electrodes of thermocouples* // *Measurement Techniques, November*. – 2015. – Vol. 58. – No. 8. 25. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О. В., Кочан Р. В. – заявл. 22.02.2007. 26. Кочан О. В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин / О. В. Кочан. – Львів, 2011. – 20 с. 27. Kochan O. *Temperature Measurement System Based on Thermocouple With Controlled Temperature Field* / O. Kochan, R. Kochan, O. Wojko, M. Chyrka // *Proc. of the IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007)*. – Dortmund, Germany. – September 6–8, 2007. – P. 47–51. 28. Пат. № 105700 Україна, МПК G01K 15/00. Піч з керованим профілем температурного поля / Кочан О. В., Кочан Р. В., Кочан В. В. – заявл. 16.11.2012. 29. Su Jun, Kochan O., Kochan V., Chunzhi Wang. *Development and Investigation of the Method for Compensating Thermoelectric Inhomogeneity Error* // *International journal of thermophysics*. – 2016. – Vol. 37. – Issue 1. – P. 15–21. 30. Пат. № 102981 Україна, МПК G01K 15/00. Спосіб корекції похибки головної термопару / Кочан О. В., Кочан Р. В. – заявл. 21.11.2012.

31. Chang Shu, O. Kochan. Method of thermocouples self verification on operation place // *Sensors & Transducers journal*. – Vol. 160. – Issue 12. – P. 55–61. 32. Пат. № 104952 Україна, МПК G01K 15/00. Спосіб самодіагностики термодар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації / О. В. Кочан. – заявл. 21.11.2012. 33. Su Jun, Kochan O., Kochan R. Thermocouples with Built-

In Self-testing. *International journal of thermophysicis*. – 2016. – Vol. 37. – Issue 4. – P. 1–14. 34. Кочан О. В. Оцінка тривалості самоперевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Серія приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 70–80.

УДК 620.179.14.05

НАКЛАДНИЙ ІНДУКТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОМЕТРІЇ

© Дейнека Ростислав, 2016

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра приладів точної механіки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Сутність електромагнітних методів неруйнівного контролю ферромагнетиків полягає у виявленні магнітного поля, що виступає над внутрішніми і підповерхневими дефектами. Для виявлення такого локального поля запропоновано новий варіант накладного датчика у вигляді індуктивного елемента на тороїдальному осерді з додатковими магнітопроводами. Цей датчик має просту конструкцію, його висока чутливість підтверджена експериментально. Такий датчик може використовуватись для контролю зварних з'єднань запропонованим методом, що ґрунтується на вимірюванні магнітного опору ділянки зварювання.

Ключові слова: неруйнівний контроль, внутрішні дефекти, накладний датчик, магнітний опір.

Суцність електромагнітних методів неінеруївного контролю ферромагнетиків состоїть в виявленні магнітного поля, виступаючого над внутрішніми і підповерхневими дефектами. Для виявлення локального магнітного поля запропоновано новий варіант накладного датчика в формі індуктивного елемента на тороїдальному осерді з додатковими магнітопроводами. Цей датчик має просту конструкцію і високу чутливість, підтвержену експериментально. Такий датчик може використовуватись для контролю зварних з'єднань запропонованим методом, заснованим на вимірюванні магнітного опору ділянки зварювання.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, внутренние дефекты, накладной датчик, магнитное сопротивление.

The essence of electromagnetic methods of nondestructive ferromagnets testing consists in identifying the lines of ledge of the external magnetization constant magnetic field that is scattered on interior and subsurface defects. Existing electromagnetic methods differ only by ways of local magnetic inhomogeneity detections.

For detecting the local magnetic field the new variant of the plated sensor for nondestructive testing of ferromagnetic materials in the form of an inductive element on a toroidal core with magnetoconductive elements was proposed. The sinusoidal audio frequency voltage from the generator with amplitude at which the core material begins to enter into the saturation stage is supplied in winding. The magnetic field of an internal defect straying through internal lining magnetoconductive linings sub magnetizes the ferrite core, and is summed up with the field from the generator, that is leading to saturation of the core coil, losses the inductance and increase current in the coil. To measure the saturation current series with the winding turns on the low resistor, which voltage is measured, and it determines the size of the defect. Inductive sensor has a simple design and high sensitivity (output voltage increase more than 5 times), confirming by the experimental investigation of its model.

The proposed sensor is insensitive to the presence of extraneous ferromagnetic objects, and only responds to a magnetic field and can be used for monitoring welds of steel elements by measuring the magnetic resistance of some consecutive areas of the consistent weld in the transverse direction. The magnetic resistance value of the weld at most depends on the presence of cracks, cavities, pores and other non-magnetic inclusions having negatively affect on the strength of the connection.