

УДК 536.532

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.129>

В. В. КОЧАН

ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНОСТІ ТЕРМОПАР НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Предметом дослідження у статті є високоточні вимірювання температури термопарами, електроди яких деградували через тривалу дію високої температури при експлуатації. Швидкість деградації приблизно пропорційна температурі сталі експлуатації ділянок електродів термопар та часу експлуатації. Деградація є причиною двох видів похибки – від дрейфу функції перетворення (її поступової зміни протягом часу експлуатації) та від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар (проявляє себе як зміна функції перетворення термопар при зміні профілю температурного поля навіть при сталих температурах робочого та вільних кінців). **Метою** статті є дослідження методу підвищення точності вимірювання температури термопарами, що мають значну, набуту у процесі експлуатації, термоелектричну неоднорідність. Мета досягається шляхом стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів термопар, тоді похибка від їх набутої термоелектричної неоднорідності не може себе проявити. **Завдання:** оцінка похибок вимірювання температури за допомогою термопар, розроблення методу підвищення точності вимірювання температури неоднорідними термопарами, засобу стабілізації профілю температурного поля, методів керування профілем температурного поля та експериментальні дослідження пропонувані методів керування. Використовуються загальновідомі **методи:** конструювання обладнання із заданими параметрами та обмеженнями, обчислення шляхом рішення системи лінійних рівнянь, формування необхідної функціональної залежності за допомогою нейронної мережі, експериментальні дослідження. Отримано такі **результати.** Стабілізація профілю температурного поля дає змогу зменшити вплив набутої термоелектричної неоднорідності термопар, яка за даними літератури, може сягати 11°C, до рівня 1,3°C. Показано, що розроблений засіб стабілізації профілю температурного поля – багатозонна трубчаста піч – через тісний тепловий зв'язок між зонами, вимагає багатоканального регулятора, не схильного до самозбудження. Запропоновано два методи керування профілем температурного поля – на основі рішення системи лінійних рівнянь та нейромережевий метод, у якому нейронна мережа навчається безпосередньо на багатозонній печі. **Висновки.** Як показали проведені експериментальні дослідження, пропонувані методи не дають змоги похибки від набутої термоелектричної неоднорідності термопар проявити себе, що забезпечує можливість підвищення точності та метрологічної надійності вимірювання температури існуючими типами термопар.

Ключові слова: термопара; похибка; термоелектрична неоднорідність термопар; багатозонний об'єкт; керування температурою.

Вступ

Розвиток промисловості у рамках концепції четвертої промислової революції [1] вимагає вдосконалення технологічних процесів та обладнання для їх проведення. Одною з ключових ланок у цьому грає вдосконалення вимірювального обладнання. А вже давно у вимірювальних каналах промислових вимірювальних систем домінує похибка сенсорів [2]. Прикладом можуть бути прилади і системи вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів (ТЕП), чутливими елементами яких є термопари (ТП) [3]. Успіхи мікроелектроніки за останні десятиліття дали змогу підвищити точність вимірювання термо-е.р.с. у десятки разів, а похибки ТП за цей час не змінилися [4]. Це підтверджує випуск Європейською асоціацією національних метрологічних інститутів ЄВРАМЕТ спеціальних дорожніх карт [5, 6], де підкреслено необхідність підвищення єдності температурних вимірювань шляхом створення ТП, які мають вищу точність і метрологічну надійність.

Похибки вимірювання температури за допомогою термопар

При вимірюванні температур вище 600°C ТП все ще залишаються найбільш поширеними сенсорами, хоча вони мають ряд недоліків, зокрема, надто велику для багатьох технологічних процесів похибку [7].

Вона в десятки разів перевищує похибку кращих вимірювальних каналів [8 – 10]. Основними похибками ТП є:

- значні початкові відхилення функції перетворення (ФП) ТП від номінальної – для поширених ТП типу ХА (К) до 5,5°C при 600°C та 8°C при 1100°C [4];
- значний дрейф ФП при тривалій експлуатації при високих температурах (зміна ФП ТП в часі експлуатації) – для ТП типу ХА (К) при часі експлуатації 1000 годин досягає 0,5°C при 600°C та 10°C при 1100°C [11];
- похибка від набутої при тривалій експлуатації при високих температурах термоелектричної неоднорідності електродів [12 – 16] – для ТП типу ХА (К) при часі експлуатації 1000 годин досягає 11°C при 800°C [14].

Методи зменшення похибок ТП першого [17] і другого [18] виду розроблені доволі давно. У [19] похибку від набутої термоелектричної неоднорідності вважають найбільш небезпечною. Причиною її виникнення є залежність швидкості деградації електродів ТП від температури експлуатації. При тривалій експлуатації внаслідок деградації кожна ділянка електродів ТП отримує індивідуальну ФП. При зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП змінюється температура перебування їх ділянок. Відповідно змінюється похибка кожної ділянки. Тому змінюється термо-е.р.с. ТП в цілому, незважаючи на те, що температури робочого та вільних кінців залишаються постійними. А у [20]

зроблено висновок, що похибку ТП, які побували в експлуатації, взагалі не можна коригувати.

Але останнім часом появились технічні рішення, що дають змогу зменшити вплив похибки від неоднорідності ТП на результат вимірювання. Метою даної статті є детальний розгляд найбільш ефективного із цих методів [12].

Метод підвищення точності вимірювання температури неоднорідними термопарами

Як було сказано, похибка від набутої неоднорідності проявляє себе при зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП. Основна ідея методу [12] полягає в наступному. Якщо не допустити змін цього профілю (стабілізувати його), то похибка від набутої неоднорідності не зможе себе

проявити. Не допустити змін профілю можна шляхом створення для електродів ТП їх власного профілю температурного поля за допомогою додаткових систем регулювання температури. Нагрівачі та сенсори цих систем повинні бути зміщені по осі електродів ТП.

Конструктивна схема пропонованого ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) подана на рис. 1 [12, 21]. Головна термопара ГТС вимірює температуру об'єкта. Вздовж її електродів розміщені зони керування профілем температурного поля. Вони складаються з нагрівачів $H_1 \dots H_n$ та відповідних їм сенсорів температури $ТП_1 \dots ТП_n$. Вільні кінці всіх ТП підключені до вимірювально-керуючої системи (на рис. 1 не показана).

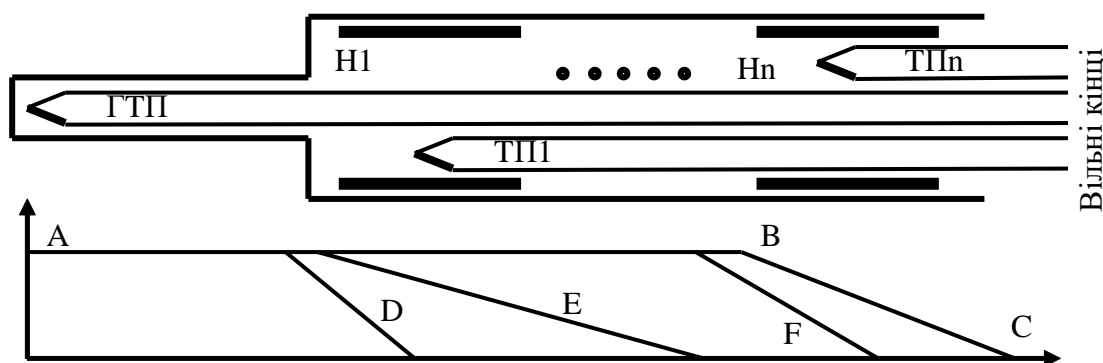


Рис. 1. Конструктивна схема пропонованого ТЕП з керованим профілем температурного поля

Внизу рис. 1 показано профіль температурного поля ABC, заданий регуляторами температури на базі $ТП_1, H_1 \dots ТП_n, H_n$. При зміні профілю температурного поля об'єкта в межах, вказаних профілями D ... F, профіль ABC не буде змінюватися. Тому похибка від набутої неоднорідності ГТП не може себе проявити.

До системи вимірювання температури за допомогою ТЕП з КПТП ставляться вимоги забезпечення високої точності вимірювання термо-е.р.с. всіх ТП. Тому цю систему найкраще виконувати не багатоканальною (кожна ТП має окремий вимірювальний канал) а багаточисловою (вимірювальний канал один для всіх, комутатор почергово підключає до нього окремі ТП) [2]. Як показано у [21], похибка, викликана набутою неоднорідністю електродів ГТП (зміню профілю температурного поля вздовж її електродів), не перевищує $0,13^\circ\text{C}$. Нею можна нехтувати. При цьому загальна похибка вимірювання температури за допомогою ГТП (при умові корекції похибок від початкового відхилення ФП ТП від номінальної та дрейфу ФП ТП за час експлуатації на базі перевірки ГТП за допомогою еталонної ТП) не перевищує $1,4^\circ\text{C}$.

Піч керування профілем температурного поля

Представлена на рис. 1 та у [21] конструкція ТЕП з КПТП, виконаної як єдиний інтегрований сенсор, має значні недоліки:

1. Складність конструкції;

2. Відсутність уніфікації з існуючими ТЕП;
3. Неможливість застосування до ТЕП, що вже випускаються;
4. Складність заміни ГТП при значній деградації її електродів;
5. Необхідність метрологічної атестації як нового виду сенсора.

Вказані недоліки є суттєвими, вони стримують можливість широкого використання ТЕП з КПТП. Але ці недоліки не притаманні самому методу зменшення впливу змін профілю температурного поля на результат вимірювання температури. Вони є наслідком виконання ТЕП з КПТП саме як єдиного інтегрованого сенсора. Для їх усунення доцільно розділити ТЕП з КПТП на: (i) сам сенсор, тобто ГТП (стандартизовану ТП, яка випускається); (ii) засіб стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів ГТП (спеціалізовану трубчатую піч). Тоді всі вказані вище недоліки усуваються.

Конструктивна схема пропонованої спеціалізованої багатозонної трубчатої печі подана на рис. 2. Вона складається із зовнішнього 1 та внутрішнього 2 трубчатих корпусів (діаметр внутрішнього корпусу відповідає зовнішньому діаметру стандартизованого ТЕП). Корпуси 1 і 2 з'єднані стінками 3 і 4 за допомогою зварних швів. В середині печі розміщено ізоляційний (керамічний) циліндр 5. На циліндр 5 намотано (або напилено) нагрівач 6. Виводи 7 нагрівача 6 проходять назовні

керуючої дії БК проводиться лише після закінчення перехідного процесу встановлення температури всіх зон (аналогічно, як у попередньому методі, для виключення самозбудження). Однак, за рахунок того, що НМ, навчена при різних змінах температури зон та

різних температурах зон, значно точніше визначає необхідні зміни потужності нагрівачів, кількість ітерацій при встановленні заданого профілю температурного поля, різко зменшується.

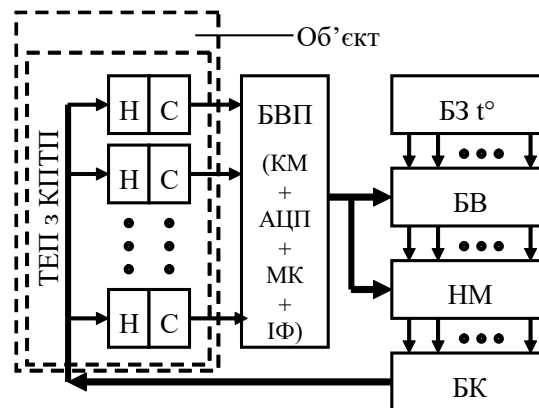


Рис. 3. Структурна схема вимірювально-керуючої системи в режимі підтримання профілю температурного поля

Нейромережеві регулятори зазвичай навчаються або на відповідній моделі об'єкта керування, або при ввімкненні їх паралельно до високоякісного регулятора ("вчителя"). Перший метод вимагає створення моделі об'єкта керування, яка має високу точність – її похибки повинні бути в декілька разів меншими за допустимі похибки керування. Ідентифікація параметрів високоточних моделей багатозонних об'єктів керування є непростю задачею, яка вимагає значного об'єму експериментальних досліджень. Метод "з вчителем" вимагає використання регуляторів, які вже забезпечують відповідне керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП, тобто наперед вміють вирішити поставлену задачу.

Щоби не використовувати модель об'єкта та ТЕП з КПТП, пропонується навчати НМ безпосередньо на об'єкті вимірювання. Для цього на час навчання

змінюють структуру системи відповідно до рис. 4. Входи БК підключають до блоку задання приростів керуючої дії БЗП, а виходи НМ до блоку БН навчання НМ. Під час навчання БЗП дає BZt° сигнал запам'ятати поточну температуру і формує для БК випадковий (додатні та від'ємні) прирости потужності нагрівачів Н. Після закінчення нагріву або охолодження зон печі БВП вимірює їх температуру та подає її на БВ і НМ. Навчена НМ мала б сформувати прирости потужності, які би повернули температуру зон до початкового значення (відповідали приростам, сформованим БЗП, з протилежною полярністю). Якщо прирости не рівні потрібним, то БН змінює ваги і зміщення нейронів для наближення формованих НМ приростів до потрібних. Метод вимагає 20 – 25 тестових змін потужності при різних температурах, далі НМ може навчатися на отриманих експериментальних даних.

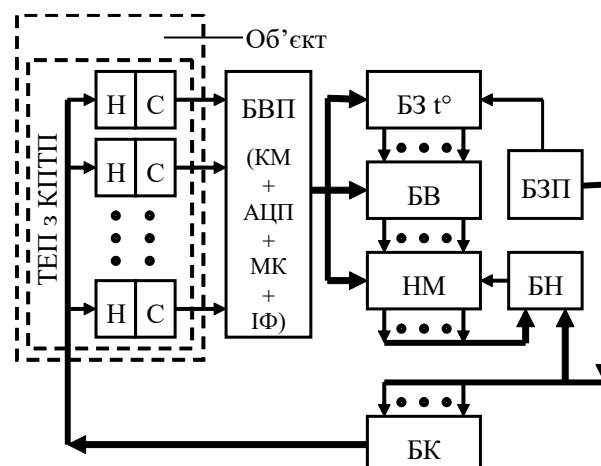


Рис. 4. Структурна схема вимірювально-керуючої системи в режимі навчання нейронної мережі

Експериментальні дослідження пропозованих методів керування

Для проведення експериментальних досліджень першого методу встановлення температурного поля

(що базується на рішенні системи рівнянь (1)) необхідно спочатку визначити коефіцієнти $k_{11} \dots k_{nn}$. Для їх прямого визначення експериментальним шляхом необхідно скласти систему k_{nn}^2 рівнянь та

рішити її відносно $k_{11} \dots k_{mm}$. З рішенням системи немає проблем. Але для складання такої системи слід отримати експериментальні дані для n^2 профілів температурного поля. Такий метод дуже трудомісткий. Також він має низьку точність – при такій великій кількості профілів температурного поля різниці між ними будуть малі. Тоді похибки вимірювання і незакінченість перехідних процесів будуть сильно впливати на результати обчислення коефіцієнтів $k_{11} \dots k_{mm}$.

Пропонується метод окремого визначення коефіцієнтів для кожного нагрівача. При цьому під час кожного експерименту вмикають лише один з нагрівачів (наприклад, j). Тоді система рівнянь (1) "вироджується" в стовпець. Її рішення дає змогу отримати значення коефіцієнтів $k_{j1} \dots k_{jn}$. Результати кожного з цих експериментів можна представити у вигляді графіка (рис. 5). З такого графіка можна прямо знайти значення коефіцієнтів $k_{j1} \dots k_{jn}$. Таким чином для n нагрівачів достатньо провести лише n експериментів.

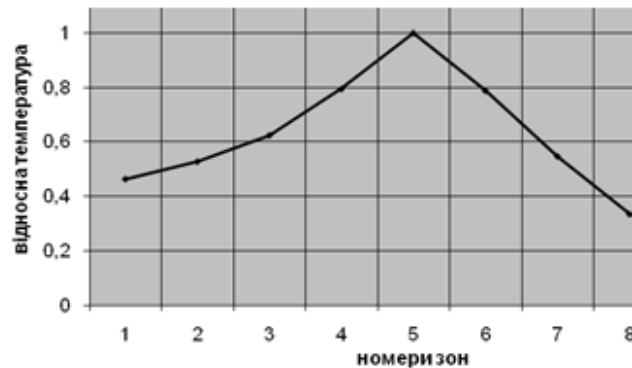


Рис. 5. Відносний розподіл зміни температури вздовж ТЕП з КПТП при ввімкненні одного нагрівача

У пропонованому методі визначення коефіцієнтів $k_{11} \dots k_{mm}$ за замовчуванням прийнято, що потужності всіх нагрівачів рівні. Однак потужність реальних нагрівачів окремих зон не є однаковою. Для врахування різниці між потужностями окремих нагрівачів представимо прирости потужності нагрівачів $\Delta P_1 \dots \Delta P_n$ в кожному члені правої частини системи (1) як

$$\Delta P_i = \Delta P_{MIN} \cdot k_i^p, \quad (2)$$

де k_i^p – коефіцієнт перевищення потужності окремих нагрівачів над потужністю нагрівача, що створює мінімальну температуру у своїй зоні під час експериментального визначення коефіцієнтів $k_{11} \dots k_{mm}$.

В свою чергу додаткові коефіцієнти $k_1^p \dots k_n^p$ можна визначити як

$$k_i^p = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{MIN}}, \quad (3)$$

де ΔT_{MIN} – мінімальна зміна температури зони своїм нагрівачем під час визначення коефіцієнтів $k_{11} \dots k_{mm}$; ΔT_i – зміна температури зони своїм i -тим нагрівачем.

Результати експериментальних досліджень процесу встановлення профілю температурного поля для методу, що базується на рішенні системи лінійних рівнянь (1), представлено на рис. 6. Одиницями часу на осі абсцис є відносні одиниці, значення яких відповідає подвійній постійній часу ТП з КПТП. Як видно з рис. 6, відхилення температури зон ТП з КПТП від заданих поступово зменшуються. Однак тривалість процесу встановлення профілю температурного поля є великою. Навіть при невеликих відхиленнях (на рис. 6 – не більше 2,5°C) необхідно не менше трьох ітерацій.

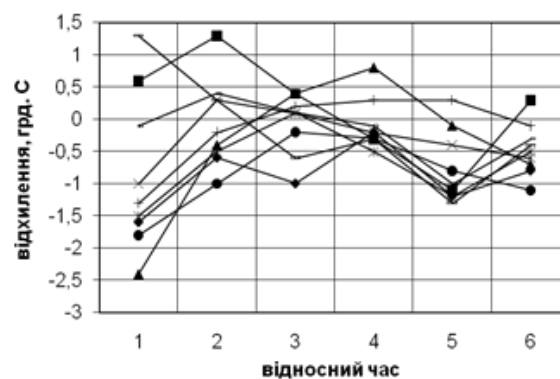


Рис. 6. Процес встановлення профілю температурного поля при керуванні за методом, що базується на рішенні системи лінійних рівнянь

На рис. 7 представлено аналогічні графіки для нейромережевого методу керування. Як видно з рис. 7, для встановлення заданого профілю температурного поля достатньо двох постійних часу (одного

ітераційного циклу). Це стосується також великих (до 20°C) відхилень профілю температурного поля від заданого.

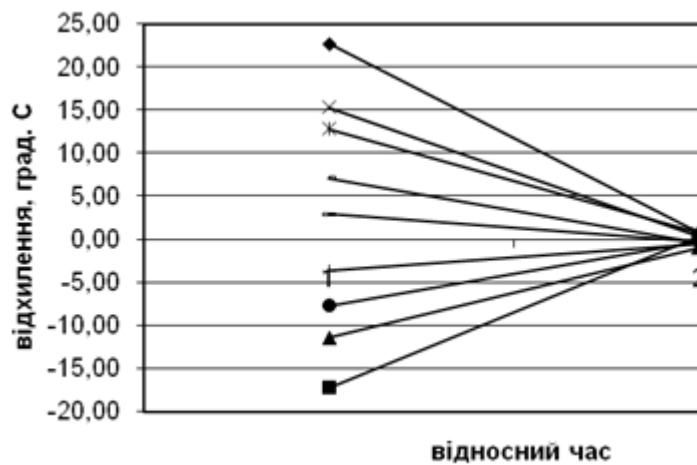


Рис. 7. Процес встановлення профілю температурного поля при керуванні нейромережевим методом

Висновки

Як видно із результатів досліджень, метод зменшення впливу набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності ТП на похибку результату вимірювання температури шляхом стабілізації профілю температурного поля вздовж її електродів є дуже ефективним. Стабілізація профілю температурного поля практично повністю виключає вплив змін профілю температурного поля об'єкта на термо-е.р.с. ТП, що вимірює його температуру. При цьому запропоноване технічне рішення дає можливість підвищення точності вимірювання температури існуючими ТП. Разом із відомими методами корекції похибок від початкового

ФП ТП від номінальної та від дрейфу її ФП можна забезпечити високу точність та метрологічну надійність вимірювання температури при тривалій експлуатації ТЕП при високих температурах.

Слід відзначити, що запропоновані методи керування профілем температурного поля мають невисоку обчислювальну складність. Хоча процес навчання НМ вимагає великих обчислювальних ресурсів, він проводиться лише при налаштуванні вимірювального каналу. У цей час необхідна підтримка персонального комп'ютера. А у подальшому, під час експлуатації, процес обчислення необхідних приростів потужності нагрівачів можуть виконувати прості 8-ми бітні мікроконтролери.

Список літератури

1. Arroyo Lazo M. A., Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Ginebra : World Economic Forum, 2016. 172 p.
2. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем : дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, ФМІ імені Карпенка НАН України, Львів, 2005.
3. Webster J. G. The measurement, instrumentation and sensors handbook. CRC press, 1998.
4. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94. [Чинний від 1986-04-01], Київ, 1994.
5. Bojkovski J., Fischer J., Machin G., Pavese F., Peruzzi A., Renaot E., Tegeler E. A roadmap for thermal metrology. *International Journal of Thermophysics*. 2009. No. 30 (1). P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-008-0454-5>
6. Machin G., Bojkovski J., del Campo D., Dogan, et al. A European roadmap for thermometry. *International Journal of Thermophysics*. 2014. No. 35 (3–4). P. 385–394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1554-4>
7. Wang T. P., Bediones D. P., Henrikson H. J., Janhunen E. J., Bachalo K., Swirla P. Stabilized metal sheathed type K and E thermocouples improve turbine efficiency. *In ISA TECH/EXPO Technology Update*. 1997. No. 1 (5). P. 439–448.
8. NI PXI E4353. URL : <http://www.ni.com/pdf/manuals/375508c.pdf>
9. NETDAQ 2640. URL : https://www.axitest.com/images/store/files/203321_FLUKENETDAQ2640A.pdf
10. NETDAQ 2645. URL : <http://www.manualsdir.com/manuals/104116/fluke-netdaq-2645a-netdaq-2640a.html>
11. Самсонов Г. В., Киц А. И., Кюздени О. А. Датчики для измерения температуры в промышленности. Киев: Наукова думка, 1972.
12. Кочан О. В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2008. № 13 (2). С. 102–108.
13. Jun S., Kochan O. The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement. *Measurement Techniques*. 2015. No. 57 (10). P. 1160–1166. DOI: 10.1007/s11018-015-0596-3.

14. Jun S., Kochan O., Kochan V., Wang C. Development and investigation of the method for compensating thermoelectric inhomogeneity error. *International Journal of Thermophysics*. 2016. No. 37 (1). Article No. 10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-015-2025-x>
15. Jun S., Kochan O. V., Jotsov V. S. Thermal measurements methods of reducing the effect of the acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples on temperature measurement error. *Measurement Techniques*. 2015. No. 58 (3). P. 327–331. DOI: 10.1007/s11018-015-0709-z
16. Kochan O., Kochan R., Bojko O., Chyrka M. Temperature measurement system based on thermocouple with controlled temperature field. In *Proceedings of the 2007 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. 2007. P. 47–50. DOI: 10.1109/IDAACS.2007.4488370
17. Саченко А. А. Повышение точности измерения электрическими методами высоких температур в промышленных условиях : дис. на соискание степени кандидата технических наук, ФМИ имени Карпенка АН УССР, Львов, 1978.
18. Саченко А. А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий : дис. на соискание степени доктора технических наук, ЛЭТИ, Ленинград, 1988.
19. Sloneker K. C. Thermocouple inhomogeneity. *Ceramic Industry*. 2009. No. 159 (4). P. 13–18.
20. Киренков И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности. Исследование в области температурных измерений : Сборник трудов, Москва: ВНИИМ. 1976. С. 11–15.
21. Кочан О. В. Термоелектричний перетворювач з керуванням профілем температурного поля : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин. Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2011. 20 с.
22. Кочан О. В., Кочан Р. В. Мікроконтролерний метод керування профілем температурного поля. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи та мережі*. 2008. С. 67–75.
23. Vasyukiv N., Kochan O., Kochan R., Chyrka M. The control system of the profile of temperature field. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. 2009. P. 201–206. DOI: 10.1109/IDAACS.2009.5342994
24. Кочан О. В. Нейромережевий метод керування для термоелектричного перетворювача з керуванням профілем температурного поля. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2012. № 2 (21). С. 35–45.
25. Kochan O., Sapojnyk H., Kochan R. Temperature field control method based on neural network. In *Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. 2013. Vol. 1. P. 21–24. DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6662632.

References

1. Arroyo Lazo, M. A., Schwab, K. (2016), *The Fourth Industrial Revolution*, Ginebra : World Economic Forum, 172 p.
2. Kochan, R. V. (2005), "Improving the components of precision distributed information and measurement systems", ["Vdoskonalennya komponentiv pretsyziynykh rozpodilennykh informatsiyno-vymiryuval'nykh system"], PhD Thesis on specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components, Karpenko Physical and Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv.
3. Webster, J. G. (1998), *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, CRC press.
4. Thermoelectric converters. Nominal static characteristics of the transformation [Peretvoryuvachi termoelektrychni. Nominal'ni statychni kharakterystyky peretvorenniya] (1994), State Standard of Ukraine 2837-94. [Actual from 1986-04-01], Kyiv.
5. Bojkovski, J., Fischer, J., Machin, G., Pavese, F., Peruzzi, A., Renaot, E., Tegeler, E. (2009), "A roadmap for thermal metrology", *International Journal of Thermophysics*, No. 30 (1), P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-008-0454-5>
6. Machin, G., Bojkovski, J., del Campo, D., Dogan, et al. (2014), "A European roadmap for thermometry", *International Journal of Thermophysics*, No. 35 (3-4), P. 385–394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1554-4>
7. Wang, T. P., Bediones, D. P., Henrikson, H. J., Janhunen, E. J., Bachalo, K., Swirla, P. (1997), "Stabilized metal sheathed type K and E thermocouples improve turbine efficiency", *In ISA TECH/EXPO Technology Update*, No. 1 (5), P. 439–448.
8. NI PXI E4353, available at : <http://www.ni.com/pdf/manuals/375508c.pdf>
9. NETDAQ 2640, available at : https://www.axitest.com/images/store/files/203321_FLUKENETDAQ2640A.pdf
10. NETDAQ 2645, available at : <http://www.manualsdir.com/manuals/104116/fluke-netdaq-2645a-netdaq-2640a.html>
11. Samsonov, G. V., Kits, A. I., Kuzdeni, O. A. (1972), *Industrial temperature sensors [Datchiki dlya izmereniya temperatury v promyshlennosti]*, Kyiv : Naukova Dumka.
12. Kochan, O. V. (2008), "Thermoelectric converter with controlled temperature field profile" ["Termoelektrychnyy peretvoryuvach z kerovanyym profilem temperaturnoho polya"], *Bulletin of Ternopil State Technical University*, No. 13 (2), P. 102–108.
13. Jun, S., Kochan, O. (2015), "The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement", *Measurement Techniques*, No. 57 (10), P. 1160–1166. DOI: 10.1007/s11018-015-0596-3
14. Jun, S., Kochan, O., Kochan, V., Wang, C. (2016), "Development and investigation of the method for compensating thermoelectric inhomogeneity error", *International Journal of Thermophysics*, No. 37 (1), Article No. 10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-015-2025-x>
15. Jun, S., Kochan, O. V., Jotsov, V. S. (2015), "Thermal measurements methods of reducing the effect of the acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples on temperature measurement error", *Measurement Techniques*, No. 58 (3), P. 327–331. DOI: 10.1007/s11018-015-0709-z
16. Kochan, O., Kochan, R., Bojko, O., Chyrka, M. (2007), "Temperature measurement system based on thermocouple with controlled temperature field", *In Proceedings of the 2007 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, P. 47–50. DOI: 10.1109/IDAACS.2007.4488370
17. Sаченко, А. А. (1978), Improving the accuracy of measurement of high temperatures by electrical methods in industrial conditions [Povysheniye tochnosti izmereniya elektricheskimi metodami vysokikh temperatur v promyshlennykh usloviyakh], PhD Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences, Karpenko Physical and Mechanical Institute, Academy of Sciences of USSR, Lviv.

18. Sachenko, A. A. (1988), Development of methods for improving accuracy and creation of precision temperature measurement systems for industrial technologies [Razrabotka metodov povysheniya tochnosti i sozdaniye sistem pretsizionnogo izmereniya temperatury dlya promyshlennykh tekhnologiy], Doctoral Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, LETI, Leningrad.
19. Sloneker, K. C. (2009), "Thermocouple inhomogeneity", *Ceramic industry*, No. 159 (4), P. 13–18.
20. Kirenkov, I. (1976), "Some laws of thermoelectric inhomogeneity", ["Nekotoryye zakony termoelektricheskoy neodnorodnosti"], *Research in the field of temperature measurements : Proceedings*, Moscow : VNIIM, P. 11–15.
21. Kochan, O. V. (2011), Thermoelectric converter with controlled temperature field profile ["Termoelektrychnyy peretvoryuvach z kerovanyim profilem temperaturnoho polya"], PhD Thesis for the degree of candidate of technical sciences: 05.11.04 – devices and methods of measurement of thermal quantities. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2011, 20 p.
22. Kochan, O. V., Kochan, R. V. (2008), "Microcontroller method of temperature field profile control" ["Mikrokontrolernyy metod keruvannya profilem temperaturnoho polya"], *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Computer Systems and Networks*, P. 67–75.
23. Vasylykiv, N., Kochan, O., Kochan, R., Chyrka, M. (2009), "The control system of the profile of temperature field", *In Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, P. 201–206. DOI: 10.1109/IDAACS.2009.5342994
24. Kochan, O. V. (2012), "Neural network control method for thermoelectric converter with controlled temperature field profile", ["Neyromerezhevyy metod keruvannya dlya termoelektrychnoho peretvoryuvacha z kerovanyim profilem temperaturnoho polya"], *Adaptive Automatic Control Systems*, No. 2 (21), P. 35–45.
25. Kochan, O., Sapojnyk, H., Kochan, R. (2013), "Temperature field control method based on neural network", *In Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*, Vol. 1, P. 21–24. DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6662632.

Надійшла (Received) 12.08.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кочан Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету, професор кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, Харків, Україна; email: orestvk@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8376-4660>.

Кочан Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Научно-исследовательский институт Интеллектуальных компьютерных систем Западноукраинского национального университета, профессор кафедры информационно-вычислительных систем и управления, Харьков, Украина.

Kochan Volodymyr – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Research Institute for Intelligent Computer Systems of West Ukrainian National University, Professor of the Department of Information-Computing Systems and Control, Kharkiv, Ukraine.

УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕРМОПАР НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Предметом исследования в статье являются высокоточные измерения температуры термодарами, электроды которых деградировали из-за длительного воздействия высокой температуры при эксплуатации. Скорость деградации приблизительно пропорциональна температуре и времени эксплуатации участков электродов термодар. Деградация приводит к двум видам погрешности – из-за дрейфа функции преобразования (ее постепенного изменения в течении времени эксплуатации) и из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов термодар (проявляет себя как изменение функции преобразования термодара при изменении профиля температурного поля даже при постоянных температурах рабочего и свободных концов). **Цель** статьи – исследование метода повышения точности измерения температуры термодарами, имеющими большую, приобретенную в процессе эксплуатации, термоэлектрическую неоднородность. Цель достигается путем стабилизации профиля температурного поля вдоль электродов термодар, тогда погрешность от их приобретенной термоэлектрической неоднородности не может себя проявить. **Задания:** оценка погрешности измерения температуры с помощью термодар, разработка метода повышения точности измерения температуры неоднородными термодарами, устройства стабилизации профиля температурного поля, методов управления профилем температурного поля и экспериментальные исследования предложенных методов управления. Используются общеизвестные **методы:** конструирование оборудования с заданными параметрами и ограничениями, вычисления путем решения системы линейных уравнений, формирование необходимой функциональной зависимости при помощи нейронной сети, экспериментальные исследования. Получено следующие **результаты.** Стабилизация профиля температурного поля позволяет уменьшить влияние приобретенной термоэлектрической неоднородности термодар, которая, за данными литературы, может достигать 11°C, до уровня 1,3°C. Показано, что разработанное устройство стабилизации профиля температурного поля – многозонная трубчатая печь – из-за тесной тепловой связи между зонами, требует многоканального регулятора, не склонного к самовозбуждению. Предложено два метода управления профилем температурного поля – на базе решения системы линейных уравнений и нейросетевой метод, где нейронная сеть обучается непосредственно на многозонной печи. **Выводы.** Как показали проведенные экспериментальные исследования, предложенные методы не дают возможности погрешности из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности термодар проявить себя, что обеспечивает возможность повышения точности и метрологической надежности измерения температуры существующими типами термодар.

Ключевые слова: термодара; погрешность; термоэлектрическая неоднородность термодар; многозонный объект; управление температурой.

DECREASING OF THERMOCOUPLE INHOMOGENEITY IMPACT ON TEMPERATURE MEASUREMENT ERROR

The **subject** of research is accurate temperature measurements by thermocouples whose legs undergone degradation during long term operation at high temperatures. The degradation rate is approximately proportional to the temperature of constant operation of the sections of thermocouple legs and time of operation. Degradation causes two types of errors – due to drift of the conversion characteristic (its gradual change during operation) and due to the acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouple legs (manifests itself as a change in thermocouple conversion characteristic when changing the temperature field even at constant temperatures of the measuring and reference junctions). The **aim** of the article is to study the method of increasing the accuracy of temperature measurement by thermocouples that have significant thermoelectric inhomogeneity acquired during operation. The aim is achieved by stabilizing the temperature field along the thermocouple legs, so error due to acquired thermoelectric inhomogeneity cannot manifest itself. The **tasks** of the paper are to estimate the error of temperature measurement using the thermocouple, develop the method for increasing accuracy of temperature measurements by inhomogeneous thermocouples, means of stabilization of the temperature field, methods of control of the temperature field, and experimental study the proposed control methods. There are well-known **methods** used such as the design of equipment with given parameters and limitations, calculations by solving a system of linear equations, the formation of the necessary functional dependence using a neural network, experimental studies. The obtained **results** are as follows: stabilization of the temperature field makes it possible to reduce the influence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples, which, according to the literature, can reach 11°C to 1,3°C. It is shown that the developed multi-zone tubular furnace for stabilizing the temperature field due to a close thermal connection between the zones, requires a multi-channel controller that is not prone to self-excitation. There are two methods of control of the temperature field are proposed. One based on the solution of a system of linear equations. The second method is based on the neural network, in which the neural network is trained directly on a multizone furnace. **Conclusions.** As shown by experimental studies, the proposed methods do not allow the error of the acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples to manifest itself, which provides an opportunity to increase the accuracy and metrological reliability of temperature measurements by existing types of thermocouples.

Keywords: thermocouple; error; thermoelectric inhomogeneity of thermocouple; multizone object; temperature control.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Кочан В. В. Зменшення впливу неоднорідності термопар на результат вимірювання температури. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 3 (13). С. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.129>.

Kochan, V. (2020), "Decreasing of thermocouple inhomogeneity impact on temperature measurement error", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (13), P.129–137. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.129>.
