

## ВІДЗИВ

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. Термоелектричні перетворювачі на сьогодні є одним з найбільш розповсюдженими давачами температури. Це зумовлено їх широким діапазоном вимірювання, простотою конструкції та використання, легкою доступністю і невисокою вартістю. Однак щодо до точності вимірювання температури – претензії до термоелектричних перетворювачів виникали вже давно. Це привело до появи цілого ряду досліджень, які велися в основному у двох напрямках – створення нових сплавів для термоелектричних перетворювачів та розроблення методів корекції їх похибок. Незначні досягнення в обох випадках привели до того, що Європейська асоціація національних метрологічних інститутів ЄВРАМЕТ систематично включає проблему розроблення нових термоелектричних перетворювачів вищої точності у свої дорожні карти.

Однією з найбільших проблем при підвищенні точності термоелектричних перетворювачів є деградація їх електродів при тривалому вимірюванні високих температур. При цьому виникають похибки від дрейфу функції перетворення та від набутої термоелектричної неоднорідності. Коли методи корекції першого виду доволі добре досліджені, то методи корекції другої похибки значно менш відомі. Але прояви похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ведуть до різкого зменшення ефективності корекції похибки від дрейфу функції перетворення термоелектричних перетворювачів. Тому дисертація Кочана Ореста Володимировича “Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами”, яка вирішує проблему ефективної корекції похибок термоелектричних перетворювачів, є цілком актуальною.

Структура дисертації та зміст її розділів. Дисертація Кочана О.В. складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків.

У першому розділі розглянуто похибки вимірювання температури термоелектричними перетворювачами при впливі набутої термоелектричної неоднорідності їх електродів як наслідку їх деградації під час тривалої експлуатації при вимірюванні підвищених температур (від 600 до 1100°C).

Також на прикладі теплової електростанції показано можливий значний економічний ефект від підвищення точності вимірювання температури.

У другому розділі обґрунтовано концепцію підвищення точності вимірювання температури за допомогою неоднорідних термопар за рахунок "опорної ділянки" у складі термоелектричного перетворювача, яка прилягає до його вільних кінців і практично не деградує, бо експлуатується при температурі вільних кінців. Це дало змогу розробити оперативний метод визначення поточної похибки термоелектричного перетворювача на місці його експлуатації без її переривання та без використання еталонного обладнання. Теоретичною основою методу було дослідження поведінки неоднорідної термопари у температурних полях змінного профілю, яке дало змогу виявити процес взаємного перетворення похибки від дрейфу функції перетворення у похибку від набутої термоелектричної неоднорідності при зміщенні зони градієнту профілю температурного поля від поля постійної експлуатації у сторону вільних кінців. Зроблені теоретичні висновки підтверджені шляхом комп'ютерного моделювання, де показано, що сума похибок від дрейфу функції перетворення та від набутої термоелектричної неоднорідності завжди рівна їх однаковим максимальним значенням. Оцінка похибки вимірювання температури при використанні пропонованого оперативного методу визначення поточної похибки термоелектричного перетворювача показала, що вона не перевищує 1,1 - 1,3°C.

У третьому розділі, на базі проведених у другому розділі теоретичних досліджень, розроблено оперативний метод діагностування стану електродів термоелектричних перетворювачів без переривання їх експлуатації. Як міру ступеня деградації електродів термоелектричних перетворювачів запропоновано еквівалентний час експлуатації, що врахує невідповідність швидкості їх деградації в умовах експлуатації та в умовах дослідження, за результатами яких було побудовано усереднену математичну модель їх похибки. Для визначення цього часу запропоновано вимірювати термо-е.р.с. термоелектричного перетворювача у наборі профілів температурного поля, що формуються шляхом поступового зміщення профілю температурного поля у сторону його вільних кінців. За результатами вимірювання складають систему лінійних рівнянь, рішення якої дає змогу оцінити дійсну швидкість деградації окремих ділянок електродів термоелектричного перетворювача та оцінити необхідність його заміни.

У четвертому розділі розроблено засоби, що забезпечують реалізацію запропонованих у попередніх розділах оперативних методів. Зокрема, розроблено багатозонну трубчасту піч, яка дає змогу потрібної зміни профілю температурного поля, нейромережевий метод керування профілем температурного поля цієї багатозонної трубчастої печі, який не схильний до самозбудження, та багатомірну нейромережеву модель похибки термопар, що враховує вплив основних впливаючих величин – температури і часу експлуатації та зміни профілю температурного поля при експлуатації. На основі цих та інших відібраних кращих технічних рішень розроблено



структури двоконтурних систем вимірювання температури. Їх особливістю є те, що вони не змінюють структури та умов роботи існуючих регуляторів об'єктів вимірювання температури, а лише коригують похибку їх давача – термоелектричного перетворювача.

У п'ятому розділі проведено експериментальні дослідження розроблених оперативних методів та обладнання для їх реалізації. Для забезпечення коректності експериментальних досліджень модернізовано стенд для їх проведення, запропоновано термоелектричний перетворювач, похибку якого під час дослідження можна змінювати відомим чином, та розроблено методики дослідження, що не вимагають еталонного обладнання через використання відносних вимірювань. За результатами цих досліджень зроблено висновок про те, що запропоновані методи можуть одночасно підвищити єдність, точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів у важливому для енергетики та промисловості діапазоні температур 600 - 1100°C.

У висновках стисло і коректно викладено основні результати дисертації. У додатках подано дослідження вдосконаленого методу найменших квадратів, навчальну та тестову вибірки для навчання нейронної мережі моделі похибки термоелектричних перетворювачів, вагові коефіцієнти та зміщення нейронів нейромережової моделі похибки широко розповсюджених термоелектричних перетворювачів типу ХА та акти впровадження результатів дисертаційних досліджень.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій. Основні результати, отримані здобувачем, у достатній мірі обґрунтовані аналітично, комп'ютерним моделюванням та експериментальними дослідженнями. Отримані в процесі дисертаційних досліджень наукові результати є новими, а сама дисертація є закінченою науковою працею, яка вирішує важливу наукову і практичну проблему підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів у важливому для енергетики та промисловості діапазоні температур 600 - 1100°C.

Наукова новизна отриманих результатів. При виконанні дисертації здобувачем отримано нові результати, які мають наукову новизну та практичну цінність.

Серед важливих наукових результатів відмітимо такі:

1. Оперативне визначення похибок термопар в процесі їх експлуатації шляхом зміни профіля температурного поля вздовж їх електродів.
2. Запропонований оперативний метод визначення похибки від драйверу функції перетворення термопари під час експлуатації.
3. Розроблено нейромережовий метод керування профілем температурного поля вздовж електродів термопари.

4. Запропоновано метод встановлення функції перетворення термоелектричного перетворювача, що дає змогу експериментально підтвердити адекватність пропонованих методів.

Пріоритет всіх перелічених положень підтверджено патентами України, отриманими автором, 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 ефективності вимірювання температури.

Висвітлення результатів дисертації в опублікованих працях. За темою дисертації Кочан О.В. опублікував 83 наукових праці, серед яких 43 статті, з них 20 входять до переліку фахових видань України (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. Отримано вісім патентів України.

Наукові праці Кочана О.В. відомі спеціалістам.

Апробація результатів дисертації. За темою дисертації Кочан О.В. зробив 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 і коректно викладено всі основні результати, отримані у дисертації, а також повністю відображено сформульовані у ній наукові положення, висновки і рекомендації.

Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за яким вона представлена до захисту. Докторська дисертація Кочана О.В. та її автореферат повністю відповідають паспорту спеціальності 05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка).



Оформлення дисертації. У цілому докторська дисертація Кочана О.В. написана українською мовою на високому науково-професійному рівні. Вона містить наукові положення, які мають наукову новизну та практичну цінність. Її результати можуть знайти застосування у енергетиці, промисловості та при науково-дослідних дослідженнях. Рівень проведених досліджень та глибина розгляду питань відповідає вимогам до докторських дисертацій. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам нормативних документів.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Не оцінено методичну похибку, викликану відхиленням температури калібрування термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля перед експлуатацією від вимірюваної температури під час експлуатації.
2. Не визначено обчислювальні ресурси, необхідні для реалізації запропонованих оперативних методів та методу керування профілем температурного поля.
3. Для оцінки еквівалентного часу експлуатації термоелектричного перетворювача використано лінійну інтерполяцію або екстраполяцію, яка має доволі низьку точність.
4. Основним методом підвищення точності, який запропонований у даній дисертації, є оперативний метод визначення поточної похибки термоелектричного перетворювача. Однак у термоелектричному перетворювачі із самодіагностуванням цей метод не може бути застосований. Тому у даному випадку можна говорити лише про підвищення метрологічної надійності.
5. Не показано, як використовується отримана математична модель похибки термоелектричного перетворювача.
6. Результати, отримані в дисертації відносяться тільки для термоелектричної неоднорідності електродів, в той же час не розглянута часова деградація електродів, яка, звичайно, вносить свій вплив в точність вимірювань.
7. Автор вільно поводить із терміном «метрологічне забезпечення». Так параграф 1.3 «Оцінка стану метрологічного забезпечення температурних вимірювань» зовсім не містить в змістовному сенсі класичного метрологічного забезпечення.
8. В сучасній метрологічній практиці перейшли на концепцію невизначеності замість похибок. Це так же важливо, тим більше, що робота виконувалась в науково-технічній співпраці з іноземними організаціями.
9. При викладенні матеріалу дисертації є стилістичні похибки. Так, наприклад, автор вживає термін «еталон Кельвіна» замість «еталон одиниці Кельвіна» та інше.

Загальний висновок. Приведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації Кочана О.В., не зменшують її наукову новизну та практичну цінність.

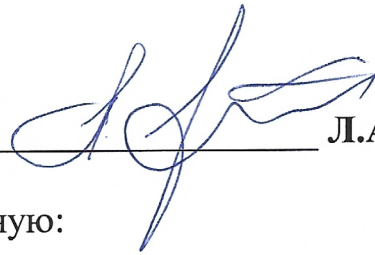
Сформульовані у дисертації Кочана О.В. наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у наукових працях, які опубліковані в українських і зарубіжних фахових виданнях, вони доповідалися на українських і міжнародних конференціях.

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 дисертація Кочана О.В. 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**

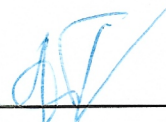
**головний науковий співробітник  
Національного наукового центру  
«Інститут метрології»  
Мінекономрозвитку України,  
лауреат державної премії України  
в галузі науки та техніки,  
доктор технічних наук, професор**



**Л.А. Назаренко**

Підпис професора Назаренка Л.А. засвідчую:

**Заступник генерального директора  
Національного наукового центру  
«Інститут метрології»  
Мінекономрозвитку України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор**



**О.В. Прокопов**