

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Кочана О.В.
“Методи і засоби підвищення точності вимірювання
температури термоелектричними перетворювачами
з неоднорідними термопарами”, поданої на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.11.04 – Прилади та методи
вимірювання теплових величин

Актуальність теми дисертації

Явище термоелектрики на сьогодні широко використовується, зокрема, для вимірювання температури. Уже у дев'ятнадцятому столітті були сформульовані основні закони термоелектрики, перший з яких стверджує, що профіль температурного поля вздовж термоелектродів не впливає на генеровану термоелектричним перетворювачем термоЕРС. Однак вже у 1906 році було показано, що реальні термоелектричні перетворювачі ведуть себе інакше. Вже тоді було зауважено, що електроди термоелектричних перетворювачів неоднорідні, що веде до відповідної похибки вимірювання температури. Вдосконалення технології виготовлення термопарного дроту дозволило значно зменшити похибку від початкової термоелектричної неоднорідності термоелектричних перетворювачів. Але у процесі тривалої експлуатації при високих температурах виникає набута термоелектрична неоднорідність, яка може значно перевищувати початкову неоднорідність. Неодноразово були здійснені спроби зменшити вплив набутої термоелектричної неоднорідності на результат вимірювання температури. Але проблема залишалася не вирішеною. Тому дисертаційна робота Кочана Ореста Володимировича “Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами”, присвячена підвищенню точності вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів, термопари яких мають значну, набуту у процесі тривалої експлуатації при вимірюванні високих температур термоелектричну неоднорідність, є безумовно актуальною.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні результати, отримані здобувачем, достатньо обґрунтовані аналітично, комп'ютерним моделюванням та експериментальними дослідженнями. Отримані в процесі досліджень наукові результати є новими, а сама дисертація є закінченою науковою працею, яка вирішує важливу наукову і практичну проблему підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами для засобів і систем вимірювання, контролю та керування температурними режимами різноманітного обладнання.

Структура дисертації та зміст її розділів

Дисертаційна робота Кочана О.В. складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків.

У **першому розділі** проведено аналіз процесу виникнення набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар як наслідку деградації її електродів при їх тривалій експлуатації у засобах вимірювання підвищених температур (від 600 до 1100°C), а також її впливу на похибку вимірювання температури. Показано, що деградація проявляє себе як похибка від дрейфу функції перетворення термопар та похибка від набутої у процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності. Остання похибка під час експлуатації прихована, тому дуже небезпечна і різко знижує ефективність відомих методів корекції похибки від дрейфу функції перетворення термопар. Також показано, що відомі методи зменшення похибки термопар мають високу трудомісткість та вимагають використання еталонів у робочих умовах. Шляхом аналізу циклу Карно показано, що підвищення точності вимірювання температури, наприклад, на тепловій електростанції, забезпечить значний економічний та екологічний ефект. Однак для вирішення цієї проблеми слід провести додаткові теоретичні дослідження поведінки неоднорідних термопар у температурних полях різного профілю.

У **другому розділі** розроблена концепція підвищення точності вимірювання температури за допомогою неоднорідних термопар, яка спирається на "опорну ділянку", що практично не деградує бо експлуатується при температурі вільних кінців. Для цього узагальнено зміну функції перетворення термопар при дії основних впливаючих величин – температури і часу експлуатації та зміни профілю температурного поля при експлуатації, проведено теоретичні дослідження поведінки неоднорідних термопар під час зміни профілю температурного поля, показано, що максимальні значення похибок від дрейфу функції перетворення термопар та від набутої термоелектричної неоднорідності рівні, а при поступовому пересуванні профілю температурного поля вздовж електродів термопари у сторону вільних кінців похибка від набутої термоелектричної неоднорідності поступово "заміщає" похибку від її дрейфу. Це явище підтверджено комп'ютерним моделюванням. Виявлений ефект дав змогу розробити оперативний метод визначення поточної похибки термопар у процесі експлуатації без її переривання та без використання еталонних засобів. Умовами реалізації методу є лише визначення похибки термопар перед експлуатацією та сталість температури робочого кінця під час визначення поточної похибки. Проведений аналіз похибок показав, що похибка вимірювання температури не перевищує 1,1 - 1,3°C, а комп'ютерне моделювання показало максимальний вплив випадкової похибки каналу вимірювання термоЕРС на похибку запропонованого методу.

У третьому розділі розроблено оперативний метод діагностування стану електродів термопар під час експлуатації без необхідності використання еталонних засобів. Як міру ступеня деградації електродів термопар запропоновано еквівалентний час експлуатації, що врахує невідповідність швидкості деградації термопар у даних умовах і в умовах дослідження, за якими побудовано усереднену модель похибки термопар. Показано, що для визначення похибки віртуальних ділянок термопари достатньо розв'язати систему лінійних рівнянь, складених за результатами вимірювання термоЕРС термопари у ряді профілів температурного поля, отриманих шляхом поступового зміщення профілю температурного поля у сторону її вільних кінців. Проведене комп'ютерне моделювання впливу зовнішніх факторів показало, що максимальний вплив має похибка керування профілем температурного поля. Ці дослідження дали змогу розробити спрощений спеціалізований термоелектричний перетворювач із самодіагностуванням, що має лише одну нестандартну деталь. Таким чином, виявлене явище "заміщення" похибки від дрейфу функції перетворення термопар похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності під час цілеспрямованих змін профілю температурного поля вздовж електродів термопар формує нову методологію їх експлуатації, що спирається на розроблені оперативні методи визначення їх поточної похибки та діагностування стану електродів.

У четвертому розділі розроблено та проаналізовано засоби апаратного (багатозонну трубчасту піч), методичного (стійкий метод керування профілем температурного поля багатозонної трубчастої печі), математичного (багатомірна нейромережева модель похибки термопар від основних впливаючих величин – температури і часу експлуатації та зміни профілю температурного поля при експлуатації) та системотехнічного (структури двоконтурних систем, у яких розроблені методи реалізуються у контурі, який не входить у контур регулювання, а тому не розхитує регулятор температури об'єкта при реалізації розроблених оперативних методів) забезпечення. Проведений відбір кращих технічних рішень дав змогу забезпечити умову, згідно якої невиключена похибка корекції термопар має і надалі домінувати серед похибок компонентів вимірювального каналу системи.

У п'ятому розділі описано модернізований стенд експериментального дослідження розроблених оперативних методів та розроблений термоелектричний перетворювач, похибку якого можна оперативно задавати під час дослідження. Подані результати проведених експериментальних досліджень нейромережевого методу керування профілем температурного поля розробленої багатозонної печі, впливу змін зовнішньої температури на профіль температурного поля розміщеної у цій печі термопари, оперативного методу визначення похибки термопари у процесі експлуатації та спеціалізованого термоелектричного перетворювача із самодіагностуванням. Проведений аналіз показав, що запропоновані методи та засоби дають змогу

одночасно підвищити єдність, точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність вимірювання температури за допомогою термопар у важливому для енергетики та промисловості діапазоні температур 600 - 1100°C, незважаючи на значну деградацію їх електродів.

У висновках сформульовано основні результати дисертації, а додатки містять дослідження вдосконаленого методу найменших квадратів, навчальну та тестову вибірки для навчання нейронної мережі моделі похибки термопар, вагові коефіцієнти та зміщення нейронів розробленої нейромережевої моделі похибки широко розповсюджених термопар типу ХА, а також акти впровадження результатів дисертаційних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів

В процесі виконання дисертаційної роботи здобувачем отримано нові результати, які складають наукову та практичну цінність. **Наукова цінність** результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в наступному:

1. Розроблено концепцію використання властивостей похибок термопар, що виникли через деградацію їх електродів при дії температури і часу експлуатації, для оперативного визначення похибок термопар у процесі їх експлуатації шляхом цілеспрямованої зміни профілю температурного поля вздовж їх електродів.
2. Розроблено оперативний метод визначення похибки від дрейфу функції перетворення термопар під час експлуатації без використання еталонних засобів і без необхідності утримання заданого профілю температурного поля з високою точністю шляхом максимального цілеспрямованого зміщення профілю температурного поля вздовж її електродів у сторону вільних кінців.
3. Розроблено критерій ступеня деградації ділянок електродів термопар – еквівалентний час їх експлуатації – який визначають шляхом опрацювання результатів вимірювання термоЕРС термопари, отриманих при цілеспрямованій поступовій зміні профілю температурного поля вздовж її електродів, що дало змогу розробити оперативний метод діагностування стану електродів термопари у процесі експлуатації без використання еталонних засобів.
4. Розроблено засіб керування профілем температурного поля вздовж електродів термопар, який, за рахунок можливості стабілізації профілю температурного поля вздовж стандартного термоелектричного перетворювача, не дає можливості проявити себе похибці його термопари від набутої термоелектричної неоднорідності, а, за рахунок цілеспрямованої зміни профілю температурного поля, дає змогу визначити похибки від дрейфу функції перетворення термопари та діагностувати стан її електродів розробленими оперативними методами.
5. Розроблено нейромережевий метод керування профілем температурного поля вздовж електродів термопари, який, за рахунок реалізації розімкнутої системи керування та високої точності прогнозу

необхідних змін потужності нагрівачів багатозонної печі, не схильний до самозбудження і забезпечує скорочення часу встановлення профілю температурного поля до одної, максимум двох ітерацій.

6. Розроблено метод побудови математичної моделі похибки віртуальних ділянок, на які розбита термопара, у вигляді навченої нейронної мережі, входами якої є температура та час постійної експлуатації ділянок, і температура, куди потрапили ці ділянки при зміні профілю температурного поля, шляхом формування додаткових векторів навчальної вибірки нейронної мережі за допомогою вдосконаленого методу найменших квадратів і врахування властивостей похибок від дрейфу функції перетворення термопар та від їх набутої термоелектричної неоднорідності, що дало змогу автоматизувати обчислення еквівалентного часу експлуатації термопар.

7. Розроблено структуру двоконтурної системи яка, за рахунок почергової зміни функцій своїх контурів (вимірювання та керування температурою / корекція похибок і діагностування стану електродів термопар розробленими методами), забезпечує високу точність корекції похибок кожного контуру регулювання та відсутність розхитування поточного контуру регулювання через зміни профілю температурного поля при реалізації розроблених оперативних методів визначення похибки термопари та діагностування стану її електродів.

8. Розроблено термоелектричний перетворювач, який, за рахунок додаткових електродів, дає змогу встановлювати задане поточне значення похибки своєї функції перетворення.

Отримали подальший розвиток:

9. Теорія явища зміни термоЕРС неоднорідної термопари при зміні профілю температурного поля вздовж її електродів, що дало змогу виявити процес "заміщення" похибки від дрейфу її функції перетворення похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності та запропонувати концепцію використання цього явища для визначення поточної похибки дрейфу функції перетворення термопар та оцінки деградації її електродів.

10. Метод найменших квадратів для апроксимації залежностей похибки віртуальних ділянок, на які розбита термопара, який, при використанні класичного методу найменших квадратів без вільного члена, примусово встановлює суму залишків рівною нулю за рахунок використання невизначених множників Лагранжа, що дає змогу отримати функції, які є математичним сподіванням залежностей похибок термопар від дрейфу функції перетворення їх ділянок та від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності.

Пріоритет всіх перелічених положень підтверджено отриманими автором патентами, а їх наукова цінність – працями, індексованими у наукометричних базах Scopus та Web of Science.

Практична цінність одержаних результатів полягає у наступному:

1. Відібрано схемотехнічні рішення, які, при використанні у високоточному вимірювальному каналі температури, забезпечують виконання умови, що після корекції похибок термопар їх невиключена похибка повинна залишитися домінуючою;
2. Розроблено конструктивну схему багатозонної печі з керованим профілем температурного поля та оцінено необхідну потужність її нагрівачів і час встановлення профілю температурного поля;
3. Розроблено конструкцію спеціалізованого термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, що використовує лише одну нестандартну деталь і забезпечує бездемонтажне діагностування стану електродів своєї термопари;
4. Вдосконалено метрологічний програмний тест каналу вимірювання температури, що дає змогу провести імітаційне моделювання розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;
5. Модернізовано стенд для експериментального дослідження розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;
6. Отримано результати експериментальних досліджень розроблених методів одночасного підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання температури.

Висвітлення результатів дисертації в опублікованих працях

За темою дисертації опубліковано 83 наукових праці, серед яких 43 статті, з них 20 входять до переліку фахових видань (з них одноосібних – 9), 11 індексовані у Scopus і у Web of Science, 5 лише у Scopus, 1 лише у Web of Science, 4 – у РИНЦ, 2 – у закордонних журналах. Патентів України – 8.

Апробація результатів дисертації

За матеріалами дисертації зроблено 32 доповіді на наукових конференціях, з них 4 індексовані у Scopus і у Web of Science, 8 лише у Scopus.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

У авторефераті стисло викладено всі основні результати, отримані у дисертації, а також повністю відображено сформульовані у ній наукові положення, висновки і рекомендації.

Використання у докторській дисертації наукових положень, на основі яких захищено кандидатську дисертацію

У докторській дисертації Кочана О.В. наукові положення і висновки, отримані у його кандидатській дисертації, на захист не виносяться. Всі

технічні рішення, що виносяться на захист, захищені патентами та працями, опублікованими після захисту кандидатської дисертації.

Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за яким вона представлена до захисту

Докторська дисертація Кочана О.В. та автореферат повністю відповідають паспорту спеціальності 05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка).

Оформлення дисертації

Докторська дисертація Кочана О.В. написана українською мовою на високому науково-професійному рівні, містить важливі наукові положення, які характеризуються новизною та корисністю, а також практичні результати, що можуть знайти застосування у промисловості, енергетиці та науково-дослідних організаціях. Рівень досліджень та глибина розгляду питань відповідає вимогам до докторських дисертацій. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам нормативних документів.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. При описі рис. 2.9 дисертації та рис. 3 автореферату має йти мова про переміщення профілю температурного поля, а не віртуальної точки термоелектрода.
2. Автор у Додатку С показав неможливість застосування коефіцієнта детермінації для оцінки якості поліноміальних регресій без вільного члена. Однак таке твердження є важливим теоретичним результатом. Тому слід було би ввести його у основний текст дисертації та запропонувати інший критерій.
3. Якість розробленої математичної моделі впливу основних факторів деградації термоелектричних перетворювачів на генеровану термоЕРС характеризується лише максимальною абсолютною похибкою. Доцільно для оцінки якості моделі використати також дисперсію та середньоквадратичне відхилення.
4. У тексті дисертації часто ігноруються відмінності між коефіцієнтом Зеебека і питомою термоЕРС.

Загальний висновок

Вказані вище зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації Кочана О.В. і не зменшують її наукову новизну та практичну значимість.

Сформульовані у цій дисертації наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у наукових працях, опублікованих як в

українських, так і зарубіжних фахових виданнях, доповідалися на міжнародних конференціях.

Дисертація Кочана О.В. є завершеною науковою працею, що присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення точності, метрологічної надійності та автономності, а також економічної ефективності вимірювання підвищених температур. У дисертації приведено нові, самостійно отримані автором, науково обґрунтовані, широко опубліковані та апробовані результати його досліджень.

Робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин. За сукупністю отриманих наукових результатів, їх актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю та достовірністю ця дисертація 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 – Прилади та методи вимірювання теплових величин.

Офіційний опонент

головний науковий співробітник

Інституту термоелектрики НАН та МОН України,

доктор фізико-математичних наук

старший науковий співробітник



Л.М. Вихор

Підпис док. фіз.-мат.наук, ст.наук.спів. Вихор Л.М. засвідчую

вчений секретар Інституту

термоелектрики НАН та МОН України



Л.П. Лавська

08.09.2020 р., м. Чернівці