

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Кочана Ореста Володимировича**

**«Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами»**, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин

**Актуальність теми.** Науково-технічна проблематика досліджень в галузі вимірювань теплових величин завжди була і є одним з важливих напрямів досліджень в області вимірювальної техніки. Такі вимірювання є основою сталого функціонування систем енергетики та переважної більшості галузей науково-промислового комплексу України. Вони є важливою складовою різноманітних технологічних процесів, а підвищення точності вимірювання теплових величин сприяє не тільки підвищенню якості продукції, але й ресурсозбереженню та економії коштів.

У промисловості одним з найпоширеніших діапазоні температур є діапазон від 500 до 1100°C, який ще називають діапазоном підвищених температур. В цьому діапазоні для вимірювання використовують різні перетворювачі і одними з найбільш ефективних та економічно виправданих є термоелектричні перетворювачі (ТЕП) на базі різного типу термопар (ТП) як чутливих елементів. Однак таким перетворювачам притаманний відомий недолік – тривала експлуатація ТЕП у високотемпературних теплових полях приводить до деградації матеріалу електродів, і як наслідок – до відхилення функції перетворення (ФП) ТП від їх номінальних значень. Це вимагає періодичної повірки ТЕП, яка виконувалась в лабораторних умовах, передбачала обов'язковий їх демонтаж і відповідно, зупинку технологічного процесу. Це приводило до значних збитків.

Вищенаведене обумовлює актуальність вирішення поставленої в роботі Кочана О. В. науково-технічної проблеми, що полягає у створенні методів та засобів точного вимірювання підвищених температур неоднорідними термопарами, розробленні нових методів оперативного визначення похибок термопар та

діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації.

**Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів.** Положення та висновки дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані теоретичними і модельними дослідженнями та експериментально. Ця оцінка базується на коректній постановці мети та завдань дослідження, використанні перевірених вихідних даних, застосуванні адекватних методів досліджень, логічному та чіткому формулюванні їх результатів, на підтвердженні теоретичних висновків щодо запропонованих технічних рішень і очікуваних властивостей розроблюваних приладів метрологічними дослідженнями.

В роботі коректно використовуються положення теоретичних основ інформаційно-вимірювальної техніки та структурно-алгоритмічні методи підвищення точності і розширення функціональних можливостей вимірювальних приладів, теорія похибок, нейромережеві технології, моделювання та розрахунки характеристик ТЕП.

**Наукова новизна та значення результатів досліджень.** Основні наукові положення, висновки і рекомендації, отримані автором і представлені в дисертації, безпосередньо пов'язані з метою досліджень і полягають у наступному:

- в дисертації запропоновано нову концепцію бездемонтажного калібрування ТЕП для реалізації якої необхідно і достатньо виділити на його ТП ділянку, в межах якої не відбуваються деградаційні зміни питомої термо-е.р.с., що дає змогу використати цю ділянку для оперативного визначення похибки ТЕП шляхом регульованого зміщення зони температурного градієнту у напрямку опорної ділянки;

- отримала подальший розвиток модель, що описує зміни термо-е.р.с. неоднорідної ТП внаслідок зміни розподілу температури вздовж її електродів, що дало змогу встановити закономірність, яка відображає зв'язок між поточними і максимальними значеннями похибок дрейфу ФП і неоднорідності;

- запропоновано метод оперативного визначення похибки ТЕП у процесі експлуатації, зумовленої дрейфом ФП ТП, за допомогою опорної ділянки шляхом керованого зміщення зони температурного градієнту таким чином, щоб цей градієнт

був прикладений лише до опорної ділянки ТП;

- запропоновано метод оперативного діагностування стану електродів ТП у процесі експлуатації, який, завдяки керованим змінам температурного поля вздовж її електродів, дає змогу визначити питому термо-е.р.с. віртуальних ділянок, на які поділена ТП та визначити ступінь їх деградації;

- запропоновано метод керування профілем температурного поля з використанням штучної нейронної мережі, що забезпечує зменшення тривалості встановлення температурного поля заданого профілю до однієї-двох ітерацій завдяки реалізації розімкненої системи керування та навчання нейронної мережі безпосередньо на об'єкті керування;

- набула подальшого розвитку модель похибки ТП, яка описує залежність похибки ТП від температури та тривалості експлуатації, а також значення температури після зміни профілю температурного поля, що дає змогу спрогнозувати термін придатності термопар до використання;

- запропоновано структуру двоконтурної системи вимірювання температури, яка, за рахунок почергової зміни функцій контурів (вимірювання та керування температурною об'єкта або корекція похибок і діагностування стану електродів термопар) забезпечує похибку вимірювання температури в межах  $1,3^{\circ}\text{C}$  для термопар типу хромель-алюмель;

- запропоновано метод встановлення ФП ТЕП з неоднорідними ТП за рахунок введення двох додаткових виводів термопар, що дає змогу експериментально підтвердити ефективність запропонованих методів.

**Практичне значення результатів роботи** полягає у наступному:

- обґрунтовано схемотехнічні рішення, які, у випадку використання у високоточному вимірювальному каналі температури, забезпечують виконання необхідної умови, яка полягає в тому, що після корекції похибок ТП її невиключена похибка повинна залишитися домінуючою;

- розроблено конструктивну схему багатозонної печі з керованим профілем температурного поля та оцінено необхідну потужність її нагрівачів і час встановлення профілю температурного поля;



- розроблено конструкцію спеціалізованого ТЕР з керованим профілем температурного поля, що використовує лише одну нестандартну деталь і забезпечує оперативне діагностування стану своїх електродів;

- вдосконалено метрологічний програмний тест каналу вимірювання температури, що дає змогу провести імітаційне моделювання розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

- модернізовано спеціалізований стенд для експериментального дослідження розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

- отримано результати експериментальних досліджень розроблених методів підвищення точності вимірювання температури, які підтверджують їх ефективність.

**Основні результати** теоретичних і експериментальних досліджень автора знайшли впровадження на ряді підприємств і науково-дослідних організацій як в Україні, так і за її межами. Результати дисертації впроваджено у компанії TRV Display Technology (Wuhan) Co., Ltd міста Ухань, Провінція Хубей, Китайська Народна Республіка (акт № 1946/03 від 20.03.2019), та у Приватному акціонерному товаристві «СКБ мікроелектроніки у приладобудуванні» (від 12.09.2019); результати дисертації впроваджено у навчальний процес у Люблінській політехніці, механічний факультет, кафедра автоматизації, місто Люблін, Воєводство Любельське, Республіка Польща (акт від 21.12.2018) та у національному університеті «Львівська політехніка» (6.12.2019).

**Структура дисертації та зміст розділів.** Дисертація складається з анотації, публікацій здобувача за темою дисертації, змісту, списку умовних скорочень, основної частини, що включає вступ, 5 розділів та висновки, списку використаних джерел, який містить 328 найменувань та 25 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 377 сторінки, з яких основний текст викладено на 264 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказані мета і завдання досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок з виконаними НДР, особистий внесок здобувача в публікаціях, представлена інформація з апробації, реалізації і впровадження результатів роботи.



У першому розділі проаналізовано вплив набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП на похибку вимірювання температури. Показано, що відомі методи вимірювання підвищених температур за допомогою ТП мають великі похибки через деградацію їх електродів при тривалій дії температури. Деградація проявляє себе як: 1) похибка від дрейфу ФП ТП, тобто поступової зміни ФП ТП від номінальної; 2) похибка від набутої у процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів, тобто зміни генерованої термо-е.р.с. при зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП. Остання похибка для найбільш вживаних ТП типу хромель-алюмель може сягати 11 – 30°C. Відомі методи зменшення похибки ТП спираються на визначення похибки або у різних профілях температурного поля, або на місці експлуатації за допомогою робочого еталону або калібратора температури. Ці методи мають високу трудомісткість та вимагають використання еталонів у робочих умовах, що суперечить нормативним документам. Це обумовлює актуальність розроблення методу оперативного визначення похибки ТП в умовах їх експлуатації.

У другому розділі показано, що відомий метод визначення похибок ТП на базі ефекту Пельтьє вимагає вимірювання мілівольтової напруги з похибкою менше 0,001%, що неприйнятно для промислових умов. Розроблена концепція забезпечення точності вимірювання температури за допомогою ТП, яка спирається на "опорну ділянку", що практично не деградує бо експлуатується за сталої температури. Визначено загальні залежності зміни ФП ТП під час деградації, проведено теоретичні дослідження поведінки неоднорідних ТП під час зміни профілю температурного поля, показано, що максимальні значення похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності рівні, а при поступовому пересуванні профілю температурного поля вздовж електродів ТП у сторону вільних кінців похибка від набутої термоелектричної неоднорідності поступово заміщає похибку від дрейфу ФП ТП. Для дослідження виявленого явища проведено числове моделювання процесу заміщення для різних профілів температурного поля. Моделювання показало, що за максимальної зміни профілю температурного поля отримана зміна термо-е.р.с. ТП дорівнює максимальним

значенням похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності та не залежить від форми профілів температурних полів. Це означає, що методична похибка визначення похибки ТП відсутня, і що дає змогу розробити метод оперативного визначення поточної похибки ТП у процесі експлуатації без її демонтажу та без використання еталонних засобів. Єдиною вимогою є сталість температури зльоту під час визначення поточної похибки ТП. Аналіз похибок засвідчив, що, залежно від розряду еталонної ТП, похибка вимірювання температури не перевищує  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

У третьому розділі розроблено оперативний метод діагностування стану електродів ТП під час експлуатації. Метод реалізується шляхом поступового зміщення профілю температурного поля у сторону вільних кінців ТП. Як міру ступеня деградації електродів ТП запропоновано еквівалентний час експлуатації, що врахує невідповідність швидкості деградації ТП у даних умовах і в умовах її дослідження, за якими побудовано усереднену модель похибки ТП. За жорстких умов експлуатації еквівалентний час експлуатації більший за фізичний, при сприятливих – менший. Для різних ділянок ТП еквівалентні часи експлуатації можуть суттєво відрізнятися від середнього значення. Для їх визначення складають систему рівнянь, кожне з яких відповідає одному профілю температурного поля. Розв'язками системи будуть значення похибки від набутої неоднорідності віртуальних ділянок ТП.

Розроблено методику оцінювання еквівалентних часів експлуатації ділянок за допомогою усередненої моделі похибки ТП. Проаналізовано різні варіанти співвідношення еквівалентних часів експлуатації ділянок та їх вплив на адекватність усередненої моделі похибки ТП. Методом імітаційного моделювання проведено дослідження впливу зовнішніх факторів, з'ясовано, що максимальний вплив чинить похибка керування профілем температурного поля.

Виявлене явище заміщення похибки від дрейфу ФП ТП похибкою від набутої неоднорідності при цілеспрямованих змінах профілю температурного поля вздовж електродів ТП дало змогу сформуванню нової методології експлуатації ТП, що спирається на розроблені методи оперативного визначення поточної похибки ТП.

За результатами проведених досліджень розроблено спеціалізований ТЕП із самодіагностуванням, що має лише одну нестандартну деталь – довгу керамічну втулку із напиленим нагрівачем, і забезпечує технологічність запропонованих технічних рішень.

У четвертому розділі розроблено засоби апаратного, методичного, математичного та системотехнічного забезпечення розроблених оперативних методів. Розроблено багатозонну трубчасту піч – засіб керування профілем температурного поля стандартного ТЕП. Через тісний тепловий зв'язок між зонами печі виникає небезпека втрати стійкості їх регуляторів. Розроблені розімкнута структура системи та нейромережевий метод керування профілем температурного поля, не схильні до самозбудження.

Для визначення еквівалентного часу експлуатації ТП розроблено нейромережеву багатовимірну модель похибки ТП. Проблемою при її побудові була мала кількість даних для навчання нейронної мережі. Кількість даних збільшено інтерполяцією та екстраполяцією даних експериментальних досліджень методом найменших квадратів вдосконаленим за рахунок інтерполяційного поліному Лагранжа, що примусово встановлює у нуль суму залишків. В цьому разі модель похибки ТП набуває і фізичний, і математичний зміст. Для формування навчальних векторів розроблена методика, що враховує умову рівності нулю набутої похибки ТП коли зміна поточної температури ділянки більша за температуру її експлуатації та ієрархічний характер отримуваних при інтерполяції та екстраполяції даних. Модель – тришаровий персептрон з трьома вхідними розподільчими нейронами (температура, і час експлуатації ділянки електрода, поточна температура), 15-а схованими нейронами (функція активації – сигмоїда) та лінійним вихідним нейроном. Невиключена похибка відтворення похибки ТП не перевищує  $0,4^{\circ}\text{C}$  та має випадковий характер.

Запропоновано структури двоконтурних систем, у яких розроблені методи реалізуються у контурі, який не входить у контур регулювання термоагрегатом. Відібрано кращі технічні рішення компонентів системи, які забезпечили зменшення сумарної похибки каналу вимірювання термо-е.р.с. до значення  $0,35^{\circ}\text{C}$ . Розроблено



вимірювально-керуючу систему з двома ідентичними контурами вимірювання температури. Така система одночасно підвищує єдність, точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність вимірювання температури.

**П'ятий** розділ присвячено експериментальним дослідженням розроблених оперативних методів та засобів їх реалізації. Для цього вдосконалено стенд дослідження та розроблено ТП, задане значення похибки якої може оперативно встановлюватися. За їх допомогою проведено експериментальні дослідження: розробленого нейромережевого методу керування профілем температурного поля розробленої багатозонної печі; впливу змін зовнішньої температури на профіль температурного поля ТП, розміщеної у багатозонній печі; розробленого оперативного методу визначення похибки ТП у процесі експлуатації; розробленого спеціалізованого термоелектричного перетворювача із самодіагностуванням.

Проведений аналіз підтвердив, що запропоновані методи та засоби дають змогу одночасно підвищити єдність, точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність вимірювання температури за допомогою ТП у важливому для енергетики та промисловості діапазоні температур 600 - 1100°C незважаючи на значну деградацію електродів ТП.

**У додатках** наведено повний перелік публікацій за тематикою дисертації, документи, що підтверджують впровадження результатів роботи, розраховані у середовищі LabVIEW компоненти моделей дослідження похибок ТП, дослідження вдосконаленого методу найменших квадратів, навчальну та тестову вибірки для навчання нейронної мережі моделі похибки ТП, вагові коефіцієнти та зміщення нейронів розробленої нейромережової моделі похибки широко розповсюджених ТП типу ХА матеріали експериментальних і метрологічних досліджень та підпрограми опрацювання даних.

**Висвітлення результатів дисертації в опублікованих працях.** Основні наукові результати дисертації викладено у 83 наукових працях, серед них 20 входять до переліку фахових видань (в т. ч. 9 одноосібних), 11 індексовані у наукометричних базах Scopus і Web of Science. Патентів України – 8.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень оприлюднено в 32 доповідях на наукових конференціях, з них 4 індексовані у Scopus і Web of Science, 8 лише у Scopus.

**Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.**

У авторефераті стисло викладено основні результати дисертаційної роботи та повно відображено сформульовані в дисертації наукові положення, висновки і рекомендації.

**Оформлення дисертації.** Дисертація написана українською мовою на високому науково-професійному рівні, містить важливі наукові положення, які характеризуються новизною і корисністю, а також практичні результати, що знайшли застосування в промисловості та в науково-дослідних організаціях. Рівень досліджень та глибина розгляду питань відповідає вимогам до докторських дисертацій. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 (п.п. 9,10,12,13) та ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

**Зауваження по дисертаційній роботі та реферату**

До змісту дисертаційної роботи та автореферату є наступні зауваження.

1. Видається не зовсім математично коректним запис формул (1.1) (1.3) та (1.5) сумарної е.р.с.  $E_{\Sigma}$  та сумарної похибки  $\Delta E_{\Sigma}$ , в які входять індивідуальні відхилення термо-е.р.с.  $\Delta e_k$  кожної  $k$ -тої ділянки. То як у цих формулах передбачено підсумовування по всім ділянкам ТП?
2. Наведений на рис. 2.12 графік похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП мають додатні значення, що суперечить твердженню автора (стор.116) про їх знакозмінний характер (різними за знаком є перші похідні наведених кривих).
3. У визначенні сумарної похибки за формулою (2.63) та (2.64) не обґрунтована некорельованість окремих складових. До прикладу, складові 2

та 5 (вимірювання термо-е.р.с.) на стор. 129 виникають, вочевидь, в процесі використання одного вимірювального каналу, і мають бути корельованими.

4. На стор.164 запропоновано показник (3.18) у вигляді еквівалентного часу експлуатації, який фактично (зі збереженням позначень автора) отримано на основі пропорції

$$\frac{\tau_{EKV}}{\tau_E} = \frac{\Delta E_{POT}^{EOD}}{\Delta E_{MM}^{NEOD}} .$$

Раніше на рис.2.7 наводився узагальнений графік нелінійної функції  $\Delta E^{DR}(\tau_E)$ . Як пояснити цю розбіжність?

5. В п.4.3, що має назву «Математична модель похибки термопар» наведено вдосконалений метод найменших квадратів, нейромережеву модель похибки, регресійну модель дрейфу ФП ТП та ін. Але у висновках до п.4.3 і в цілому до розділу 4 не вказано що є математичною моделлю похибки термопар, якими аналітичними виразами вона подається. Це питання потребує уточнення.
6. В структурі багатоканальної керуючої підсистеми на рис.5.2 здійснюється живлення нагрівачів від мережі 220 В. Чи передбачалась стабілізація напруги живлення, адже навчання нейронної мережі системи регулювання температури печі повинно було виконуватись за певної стабільної напруги живлення нагрівачів?
7. В табл. 5.2 наведено результати вимірювання значень термо-е.р.с. з 5 десятковими розрядами. Як метрологічно підтверджувалась достовірність таких даних?
8. На стор. 364 в акті впровадження вказано тему дослідження з дещо відмінною назвою: «Розвиток теорії та методів забезпечення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами». Проте перелічені в акті технічні рішення повністю збігаються з викладеним у дисертації матеріалом.

**Загальний висновок.** Дисертаційна робота Кочана О. В. є завершеною науковою працею, присвяченою вирішенню важливої науково-технічної проблеми,



яка полягає у створенні методів та засобів точного вимірювання підвищених температур неоднорідними термопарами, що забезпечують одночасне покращення єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності вимірювання підвищених температур за рахунок нових оперативних методів визначення похибок термопар та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації.

Робота повністю відповідає формулі та напрямам паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин. За сукупністю отриманих наукових результатів, їх актуальністю, новизною, обґрунтованістю, достовірністю та практичною цінністю дисертаційна робота відповідає вимогам діючого «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор Кочан Орест Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04.

Професор кафедри  
приладів та систем неруйнівного контролю  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
д.т.н., професор



Ю.В. Куц

Підпис засвідчую

Вчений секретар

КПІ ім. Ігоря Сікорського



В.В. Холявко