

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора,
професора кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
Національного університету "Львівська політехніка"

Скоропада Пилипа Ізидоровича

на дисертацію *Рокоманюк Марії Василівни* на тему «Розроблення чутливих елементів перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка в галузі знань 15 - Автоматизація та приладобудування

1. Актуальність теми роботи

Температура вважається однією з фундаментальних термодинамічних характеристик, що лежить в основі багатьох промислових параметрів, підтримання якої в певних межах та з певною точністю, є необхідним для досягнення оптимального перебігу термодинамічних процесів, як у наукових дослідженнях, так і у виробничій сфері. З розвитком різноманітних сфер виробництва та автоматизованих систем керування зростають вимоги до термометрії в царині підвищення метрологічної достовірності температурних вимірювань, зокрема, вимірювання наднизьких температур з високою точністю. Все більшої актуальності набуває контроль температурних параметрів у складних і специфічних умовах, таких як космічний простір, ядерна енергетика, хімічна та металургійна промисловості. Щоб задовольнити ці зростаючі вимоги необхідно постійно вдосконалювати як методи, так і засоби термометрії.

Актуальність дослідження полягає у розвитку засобів температурних вимірювань і методів моделювання їхніх метрологічних характеристик (зокрема, функцій перетворення) шляхом використання новітніх термометричних матеріалів для створення чутливих елементів термоперетворювачів опору та термоелектричних перетворювачів з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками в широкому температурному діапазоні.

2. Аналіз структури та змісту дисертації

Дисертаційна робота Рокоманюк М.В. складається із анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність і необхідність дисертаційного дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, методологічну основу, сформульовано мету, основні завдання, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Представлено особистий внесок здобувача, надано відомості про публікації та апробацію основних результатів дослідження, а також інформацію про їх впровадження, зазначено структуру роботи.

У першому розділі проведено огляд існуючих методів та засобів температурних вимірювань з використанням термоелектричних перетворювачів та термоперетворювачів опору на основі напівпровідникових чутливих елементів. Показано термоперетворювачі опору на базі традиційних напівпровідників забезпечують високу чутливість і стабільність лише в обмеженому температурному діапазоні. У магнітних середовищах вони малопридатні через вплив зовнішнього поля на термометричні характеристики. Водночас термоелектричні перетворювачі на класичних матеріалах мають низьку добротність і схильні до структурної деградації в екстремальних умовах.

Зроблено висновок, що розширення діапазону температурних вимірювань, підвищення чутливості, температурної та часової стабільності термоперетворювачів опору та термоелектричних перетворювачів пов'язане з пошуком нових матеріалів чутливих елементів та забезпеченням однозначності їхніх термометричних характеристик. Аналіз сучасних методів та засобів вимірювань дозволив Рокоманюк М.В. сформулювати мету та завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі описано теоретичні та експериментальні методи дослідження, що використані в роботі. Моделювання властивостей чутливих елементів термоперетворювачів передбачає розрахунок структурних, термодинамічних, енергетичних, електрокінетичних та магнітних властивостей новітніх термометричних матеріалів. Вказано, що сучасні методи комп'ютерного моделювання властивостей чутливих елементів перетворювачів температури, а також експериментальні вимірювання особливостей їхньої кристалічної структури, температурних залежностей кінетичних та магнітних властивостей у широкому температурному діапазоні сприяє забезпеченню достовірності

отриманих результатів дослідження. Запровадження розрахунків лінійним методом приєднаних плоских хвиль (FLAPW) забезпечило високу точність отриманих результатів.

У *третьому розділі* подано результати моделювання та експериментальні дослідження чутливих елементів термоперетворювачів виготовлених на основі напівпровідникових матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$. Комплексне вивчення їхніх структурних, енергетичних, електрокінетичних та магнітних характеристик дозволило визначити умови за яких електрокінетичні характеристики чутливих елементів є прогнозованими та стабільними до температурних та часових змін. Дослідження часової стабільності проводилось в діапазоні 80 -1300 К шляхом багаторазових циклів нагрів-охолодження, та встановлено, що відхилення температур, визначених за електроопором і термо-ерс, не перевищувало $\pm 0,045$ К.

У *четвертому розділі* наведено результати дослідження реалізації та термометричні характеристики чутливих елементів перетворювачів температури на основі матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$. Матеріали продемонстрували високу чутливість і стабільність у діапазоні 4,2 - 1300К, що підтверджує їх придатність для створення чутливих елементів термоперетворювачів опору та термоелектричних перетворювачів. Зокрема, завдяки здатності матеріалу $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$ змінювати знак термо-ерс в залежності від концентрації домішки, дає змогу отримати термоелектроди обох знаків для термоелектричної термометрії (дві вітки термопар з різними знаками).

Висновки за результатами виконання дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Список використаних джерел складає 111 найменувань та свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано сучасні результати наукових досліджень. Робота включає також додатки.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація Рокоманюк М.В. відповідає науковому напрямку кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»: "Теоретичні та прикладні основи метрології і вимірювань в ІТ (інформаційно-вимірювальних, кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах) та згідно плану виконання науково-дослідної роботи МОН України за фаховим напрямом "Метрологія та інформаційно вимірювальна техніка" – "Дослідження температурної та

часової стабільності і відтворюваності характеристик чутливих елементів термоперетворювачів на основі $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$ " (2020-2024 рр., № 0120U100693).

4. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Нижче наведено основні наукові результати дисертанта:

- Розвинуто принципи отримання чутливих елементів перетворювачів температури з новітніх термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$ з наперед заданими характеристиками (функціями перетворення) шляхом запровадження моделювання властивостей досліджених термометричних матеріалів лінеаризованим методом приєднаних плоских хвиль (FLAPW) та циклічного покрокового корегування початкових умов моделювання з параметрами експериментальних вимірювань функцій перетворення, що дозволило підвищити точність моделювання і отримати чутливі елементи перетворювачів температури з покращеними метрологічними та експлуатаційними властивостями.

- Уперше встановлено закономірності функцій перетворення чутливих елементів перетворювачів температури з покращеними метрологічними характеристиками на основі досліджених новітніх термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$ у температурному діапазоні 4,2÷1300 К.

- Розвинуто метод отримання серії чутливих елементів термоелектричних перетворювачів на основі термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$ шляхом побудови термоелектричної пари з використанням новітніх термометричних матеріалів: (1) з електронним типом провідності та (2) з дірковим типом провідності, що дозволяє збільшити чутливість у ~ 5 разів та розширяє діапазон температурних вимірювань.

- Розвинуто метод отримання серії термічно стабільних чутливих елементів термоперетворювачів опору з новітніх термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$, що розширяє діапазон та підвищує точність температурних вимірювань.

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, є достовірними, містять наукову новизну і є індивідуальним внеском дисертанта.

5. Практичне значення одержаних результатів.

Наукові положення, висновки та рекомендації сформульовані в дисертаційному дослідженні, становлять вагомий внесок у формування науково-технологічних засад моделювання та отримання нових чутливих елементів перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$ зі стабільними і відтворюваними характеристиками у широкому діапазоні температур.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені та використовуються в ПрАТ НВО "Термоприлад", м. Львів, Акт про впровадження від 20.12.2024 р.; АТ "Львівський хімічний завод", м. Львів, Акт про впровадження від 09.01.2025 р.; ТОВ «Теплософт», м. Львів, Акт про впровадження від 23.03.2023р. та ТОВ «Репласт» м. Львів, Акт про впровадження від 24.04.2023р.; у навчальному процесі та при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Акт про впровадження від 15.04.2025р.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

За результатами аналізу дисертації на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Рокоманюк Марії Василівни є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, плагіату чи запозичень, і відповідає принципам академічної доброчесності. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

7. Дискусійні положення та зауваження до дисертації

Дисертаційна робота є цілісним і змістовним науковим дослідженням, однак окремі положення потребують уточнення або додаткового обґрунтування:

1. Не зовсім зрозуміло чи проводилось дослідження стабільності та відтворювальності характеристик отриманих чутливих елементів в умовах експлуатації в агресивних середовищах, зокрема під впливом іонізуючого випромінювання чи підвищеної вологості. Проведення таких досліджень могло б розширити можливості практичного застосування чутливих елементів термоперетворювачів.
2. У четвертому розділі доцільно було б детальніше описати технологічний процес виготовлення двох віток термопари з термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, які у залежності від концентрації домішкових атомів Sc можуть мати додатні або

від'ємні значення коефіцієнта термо-ерс. Це дозволило б оцінити функціональні переваги таких термопар.

3. Недостатньо детально описано умови термоцилювання чутливих елементів. Доцільно було б навести додаткову інформацію щодо режимів термообробки, вказати швидкість нагріву та охолодження, а також середовище в якому проводилися цикли (вакуум, інертна атмосфера, повітря).
4. У дисертаційній роботі трапляються окремі граматичні та стилістичні неточності, які не впливають на науковий зміст, однак варто врахувати їх у майбутніх публікаціях автора.

Варто зазначити, що наведені зауваження та дискусійні положення не впливають на загальну позитивну оцінку та значущість проведеного наукового дослідження. Вказані зауваження щодо представленого дослідження не знижують вагомість одержаних у роботі наукових та практичних результатів не змінюють позитивної оцінки.

8. Загальні висновки та оцінка дисертації

Дисертація Рокоманюк Марії Василівни на тему «Розроблення чутливих елементів перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів» виконана на високому науковому рівні, містить наукові результати досліджень та є завершеною, виконаною самостійно кваліфікаційною науковою працею. В роботі обґрунтовано та реалізовано нове вирішення важливого науково-технічного завдання - підвищення точності та стабільності температурних вимірювань у широкому температурному діапазоні, шляхом отримання чутливих елементів перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Sc_xCoSb$, $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ та $TiCo_{1-x}Mn_xSb$ які характеризуються покращеними метрологічними та експлуатаційними властивостями та запровадження сучасних методів моделювання їхніх властивостей.

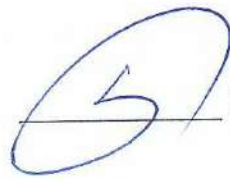
Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у наукових статтях, опублікованих у фахових виданнях, доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях та захищені Патентом України на корисну модель.

З огляду на актуальність проблеми, вкладу автора у вирішення поставленого завдання, відсутності порушень академічної доброчесності вважаю, що дисертація цілком відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року "Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про

присудження ступеня доктора філософії”, а здобувачка Рокоманюк Марія Василівна, заслуговує присудження їй ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка із галузі знань 15 - Автоматизація та приладобудування.

Рецензент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційно-
вимірвальних технологій
Національного університету
"Львівська політехніка"



Пилип СКОРОПАД

Підпис д.т.н., професора Пилипа СКОРОПАДА
"ЗАСВІДЧУЮ"

Вчений секретар Національного університету
"Львівська політехніка"

" 10 " 06 2025р.



Роман БРИЛИНСЬКИЙ