

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Кочан Орест Володимирович



УДК 536.532

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ
ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ З НЕОДНОРІДНИМИ ТЕРМОПАРАМИ**

05.11.04 – Прилади і методи вимірювання теплових величин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки, України, м. Львів

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Микийчук Микола Миколайович,
директор Інституту комп’ютерних технологій, автоматики та
метрології Національного університету «Львівська політехніка», м.
Львів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Назаренко Леонід Андрійович,
головний науковий співробітник Національного наукового центру
“Інститут метрології”, м. Харків


доктор технічних наук, професор
Куц Юрій Васильович,
професор кафедри приладів та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету “Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Вихор Людмила Миколаївна,
головний науковий співробітник [Інституту термоелектрики](#), м.
Чернівці

Захист відбудеться 25 вересня 2020 р. о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті "Львівська політехніка" за
адресою 79013, м. Львів, вул. С.Бандери 12,
ауд 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету
"Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “ 25 ” серпня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради д. т. н.,  професор

Луцик Я.Т.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Ефективність термоагрегатів визначають у значній мірі точність та метрологічна надійність вимірювань їх температури. Тому вимоги до них невідмінно зростають. Особливо важливим є діапазон підвищених температур 600...1100°C, де використовують оптичні пірометри, термоелектричні перетворювачі (ТЕП) на базі термопар (ТП) як чутливих елементів та платинові термометри опору, а також нові методи – термошумові, ультразвукові та лазерні.

Хоча інструментальні похибки оптичних пірометрів малі, їх точність, через методичні похибки, викликані спектром випромінювання об'єкта і домішками у проміжному середовищі, реалізується лиш у лабораторіях. Платинові термометри опору випускають для температур до 650°C (при вищих температурах вони мають значний дрейф), а низькоомні – не випускаються. Ультразвукові термометри серійно не випускаються. Шумова термометрія, через малу швидкодію, має великі динамічні похибки. Лазерні методи мають малу точність. Тому ТЕП на базі ТП на сьогодні єдині давачі, легко доступні для вимірювання підвищених температур. Але аналіз показав, що похибки основних типів ТП, запропонованих 50-100 років тому, майже не змінилися. ТП на базі аморфних матеріалів та інтерметалічних напівпровідників не набули поширення, а методи стабілізації ТП не ліквідують деградації їх електродів при експлуатації. Головними причинами похибками ТП є:

1. початкові відхилення функції перетворення (ФП) від номінальної;
2. деградація електродів ТП під час тривалої експлуатації при високих температурах, яка проявляє себе як:
 - а. дрейф ФП ТП – поступова зміна ФП ТП при тривалій експлуатації;
 - б. похибка від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП.

Початковий розхил ФП ТП коригують за результатами визначення похибки (ВП). Відомі методи високоточної корекції дрейфу ФП ТП шляхом побудови індивідуальної нейромережевої моделі за даними ВП на місці експлуатації за допомогою еталонної ТП або репера температури згідно схеми передачі значення еталону Кельвіна. Ці методи мають високу точність і метрологічну надійність, але лише для об'єктів з високою стабільністю профілю температурного поля. Метод визначення похибки ТП при пропусканні через них струму (ефект Пельтьє змінює температуру з'єднаної), як показано далі, має значні похибки.

При зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП виникає похибка від набутої термоелектричної неоднорідності. Про похибку від неоднорідності електродів ТП відомо вже понад 110 років. Вона проявляє себе як залежність генерованої ТП термо-е.р.с. від змін профілю температурного поля вздовж електродів при сталих температурах з'єднаної і вільних кінців. Сучасна технологія широко вживаних ТП із неблагородних металів забезпечує початкову термоелектричну неоднорідність не більше 1-1,5°C. Але деградація електродів ТП при тривалій експлуатації при високих температурах веде до наростання набутої термоелектричної неоднорідності, яка сягає 11 і навіть 30°C. А зміни профілю температурного поля характерні для великих термоагрегатів, що стоять окремо. Сучасні вимірювальні системи не фіксують змін профілю температурного поля, тому цю похибку вважають дуже небезпечною, називають "скринька Пандори", вказують на її небезпеку, забороняють ВП ТЕП і ТП, які були в експлуатації.

Вдосконаленням ТЕП і ТП займалися школа Львівської Політехніки, НВО «Термоприлад» (м. Львів), інститут «Гипроцветметобработка» (м. Москва, Росія), компанії ЕДЛ (м. Денвіл, США), «Термоелектра» (м. Пійнакер, Нідерланди), «Айсотеч» (м. Саутпорт, Англія), Тестемп (м. Літлхемптон, Англія), Нінгбо Електрік Еплаенс (м. Чжецзян, Китай), Пентронік (м. Вестервік, Швеція), Роегі (м. Ізерлон, Німеччина), Пиріндус (м. Брюссель, Бельгія), Юст Сенсор Технік (м. Ухань, Китай), Джуліані Джузеппе (м. Мезеро, Італія), «Тесей» (м. Обнінск, Росія). Але нині все ще не випускаються прилади і системи з корекцією похибок ТП. Виробники приладів масово випускають прилади невисокої точності (посилаючись на те, що сенсори мають ще набагато більші похибки) або високоточні прилади вимірювання термо-е.р.с., а не температури.

Таким чином, на сьогодні у вимірювальному каналі (ВК) домінують похибки ТП. Це показують аналіз науково-технічних видань і конференцій (ТЕМРМЕКО) та дорожні карти Європейської асоціації національних метрологічних інститутів. Проблема була включена у дорожню карту 2009р., але у карті 2014р. сказано, що «перша карта іноді мала оптимістичний погляд», прогресу майже не досягнуто, проблема залишається включеною у список актуальних проблем термометрії».

Таким чином, виробники не хочуть нормувати високу точність вимірювання саме температури, незважаючи на відомі методи корекції похибок ТП тому, що вони появились недавно, мало досліджені та доволі трудомісткі. Постановка проблеми створення "точних термопар" та "стійких термопар" у дорожніх картах, підкреслює актуальність створення точних систем вимірювання температури ТЕП з неоднорідними ТП. Крім того, висока трудомісткість корекції похибок ТП накладає вимогу – невиключена похибка ТП має надалі домінувати у ВК.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана в рамках: Дорожніх карт Європейської термометрії Європейської асоціації національних метрологічних установ (ЄВРАМЕТ) у 2009 і 2014 роках; науково-дослідної теми Функціональні наноматеріали для адаптивного роботизованого інформаційно-вимірювального комплексу оборонного спрямування (2019-2020р., № держреєстрації 0119U100435); гранту фонду докторантських наукових досліджень Університету технології провінції Хубей (№ BSQD14037). У їх виконанні здобувач приймав участь як безпосередній виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є створення методів і засобів, які забезпечують одночасне підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності вимірювання підвищених температур засобами термоелектричної термометрії за рахунок нових оперативних методів визначення похибки термопар та діагностування стану її електродів у процесі експлуатації.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1) провести аналіз єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності сучасних методів та засобів вимірювання підвищених температур ТЕП та вибрати напрям подальших досліджень;

2) створити концепцію одночасного забезпечення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності вимірювання підвищених температур неоднорідними ТП у промислових умовах;

3) розробити та дослідити оперативний метод визначення похибки ТП на місці

їх експлуатації без необхідності використання еталонних засобів;

4) розробити і дослідити оперативний метод діагностування стану електродів ТП на місці експлуатації без необхідності використання еталонних засобів;

5) розробити методи та засоби апаратного, математичного та алгоритмічного забезпечення розроблених оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації;

6) розробити структуру підсистеми вимірювання температури у системі її керування, яка під час експлуатації одночасно підвищує єдність, точність, метрологічну надійність і ефективність шляхом використання розроблених оперативних методів визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів;

7) розробити обладнання для проведення експериментальних досліджень розроблених перелічених вище оперативних методів та провести ці дослідження;

8) провести аналіз покращення єдності, точності, метрологічної надійності та ефективності засобів вимірювання підвищених температур ТЕП за допомогою розроблених оперативних методів.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання температури ТЕП.

Предмет дослідження – науково-технічні засади підвищення точності термоелектричної термометрії.

Наукова новизна

1) Вперше запропоновано нову концепцію бездемонтажного калібрування термоелектричного перетворювача для успішної реалізації якої необхідно і достатньо виділити на його термоділянці ділянку, в межах якої не відбуваються деградаційні зміни питомої термо-е.р.с., що дає змогу використати цю ділянку для оперативного визначення похибки шляхом цілеспрямованого переміщення зони температурного градієнту у сторону опорної ділянки.

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

3) Вперше запропоновано оперативний метод визначення похибки термоелектричного перетворювача у процесі експлуатації, зумовленої дрейфом функції перетворення термоділянки, за допомогою опорної ділянки шляхом цілеспрямованого зміщення зони температурного градієнту таким чином, щоб цей градієнт був прикладений лише до опорної ділянки термоділянки.

4) Вперше запропоновано оперативний метод діагностування стану електродів термоділянки під час експлуатації, який, через цілеспрямовані зміни температурного поля вздовж її електродів, дає змогу визначити шляхом рішення системи лінійних рівнянь за методом сукупних вимірювань питомої термо-е.р.с. віртуальних ділянок, на які розбита термоділянка та визначити ступінь їх деградації, щоб зробити обґрунтований висновок про придатність термоділянки для подальшої експлуатації.

5) Вперше запропоновано метод керування профілем температурного поля за допомогою штучної нейронної мережі нехильний до самозбудження, що забезпечує зменшення тривалості встановлення заданого профілю температурного поля до однієї-двох ітерацій завдяки реалізації розімкнутої системи керування та навчання нейронної мережі безпосередньо на об'єкті керування.

6) Набула подальшого розвитку модель похибки термопар, яка описує залежність похибки термопар від температури та тривалості експлуатації, а також значення температури після зміни профілю температурного поля, що дозволяє спрогнозувати термін придатності термопар до використання.

7) Вперше 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.

8) Вперше запропоновано метод встановлення функції перетворення термоелектричного перетворювача за рахунок введення двох додаткових виводів термопар, що дає змогу експериментально підтвердити ефективність пропозованих методів.

Практична цінність

1) Відібрано схемотехнічні рішення, які, при використанні у високоточному вимірювальному каналі температури, забезпечують виконання умови, що після корекції похибок ТП її невиключена похибка повинна залишитися домінуючою;

2) Розроблено конструктивну схему багатозонної печі з керованим профілем температурного поля, оцінено необхідну потужність її нагрівників і час встановлення профілю температурного поля;

3) Розроблено конструкцію спеціалізованого ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПП), що використовує лише одну нестандартну деталь і забезпечує оперативне діагностування стану своїх електродів;

4) Вдосконалено метрологічний програмний тест каналу вимірювання температури, що дає змогу провести імітаційне моделювання розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

5) Модернізовано спеціалізований стенд для експериментального дослідження розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

6) Отримано результати експериментальних досліджень розроблених методів підвищення точності вимірювання температури;

7) Показано, що метод визначення термо-е.р.с. ТП на базі ефекту Пельтьє вимагає дуже високої точності вимірювання термо-е.р.с. ТП та дає змогу оцінити поточні значення похибки ТП лише у зоні її злуту, а не у зоні, яка потрапляє у максимальний градієнт температурного поля та генерує основну термо-е.р.с.

Результати дисертації впроваджено у компанії TPV Display Technology (Wuhan) Co., Ltd міста Ухань, провінція Хубей, Китайська Народна Республіка (акт № 1946/03 від 20.03.2019), у Приватному акціонерному товаристві «СКБ мікроелектроніки у приладобудуванні» (від 12.09.2019) та 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).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації обґрунтовані коректним використанням математичного апарату та достатньою повнотою теоретичних та експериментальних досліджень. Їх достовірність підтверджена розробленням відповідних методик досліджень та хорошою

збіжністю результатів експериментів з результатами теоретичних оцінок.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати дисертації, представлені до захисту, отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать постановка задач, концепції та принципи побудови сенсорів і систем, розробка методів і методик експериментальних досліджень, побудова математичних моделей, принцип оптимізації функції найменших квадратів з накладанням додаткової умови рівності нулю суми залишків, комп'ютерне моделювання, основні математичні викладки, аналіз результатів. Зокрема, у [19, 24, 30, 35, 39, 44, 50, 55, 57, 60, 61, 63, 65, 66, 70] – опрацювання результатів імітаційних досліджень; [14, 45] – методика досліджень невиключеної похибки неоднорідності ТЕП з КПТП; [1, 42, 71, 75] – структура метрологічного програмного тесту; [2, 13] – методика дослідження впливу нерівномірності та швидкості дрейфу ТП на корекцію їх похибки від набутої неоднорідності; [3] – методика дослідження впливу швидкості процесу дрейфу ФП ТП на корекцію їх похибки від набутої неоднорідності; [4, 51, 54, 58, 59] – принцип пошуку оптимуму функції найменших квадратів з накладанням додаткової умови рівності нулю суми залишків; [15, 16, 25, 46, 47] – побудова моделі дрейфу ФП ТП засобами регресійного аналізу; [48, 49, 56, 83] –нейромережевий метод керування профілем температурного поля; [12, 33, 62, 77] – структура багатозонної печі; [11, 76] – метод визначення похибки ТЕП на місці експлуатації; [26, 28] – класифікація методів зменшення похибки ТЕП; [32, 64] – методика експерименту і математична модель; [29, 31] – метод корекції похибки від набутої неоднорідності електродів ТП; [34, 67] – метод діагностування електродів ТП; [43, 68, 69] – методика застосування нейронних мереж для корекції похибок ТП; [36] – створення математичної моделі; [41, 72, 82] – структура двоконтурної системи вимірювання температури; [73, 80, 81] – метод встановлення заданої похибки ТП; [38, 74] – розроблення теоретичних основ оцінки стану електродів ТП; [8, 21, 23, 78] – метод зменшення впливу завод загального виду; [20, 22] – аналіз причин виникнення похибки від набутої неоднорідності електродів ТП.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних у дисертації досліджень доповідалися та обговорювалися на 23 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, симпозиумах та семінарах: "International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems" IDAACS'2011 - IDAACS'2017 (Praha, Czech Republic, 2011; Berlin, Germany, 2013; Warsaw, Poland, 2015; Bucharest, Romania, 2017); Міжнародна науково-технічна конференція "Температура" (Львів 2012); Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології" (Тернопіль, 2013, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція "Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань" (Львів, 2013); "International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2014" (Lviv-Slavske, 2014); "Dynamical system modeling and stability investigation: XVI International Conference on Modeling and Stability" (Kyiv, 2013); "15-та міжнародна наукова конференція ім. акад. Михайла Кравчука" (Київ, 2014); Міжнародна науково-координаційна нарада "Інформаційні проблеми

комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління ICSM-2014" (Тернопіль, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми сучасної електротехніки" ПСЕ2014-ПСЕ2016 (Київ, 2014, 2016); 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety (Warsaw, Poland, 2014). "International Conference "Measurement", Measurement-2015 – Measurement-2017 (Smolenice, Slovakia, 2015, 2017); "Перший науковий семінар: Кіберфізичні системи: досягнення та виклики" (Львів 2015); XVI міжнародна науково-технічна конференція "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах ВОТТП-2016" (Одеса (Затока), 2016); "16th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2016" (Gyeongju, Korea, 2016); "IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems" (Sofia, Bulgaria, 2016); "International conference Energy, Environment and Material systems (EEMS)" (Polanica Zdroj, Poland, 2017), Міжнародна науково-технічна конференція "Актуальні проблеми автоматики та приладобудування" (Харків, 2017).

Публікації. Основні матеріали дисертації викладено у 83 наукових працях, серед них 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. Доповідей на наукових конференціях 32, з них 4 індексовані у Scopus і у Web of Science, 8 лише у Scopus. Патентів України – 8.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету, завдання та методи дослідження, визначено наукову новизну, практичне значення та особистий внесок автора в отриманні результати, подано відомості про їх апробацію та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз впливу набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП на похибку вимірювання температури.

Показано, що методи вимірювання підвищених температур за допомогою ТП мають великі похибки через деградацію їх електродів. Дуже небезпечна похибка (до 11 – 30°C для найбільш вживаних ТП типу ХА) від набутої термоелектричної неоднорідності. Відомі методи зменшення похибки ТП вимагають її визначення на місці експлуатації за допомогою еталонної ТП або репера температури. Ці методи мають високу трудомісткість і використовують еталони у робочих умовах, що суперечить нормативним документам. Тому слід розробити оперативний метод визначення похибки ТП при їх експлуатації. Аналіз циклу Карно показав, що такий метод буде дуже ефективним. Але метод на базі ефекту Пельтьє (зміна температури робочого з'єднання при пропусканні струму) має значні методичні та інструментальні похибки. Тому для вирішення проблеми точного вимірювання температури неоднорідними ТП слід провести додаткові теоретичні дослідження поведінки їх похибки при зміні профілю температурного поля.

У другому розділі створено концепцію забезпечення точності вимірювання температури ТЕП (рисунок 1), яка спирається на "опорну ділянку", що практично

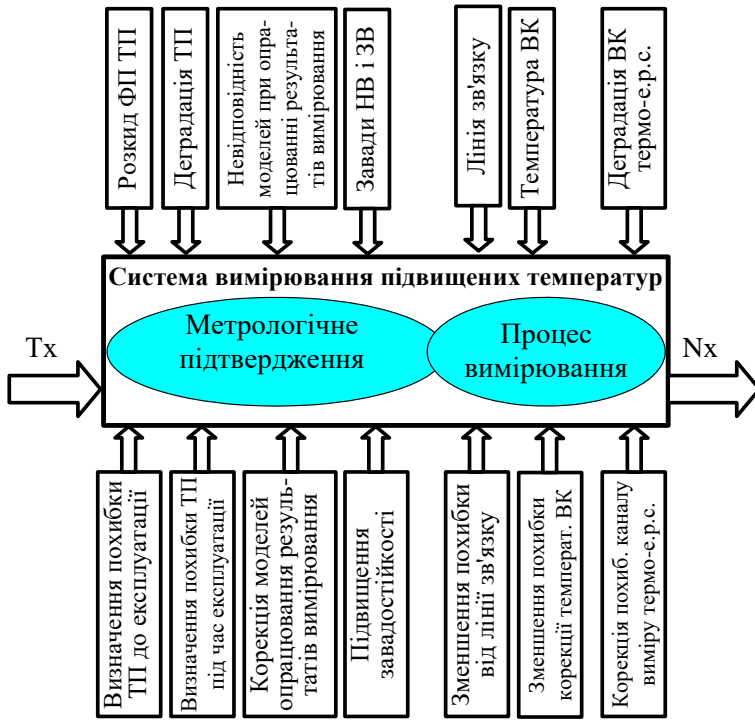


Рисунок 1. Концепція підвищення точності вимірювання температури ТЕП

температура, час експлуатації ділянки та зміна температури ділянки при зміні профілю температурного поля.

Похибки ΔE_i^{DR} , ΔE_i^{NEOD} – різні прояви однієї причини – деградації електродів

ТП при дії температури і часу експлуатації.

Назвемо їх набутими ΔE_i^{DEG} і запишемо

$$\Delta E_i^{DEG} \rightarrow 0 \text{ if } T_{Ei} \rightarrow 0, \text{ or } \tau_{Ei} \rightarrow 0, \quad (4)$$

Згідно із визначенням для ΔE_i^{NEOD} маємо

$$\Delta E_i^{NEOD} \rightarrow 0 \text{ if } \Delta T_{Di} \rightarrow 0, \quad (5)$$

Похибка ΔE_i^{DEG} графічно подана на рисунку 2 як функція трьох змінних – основних величин, які при експлуатації впливають на термо-е.р.с. ТП. При цьому похибку від дрейфу ФП ТП можна представити як рух між поверхнями τ_{Ei} для

фіксованої T_{Ei} паралельно осі ΔE при $\Delta T_D = 0$, а похибку ΔE_i^{NEOD} від набутої термоелектричної неоднорідності – як рух по фіксованій поверхні τ_{Ei} для фіксованої T_{Ei} паралельно до осі ΔT_D . Тому при сталому профілі температурного поля експлуатації ABCD (див. рисунок 3) деградація електродів ТП проявляє себе виключно як дрейф її ФП, тобто,

$$E_{ABCD}^R = E_{ABCD}^P + \Delta E_{ABCD}^{DR}, \quad (6)$$

не деградує (зберігає початкову ФП) бо прилягає до вільних кінців (експлуатується при їх температурі).

Згідно із законом Зеебека

$$E_i = (e_N + \Delta e_i) \cdot (T_{i+1} - T_i), \quad (1)$$

де $e_N, \Delta e_i$ – питома термо-е.р.с. ТП, номінальна та її відхилення;

T_{i+1}, T_i – температури на кінцях i -тої ділянки ТП.

Згідно із визначенням

$$\Delta E_i^{DR} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei}), \quad (2)$$

$$\Delta E_i^{NEOD} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di}), \quad (3)$$

де $\Delta E_i^{DR}, \Delta E_i^{NEOD}$ – похибки від дрейфу та набутої неоднорідності; $T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di}$ –

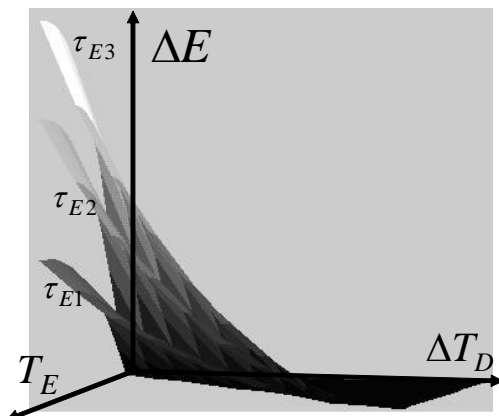


Рисунок 2. Похибка ТП від основних впливаючих величин

де E_{ABCD}^R , ΔE_{ABCD}^{DR} – значення дійсної термо-е.р.с. ТП і похибка дрейфу її ФП (на рисунку 2) відповідає $\Delta T_D \rightarrow 0$; E_{ABCD}^P – початкова ФП ТП, $E_{ABCD}^P = E_{ABCD}^{NOM} + \Delta E_{ABCD}^P$; E_{ABCD}^{NOM} , ΔE_{ABCD}^P – номінальна термо-е.р.с. ТП та її початкове відхилення.

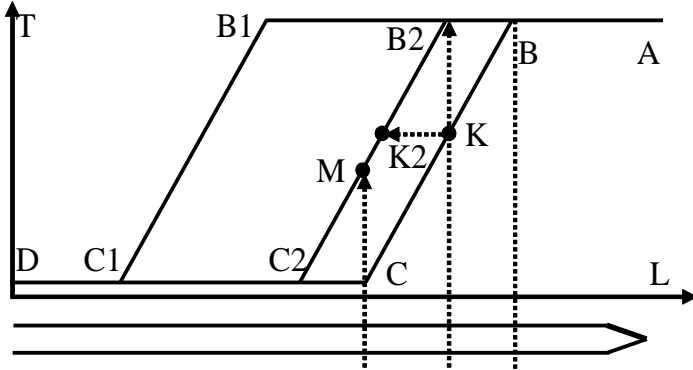


Рисунок 3. Зміни профілю температурного поля

температурі, для них $\Delta e_{CD}^{NAB} \rightarrow 0$. Також, згідно з (1), $E_{AB1}^R = 0$. Тоді $E_{CD}^R = E_{CD}^P$ і $\Delta E_{AB1C1D}^{DR} \rightarrow 0$. Тому запишемо

$$\Delta E_{BC}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{DR} = E_{ABCD}^R - E_{AB1C1D}^R = E_{ABCD}^R - E_{AB1C1D}^P \quad (7)$$

Але, згідно із визначенням, похибка ΔE_i^{NEOD} виникає через зміну профілю температурного поля. Максимальна зміна відповідає АВ1С1D (рисунок 3), тобто

$$\Delta E_{MAX}^{NEOD} = E_{AB1C1D}^R - E_{ABCD}^R = E_{AB1C1D}^P - E_{ABCD}^R \quad (8)$$

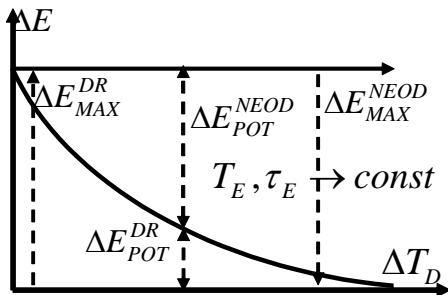


Рисунок 4. Зміна похибки неоднорідної ТП при зміні профілю температурного поля

Таким чином, $\Delta E_{MAX}^{NEOD} = -\Delta E_{MAX}^{DR}$, як це показано на рисунку 4. Для дослідження похибки неоднорідної ТП при проміжних положеннях профілю температурного поля, перемістимо його у профіль АВ2С2D (див. рисунок 3). Тоді віртуальна точка К електрода ТП зміститься у К2 (за стрілкою), температура точки К стане рівна вимірюваній і $E_{B1K}^R = E_{BB2}^R \rightarrow 0$ (згідно з (1)). А у зону градієнту потрапить ділянка С2С (вона стала МС2), яка не деградувала, тобто $\Delta E_{МС2}^{DR} \rightarrow 0$. З

врахуванням (7) і (8) буде

$$E_{AB2C2D}^R = E_{B2K2}^R + E_{K2M}^R + E_{МС2}^R = E_{B2M}^P + \Delta E_{B2M}^{DR} + E_{МС2}^P \quad (9)$$

тому $\Delta E_{AB2C2D}^{DR} = \Delta E_{B2M}^{DR}$. Але ділянка В2М це ділянка КС, що потрапила у профіль температурного поля АВ2С2D. Її питома термо-е.р.с. не може змінитися миттєво, деградація – тривалий процес. Тому похибка дрейфу ФП для профілю АВ2С2D

$\Delta E_{AB2C2D}^{DR} = \Delta E_{KC}^{DR}$. Але похибка від набутої неоднорідності для профілю АВ2С2D ΔE_{AB2C2D}^{NEOD} рівна зміні термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля, тобто

$$\Delta E_{AB2C2D}^{NEOD} = E_{AB2C2D}^R - E_{ABCD}^R = (E_{B2M}^P + \Delta E_{B2M}^{DR} + E_{MC2}^P) - (E_{BC}^P + \Delta E_{BC}^{DR}). \quad (10)$$

Але $E_{BC}^P = E_{B2M}^P + E_{MC2}^P$, тому (10) перепишемо як

$$\Delta E_{AB2C2D}^{NEOD} = \Delta E_{B2M}^{DR} - \Delta E_{BC}^{DR} = \Delta E_{KC}^{DR} - \Delta E_{BC}^{DR}. \quad (11)$$

Сума ΔE_{AB2C2D}^{NEOD} і E_{AB2C2D}^{DR} , з врахуванням їх різної полярності, рівна

$$\Delta E_{AB2C2D}^{NEOD} + \Delta E_{AB2C2D}^{DR} = \Delta E_{KC}^{DR} - \Delta E_{BC}^{DR} - \Delta E_{KC}^{DR} = -\Delta E_{BC}^{DR} = -\Delta E_{MAX}^{DR} = \Delta E_{MAX}^{NEOD}, \quad (12)$$

тобто поточна сума абсолютних значень похибок від дрейфу ФП ТП та від її набутої термоелектричної неоднорідності при зміні профілю температурного поля залишається рівна максимальним значенням цих похибок (див. рисунок 4). Можна вважати, що при зміні температурного поля із профілю ABCD до АВ2С2D (див. рисунок 3) похибка від набутої термоелектричної неоднорідності ТП "заміщає" її похибку від дрейфу ФП. Це підтверджує зв'язок між цими похибками як різними

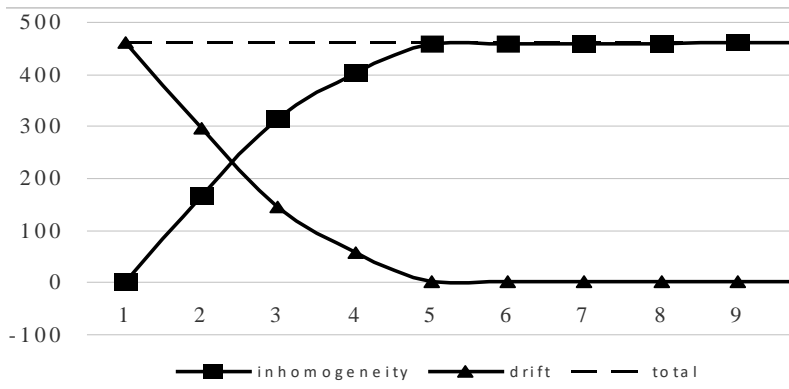


Рисунок 5. "Заміщення" похибкою від набутої неоднорідності похибки від дрейфу ФП ТП

проявами однієї причини – деградації електродів ТП при їх експлуатації.

Для підтвердження правильності (12) було проведено числове моделювання "заміщення" ΔE_i^{DR} , похибкою ΔE_i^{NEOD} , реалізоване у Excel. Профілі температурних полів імітувалися різними сигмоїдами та прямими, а зміна питомої термо-е.р.с. – квадратним тричленом. Моделювання (рисунок 5)

підтвердило правильність (12) та привело до висновку – форма профілю температурного поля у зоні АВ1С1D (див. рисунок 3), взагалі не впливає на (12). На базі досліджень поведінки неоднорідних ТП при зміні профілю температурного поля було розроблено оперативний метод визначення поточної похибки ТП під час експлуатації. Суть методу пояснює рисунок 6. Перед експлуатацією ТП проводять її ВП у профілі температурного поля, поданого на рисунку 6а (відповідає профілю АВ2С2D рисунок 4). При ВП термо-е.р.с. ТП E_{MP}

$$E_{MP} = \int_{i0}^{i1} \Delta e_1(\tau_0) \nabla t_1 dl, \quad (13)$$

де ∇t_1 – градієнт профілю поля ВП.

Під час експлуатації профіль поля буде відповідати рисунку 6б (тобто профілю ABCD рисунок 4). Термо-е.р.с. ТП E_E при часі експлуатації τ_1 рівна

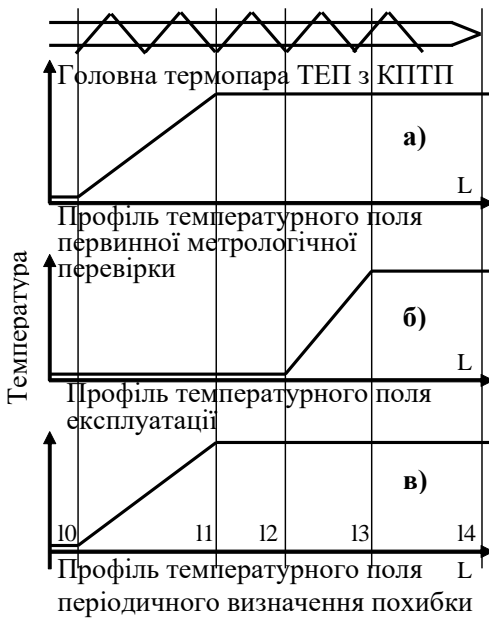


Рисунок 6. Температурні поля при реалізації оперативного методу визначення похибки ТП

градієнтами не впливає на похибку.

Зазвичай температура ВП не строго відповідає температурі експлуатації, тобто $T_{MP} \neq T_E$. Тому при ВП слід визначити похибку ТП $\Delta E_{MP}^P = E_{MP}^R - E_{MP}^N$ для T_{MP} . При визначенні поточної похибки ТП слід спочатку визначити похибку від її дрейфу $\Delta E_{\tau 1}^{DR} = E_E - E_{PP}$ для T_E , а потім проводити корекцію за формулою $E_{E\tau 1}^{KOR} = E_E - \Delta E_{\tau 1}^{DR} - \Delta E_{MP}^P$. При цьому виникає методична похибка від різниці $T_{MP} - T_E$, тому метою є $T_{MP} - T_E \rightarrow 0$. Друга методична похибка виникає через зміну температури робочого кінця за час переходу від профілю температурного поля рисунок 6б до профілю рисунок 6в. Тому цей час треба зменшувати та контролювати інші параметри об'єкта (споживану або генеровану потужність).

Невиключена похибка ТП для цього методу буде сумою похибок ΔE_{MP}^P та $\Delta E_{\tau 1}^{DR}$. У ΔE_{MP}^P входять похибки: 1) робочого еталону, становить від 0,3 до 0,6°C для ТП першого і другого розряду; 2) вимірювання термо-е.р.с. ТП робочого еталону, до 0,4°C; 3) корекції температури вільних кінців еталону, до 0,15°C; 4) визначення температури за термо-е.р.с. еталону, до 0,1°C; 5) вимірювання термо-е.р.с. ТП ХА, похибку якої визначають, до 0,1°C; 6) корекції температури вільних кінців ТП ХА, до 0,15°C; 7) визначення температури за термо-е.р.с. ТП ХА, до 0,1°C; 8) від різниці температур робочих кінців еталону і ТП ХА, для нікелевого термовирівнювача до 0,1°C; 9) комутації еталону і ТП ХА, до 0,1°C. Сумарна невиключена похибка "опорної ділянки" 10..11 не буде перевищувати 0,8°C.

У похибку $\Delta E_{\tau 1}^{DR}$ входять похибки: 1) "опорної ділянки" 10..11, як було показано, не більша 0,8°C; 2) від дрейфу ФП ділянки 10..11 (оцінка показала, що не більша 0,04°C); 3) вимірювання термо-е.р.с. ТП ХА, до 0,1°C; 4) корекції температури вільних кінців ТП, до 0,15°C; 5) визначення температури за термо-

$$E_E = \int_{l_2}^{l_3} \Delta e_3(T_e, \tau_1) \nabla t_2 dl, \quad (14)$$

де ∇t_2 – градієнт профілю поля експлуатації.

При визначенні поточної похибки ТП розробленим оперативним методом профіль поля відповідатиме рисунок 6в (тобто профілю АВ2С2D рисунок 4), що близький до профілю рисунок 6а. Термо-е.р.с. ТП E_{PP} за час τ_1 рівна

$$E_{PP} = \int_{l_0}^{l_1} \Delta e_1(\tau_1) \nabla t_3 dl, \quad (15)$$

де $\nabla t_3 \approx \nabla t_1$ – градієнт профілю поля при визначенні поточної похибки, як було показано вище (див. рисунок 5) різниця між

е.р.с. ТП, до $0,1^{\circ}\text{C}$; 6) від зміни температури робочого з'єднання ТП, можна прийняти $0,4^{\circ}\text{C}$; 7) похибка комутації ТП, до $0,03^{\circ}\text{C}$; 8) похибка від неідеальності профілю температурного поля (як буде показано, не більше $0,1^{\circ}\text{C}$). Сумарна невиключена похибка визначення похибки ТП буде не більшою $1,3^{\circ}\text{C}$. Слід відзначити, що розроблений оперативний метод не вимагає ніяких маніпуляцій із самою ТП і не вимагає використання еталонів на місці експлуатації.

Шляхом імітаційного моделювання досліджено вплив на похибку методу швидкості дрейфу ФП ТП, похибки керування профілем температурного поля та випадкової похибки і завод ВК (визначають коефіцієнти K_{DEG} , K_{REG} і K_{ZAV}).

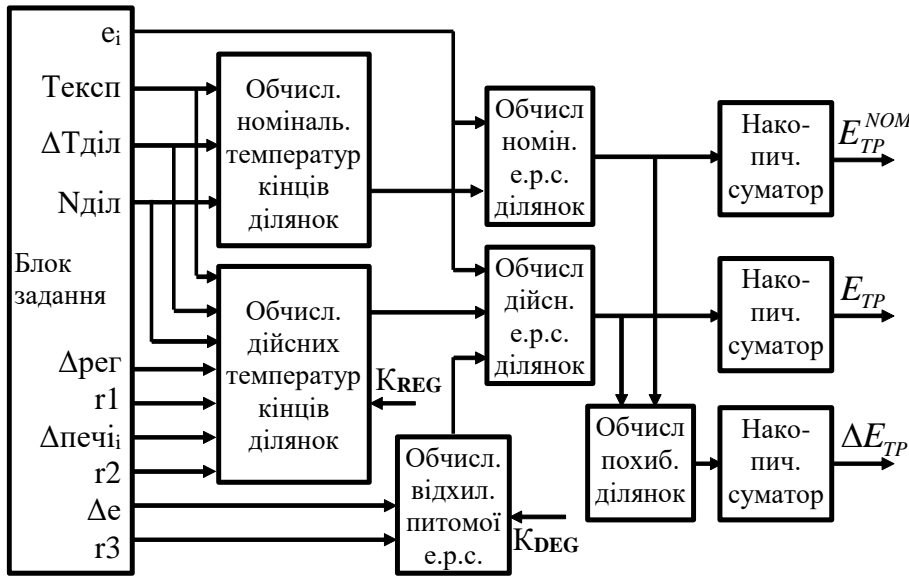


Рисунок 7. МПТ методу визначення похибки ТП

Метрологічний програмний тест (МПТ) розроблено у Excel (структура подана на рисунку 7), Показано, що вплив K_{DEG} і K_{REG} на невиключену похибку малий (до $0,1^{\circ}\text{C}$), значно впливає лише K_{ZAV} . Вплив K_{ZAV} можна оцінити як

$$\Delta_{ZAV} \approx 0,8U_{ZAV}$$

Таким чином, розроблений

оперативний метод визначення поточної похибки ТП забезпечує високу точність, метрологічну надійність та автономність, а також ефективність.

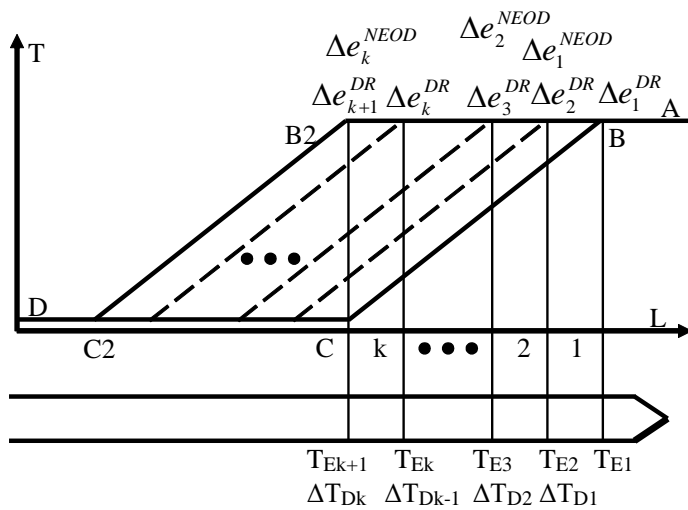


Рисунок 8. Зміни профілю температурного поля при діагностуванні стану електродів ТП, відповідні температури і похибки

У третьому розділі розроблено оперативний метод діагностування стану електродів ТП. Їх деградація закінчується їх руйнуванням, що вимагає оцінки їх поточного стану з метою заміни. Мірою ступеня деградації ТП доцільно вибрати еквівалентний час експлуатації τ_{EKV} , що врахує різницю швидкості деградації ТП в умовах, за якими побудовано модель похибки ТП і у поточних

умовах та визначено її поточну похибку Δ_{MM}^{NEOD} .

При цьому $\tau_{EKV} = \tau_E \left(\Delta_{POT}^{NEOD} / \Delta_{MM}^{NEOD} \right)$, де τ_E – фізичний час експлуатації. При жорстких умовах експлуатації $\tau_{EKV} > \tau_E$, а при сприятливих $\tau_{EKV} < \tau_E$. Але для різних ділянок ТП $\tau_{EKVi} \neq \tau_{EKV}^{SER}$, де τ_{EKV}^{SER} – середнє значення τ_{EKVi} . Для визначення τ_{EKVi} розроблено оперативний метод діагностування стану електродів ТП, що полягає (див. рисунку 8) у багаторазовій поступовій зміні профілю температурного поля від ABCD до AB2C2D (див. рисунку 3). На рисунку 8 показано температури експлуатації ділянок T_{Ek} , їх зміни ΔT_{Dk} , похибки дрейфу Δe_k^{DR} і від набутої неоднорідності Δe_k^{NEOD} . За рисунком 8 можна скласти систему рівнянь (16).

Рішенням (16) є відхилення поточних термо-е.р.с. ділянок ТП Δe_i^{DEG} від номінальної, які дають змогу обчислити еквівалентний час їх експлуатації τ_{EKVi} .

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k (e_i^P + \Delta e_i^{DEG}) \cdot \Delta T_i = E_1^{VYM} \\ \sum_{i=1}^k (e_i^P + \Delta e_i^{DEG}) \cdot \Delta T_i = E_2^{VYM} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^k (e_i^P + \Delta e_i^{DEG}) \cdot \Delta T_i = E_k^{VYM} \end{cases} \quad (16)$$

де e_i^P – початкові термо-е.р.с. ділянок ТП; E_k^{VYM} – результати вимірів термо-е.р.с. ТП

Таким чином, виявлене явище заміщення похибки від дрейфу ФП ТП ΔE_{POT}^{DR} похибкою від набутої неоднорідності ΔE_{POT}^{NEOD} при цілеспрямованій поступовій зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТП дає змогу створити нову методологію експлуатації ТЕП, що спирається на розроблені оперативні методи визначення поточної похибки ТП та діагностування стану її електродів.

Першим етапом діагностування стану електродів ТП є рішення системи рівнянь (16). Цю систему можна перетворити у матричну форму

$$\begin{pmatrix} E_1^{NOM} + \Delta E_1^{DEG} & E_2^{DEG} + \Delta E_2^{DEG} & E_3^{NOM} + \Delta E_3^{DEG} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{DEG} & E_1^{VYM} \\ 0 & E_2^{NOM} + \Delta E_2^{DEG} & E_3^{NOM} + \Delta E_3^{DEG} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{DEG} & E_2^{VYM} \\ 0 & 0 & E_3^{NOM} + \Delta E_3^{DEG} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{DEG} & E_3^{VYM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & E_k^{NOM} + \Delta E_k^{DEG} & E_k^{VYM} \end{pmatrix} \cdot (17)$$

Як видно із (17), матриця буде трикутною, вигідно використати метод Гауса.

Розроблений алгоритм обчислює еквівалентні часи експлуатації всіх ділянок τ_{EKVi} і їх середнє значення τ_{EKV}^{SER} як лінійну інтерполяцію зміни модельованої похибки ТП при зміні τ_{EKVi} за 100 годин. При цьому можливі чотири випадки:

1. $\tau_{EKVi} \approx \tau_E$ та $\tau_{EKVi} - \tau_E \ll \tau_E$. Модель похибки ТП адекватно відображає процес деградації електродів ТП, корекція похибки має високу ефективність.

2. $\tau_{EKVi} \neq \tau_E$, та $\tau_{EKVi} - \tau_{EKV}^{SER} \ll \tau_E$. Тоді умови експлуатації та досліджень при побудові моделі похибок ТП різні, але модель похибки ТП адекватна, а для ефективної корекції слід використати відповідні коефіцієнти.

3. $\tau_{EKVi} \approx \tau_E$ або 4. $\tau_{EKVi} \neq \tau_E$, але $\tau_{EKVi} - \tau_{EKV}^{SER} > \Delta\tau_{EKV}^{DOP}$. Тоді модель похибки ТП не адекватна, погано відображає деградацію окремих ділянок електродів ТП.

За визначеними розробленими оперативними методами похибками ТП та її ділянок слід перейти до індивідуальних моделей їх похибок з метою їх корекції.

Для дослідження оперативного методу діагностування розроблено МПТ, що представляє собою “плоску послідовність кадрів”. (середовища LabView). Кожен кадр самостійний, зв'язок між ними іде через файли. МПТ передбачає:

1. Задання профілів температурних полів експлуатації та діагностування, максимальних випадкових відхилення профілів цих температурних полів (коефіцієнт K_{REG}), номінальної питомої термо-е.р.с., та швидкості її зміни (коефіцієнт K_{DEG}), та допустимої випадкової похибки ВК (коефіцієнт K_{VYP}).

2. Розрахунок номінальних і дійсних термо-е.р.с., всіх віртуальних ділянок ТП для номінальних і дійсних температурних полів експлуатації і діагностування.

3. Складання і рішення системи рівнянь (17), а також порівняння заданих і отриманих значень відхилення питомої термо-е.р.с. всіх ділянок.

4. Зміну коефіцієнтів K_{REG} , K_{DEG} і K_{VYP} у заданих межах.

Дослідження показали, що на похибку визначення τ_{EKVi} найбільше впливає K_{REG} , тобто методу діагностування потрібен високоякісний регулятор.

Дослідження показали, що для визначення τ_{EKV} ТП в цілому ТЕП з КПТП надлишковий. У структуру ТЕП із самодіагностуванням (ТЕП із СД, рисунок 9)

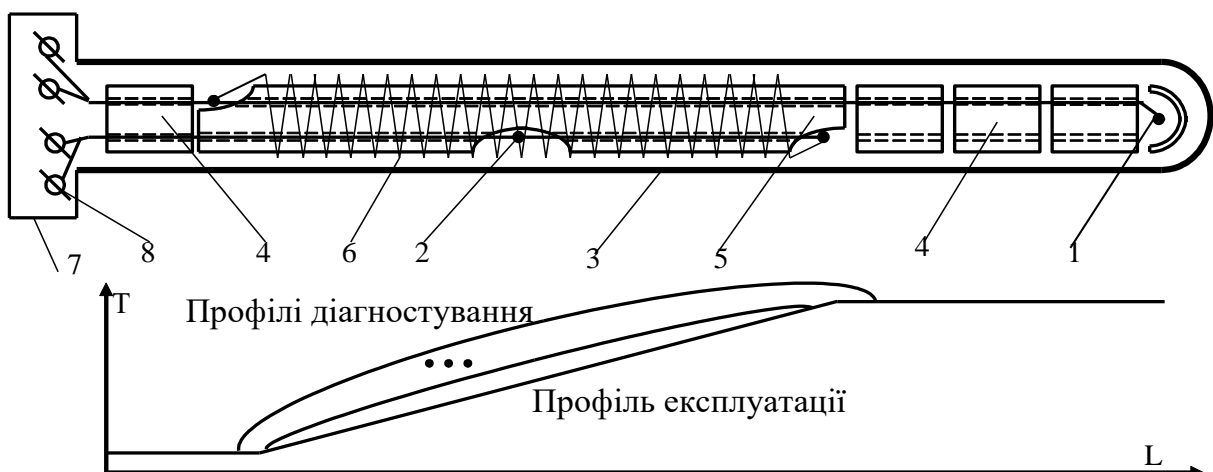


Рисунок 9. ТЕП із самодіагностуванням стану електродів своєї ТП

входять ТП1 (головна) і ТП2 (контролю змін температурного поля), чохол 3, звичайні 4 і довга 5 керамічні буси, нанесений на 5 нагрівник 6 і головка ТП 7 з контактами 8. Всі деталі, крім буси 5, стандартні. Внизу рисунка 9 подано профілі полів експлуатації і діагностування, отримані аналітично та експериментально при зміні потужності нагрівника 6. Їх форма мало залежить від потужності нагрівника

6. Для визначення τ_{EKV} ТЕП із СД необхідна модель похибки ТП.

У четвертому розділі розроблено засіб керування профілем температурного поля вздовж електродів стандартного ТЕП. Він представляє собою багатозонну трубчасту піч з керованим профілем температурного поля (рисунок 10). Але на торці печі треба розмістити $4N$ виводів (N – кількості зон) – нагрівників і ТП температури зон. У розробленій печі нагрівники та сенсори суміщено – нагрівник виготовлено із, наприклад, алюмелю, а його відводи – із, наприклад, хромелю. Тоді достатньо $N + 2$ виводів, конструкція стає не суперечливою.

Для розроблення систем вимірювання температури оцінено потужність нагрівника печі прийнявши, що нагрівник є безконечним циліндром радіусом r з температурою t_1 нагрівника та зовнішньою температурою t_2 . Тоді можна записати

$$Q = -F\lambda \frac{dt}{dr} = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr}, \quad (18)$$

де Q – тепловий потік через бічну поверхню F циліндра; λ – коефіцієнт теплопровідності термоізоляції, $\lambda = 0,15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

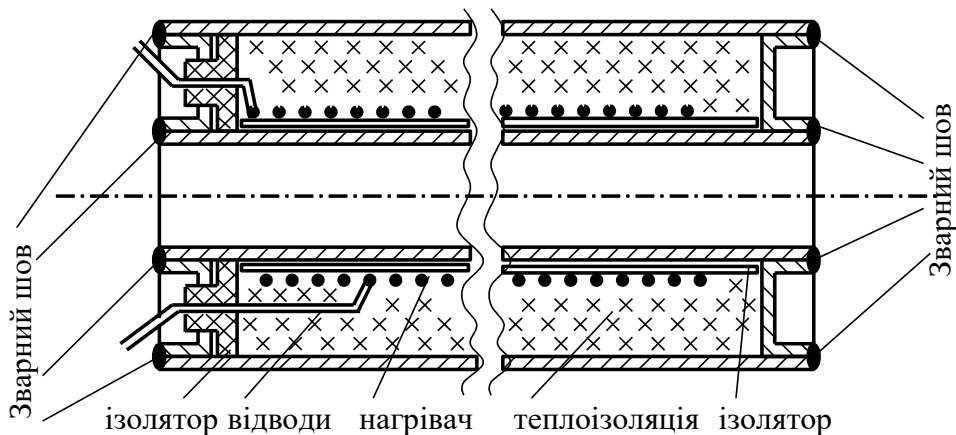


Рисунок 10. Багатозонна піч з керованим профілем температурного поля

Розв'язком (18) буде погонний тепловий потік $\frac{Q}{l} = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\ln d_1/d_2}$, де d_1 та d_2

зовнішній та внутрішній діаметри циліндра відповідно. Підставивши значення, отримаємо залежності погонної потужності нагрівників, подані на рисунку 11.

Час нагріву та охолодження можна оцінити за законом Ньютона

$$(Q/l)d\tau = cV\rho dt + \alpha S(t_1 - t_2)d\tau, \quad (19)$$

де c – питома теплоємність теплоізоляції печі; V – об'єм теплоізоляції печі; S – площа зовнішньої поверхні теплоізоляції печі; α – коефіцієнт теплопередачі зовнішнього чохла печі (сталь-повітря); ρ – густина теплоізоляції печі.

Розв'язком (19) є залежність $T = T_s + \frac{Q}{l\alpha S} (1 - e^{-\frac{\alpha S}{cV\rho} t})$ температури T нагріву

печі від часу τ , графіки нагріву та охолодження печі подані на рисунку 12. Як видно із них, тривалість визначення похибки ТП оперативним методом триває годину і довше (коли регулятор не оптимальний), а тривалість діагностування –

довша. А регулятор, через тісний тепловий зв'язок між зонами, схильний до самозбудження.

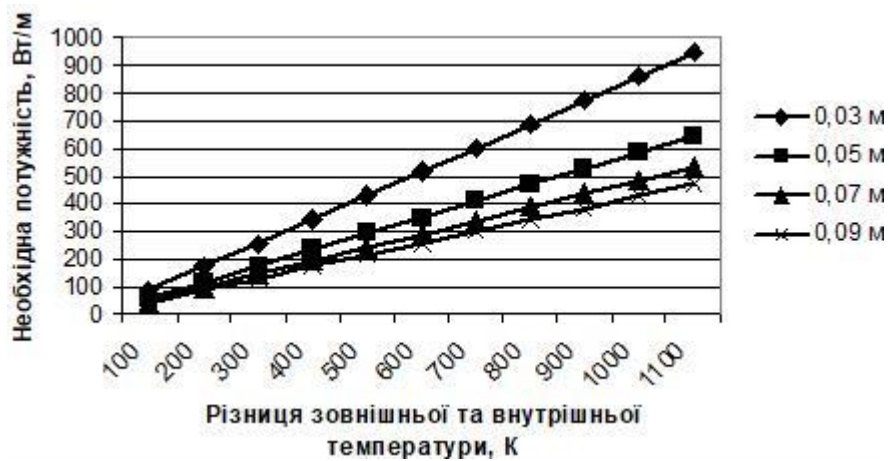


Рисунок 11. Залежності погонної потужності нагрівників від максимальної необхідної зміни температури та товщини шару теплоізоляції

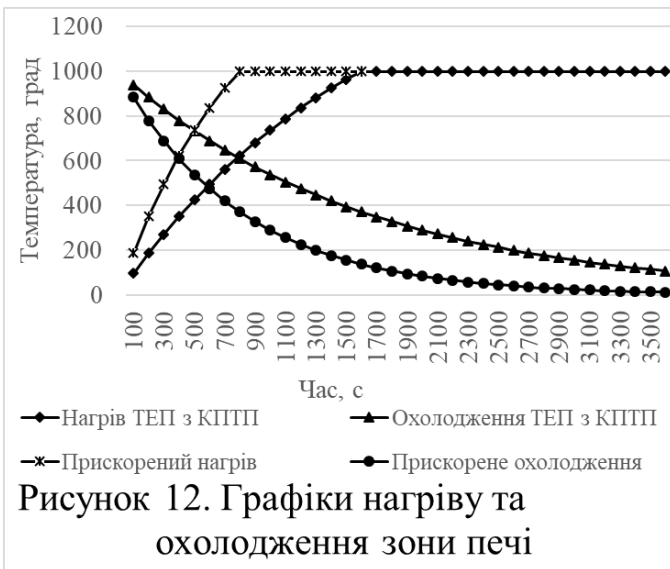


Рисунок 12. Графіки нагріву та охолодження зони печі

Тому слід розробити відповідний метод керування температурою зон печі. Для керування профілем температурного поля багато-зонної печі розроблено нейромережевий метод, структура системи на його базі подана на рисунку 13, куди входять об'єкт вимірювання ПЧ, ТЕП з КПТП, багатоканальна вимірювальна підсистема БВП (комутатор КМ, аналого-цифровий перетворювач АЦП, мікроконтролер МК, інтерфейс ІФ), блок задання температури БЗ, блок віднімання БВ, нейронна мережа НМ, блок керування БК. Система розімкнута, зворотний зв'язок реалізовано не у реальному часі. Після вимірів температури всіх зон ТЕП з КПТП (стандартний ТЕП у багатозонній печі) БВ обчислює відхилення температури зон від заданої, які, разом із температурою зон поступають на входи

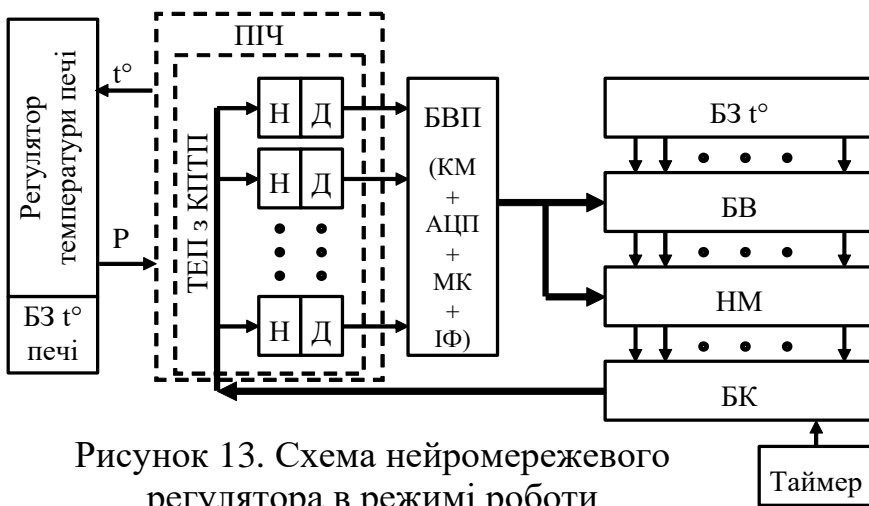


Рисунок 13. Схема нейромережевого регулятора в режимі роботи

НМ, що формує керуючі дії, реалізовані БК. Наступна керуюча дія формується після закінчення перехідних процесів у зонах печі. Тому такий регулятор не схильний до самозбудження.

Як НМ для N -зонної печі використано трьохшаровий перцептрон, що має $2N$ входів і N виходів. Відомі методи навчання НМ вимагають трудомісткої точної ідентифікації моделі багатозонної печі. Запропоновано навчати НМ на самій багатозонній печі, для чого змінено структуру регулятора (див. рисунок 14) і введено блок задання приростів потужності БЗП і блок БН навчання НМ. Під час навчання НМ БЗП задає випадкові прирости (додатні та від'ємні) потужності нагрівників, які реалізує БК. Після закінчення перехідного процесу БВП вимірює температури зон і НМ прогнозує необхідні зміни потужності нагрівників, які мають повернути температуру зон до заданих. БН оцінює похибки прогнозу і коригує вагові коефіцієнти і зміщення нейронів НМ. Коли прогнозовані зміни потужності будуть рівні заданим БЗП змінам навчання закінчується. Дослідження показали, що заданий профіль температурного поля НМ-регулятор відновлює за один цикл.

Як було сказано, для діагностування стану електродів ТП необхідна модель похибки ТП, найкраще у виді (3). Але побудова моделі вимагає достатньої кількості даних експериментальних досліджень. Хоча для ТП вони проводилися, їх не можна поєднувати через різні методики, а відомі дослідження – часткові.

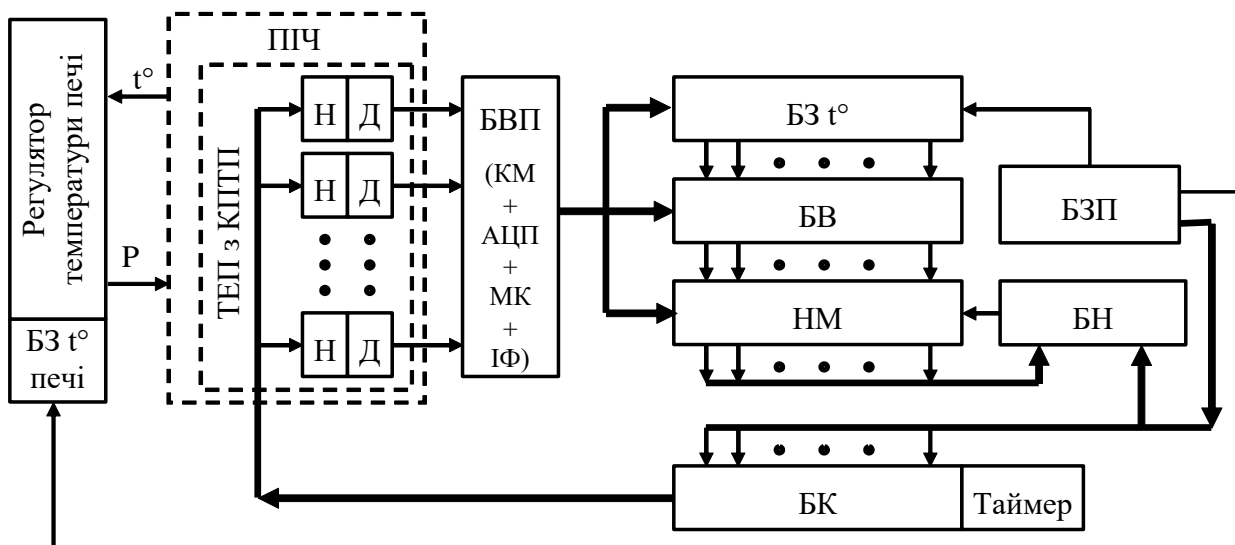


Рисунок 14. Структурна схема неймережевого регулятора в режимі навчання

Проведення потрібних достатніх експериментальних досліджень дуже трудомістке, а головне – не веде до суттєвого підвищення точності моделі через індивідуальні особливості кожної ТП. Тому доцільно розширити обсяг даних про дрейф ФП ТП шляхом інтерполяції та екстраполяції відомих найповніших даних. Аналіз показав, що для цього найкраще годиться регресійний аналіз, однак метод найменших квадратів (МНК), при наявності вільного члена створює моделі, що не мають фізичного змісту (дані експерименту це відхилення від початкової термометрії). А встановлення вільного члена у нуль веде до втрати математичного змісту (сума залишків не рівна нулю). Тому розроблено вдосконалений МНК, що використовує інтерполяційний поліном Лагранжа для примусового встановлення

суми залишків у нуль. Тоді отримані функції є математичним сподіванням залежностей похибок від дрейфу ФП ТП і від термоелектричної неоднорідності.

При розширенні обсягу даних відтворюються поверхні, подані на рисунку 2. Для цього розроблено таблиці (рисунок 15), кожна з яких відповідає одній поверхні (часу експлуатації) та містить дані про похибку ТП від температури експлуатації T_E та зміни поточної температури ΔT_D . У них вказані точки дійсного визначення похибки, точки прогнозу похибки та точки, які не мають набутої похибки через те, що експлуатувалися при температурі вільних кінців. Точки, які визначені регресійними поліномами на базі точок дійсного визначення похибки, мають вищий ієрархічний рівень, тому у цих точках інші прогнози ігнорують.

За результатами розширення обсягу даних сформовано тестову (600 векторів для часів експлуатації від 250 до 1500 годин) і навчальну (476 векторів, отриману шляхом випадкового прорідження тестової вибірки) вибірки для НМ. Як НМ вибрано трьохшаровий перцептрон з трьома розподільчими вхідними нейронами (входи T_E , ΔT_D , τ_E), 15-ма нейронами схованого шару із сигмоїдною функцією активації та лінійним вихідним нейроном. Метод навчання – Левенберга-Маркуарта, час навчання у середовищі MatLab від 3 до 5 хвилин. Похибка моделі похибки ТП – випадкова (рисунок 16), не більша 15 мкВ (0,4°C).

Для побудови систем вимірювання підвищених температур з високою точністю відібрано кращі технічні рішення відповідно до правила – серед похибок ВК невиключена похибка ТП все одно повинна домінувати:

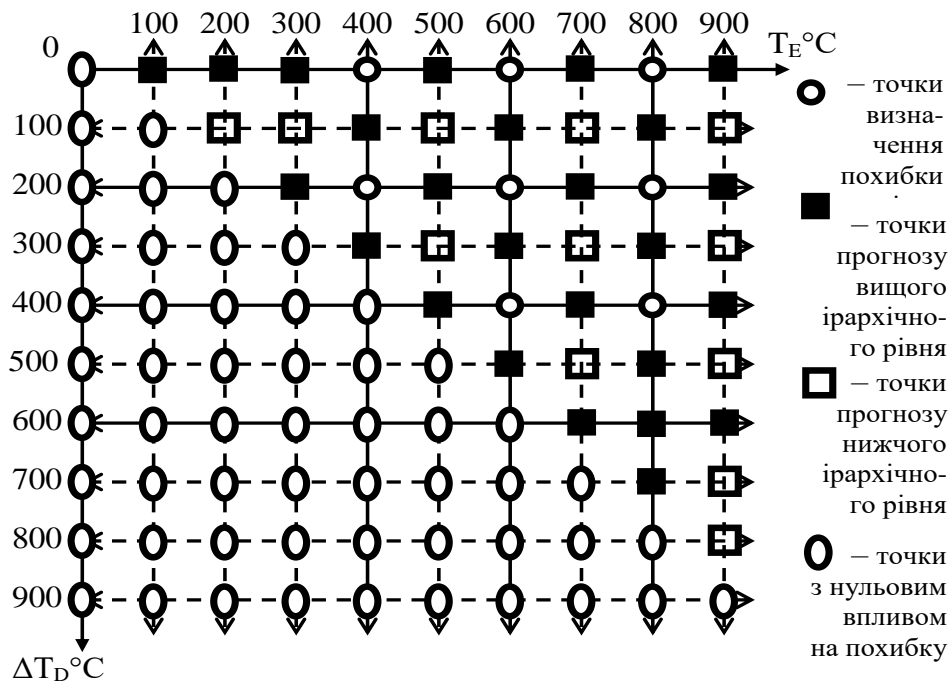


Рисунок 15. Побудова регресійних моделей для i -того часу

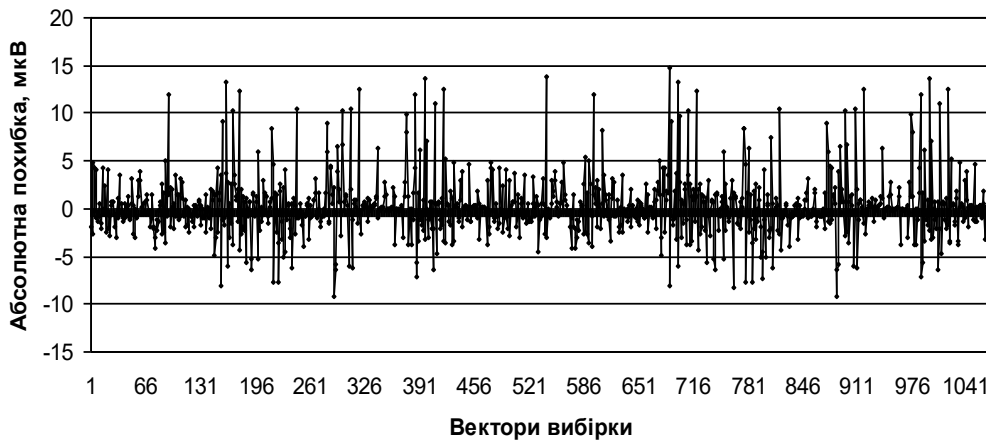


Рисунок 16. Графік похибок нейромережевої моделі похибки ТП

- 1) Сенсор температури вільних кінців (мідний термометр опору) слід розмістити у головці ТЕП з термовирівнювачем (усувається похибка подовжувальних провідників) і включити у потенціометричну схему вимірювання опору (усуває похибку від проводів підключення). При індивідуальному калібруванні схеми сумарна похибка корекції температури вільних кінців не перевищує $0,15^{\circ}\text{C}$.
- 2) Комутовати ТП слід подвійними герконовими реле з додатковими термовирівнювачами. Похибка не більше $0,5\text{мкВ}$ ($0,013^{\circ}\text{C}$ для ТП типу ХА).
- 3) 24-х розрядні сигма-дельта АЦП у складі мікроконверторів (шуми $0,3\text{ мкВ}$ на діапазоні 80 мВ , нелінійність $0,0015\%$) задовольняють всі ТП. При використанні автоматичного встановлення нуля та калібрування похибка ВК визначається джерелом напруги калібрування.
- 4) Як інтерфейс використовувати мережеву версію RS232C, що для гальванічної розв'язки мережі вимагає лише двох оптронів (сумарна прохідна ємність 2 пФ).
- 5) Для гальванічної розв'язки мережі живлення слід жити ВК від акумулятора, який, для відновлення заряду, періодично підключається реле до мережевого блоку живлення (без гальванічної розв'язки). Прокідна ємність реле 2 пФ , що дає змогу збільшити завадостійкості (разом з сигма-дельта АЦП) до 170 дБ .

Похибка ΔE_i^{NEOD} сягає $11\text{-}30^{\circ}\text{C}$, тому реалізація розроблених оперативних методів у контурі регулювання температури потужних термоагрегатів може викликати розхитування регулятора (бо тривалість перехідних процесів при ВП і встановленні температури об'єкта вимірювання сумірні), що створює аварійну ситуацію. Розроблено структури двоконтурних систем, де запропоновані методи не заважають регулятору температури об'єкта, бо діють не у контурі регулювання (рисунок 17). У систему входять ТЕП з КПТП 1 і 2, вимірювальні канали ВК 1 і 2, канали регулювання КР 1 і 2 (профілем температурного поля ТЕП з КПТП) та задавачі профілю температурного поля ТЕП з КПТП Зад. 1 і 2.

Але функції контурів у реальному часі різні. Один із них працює у контурі регулювання температури об'єкта, для його ТЕП з КПТП профіль температурного поля незмінний. Інший контур виконує розроблені оперативні методи визначення похибки головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП, та діагностує стан її електродів. При цьому зміни термо-е.р.с. головної ТП через зміни профілю температурного поля викликають, але їх використовують лише для уточнення математичних

моделей похибок головної ТП та її ділянок Періодично комутатор проводить зміну функцій контурів.

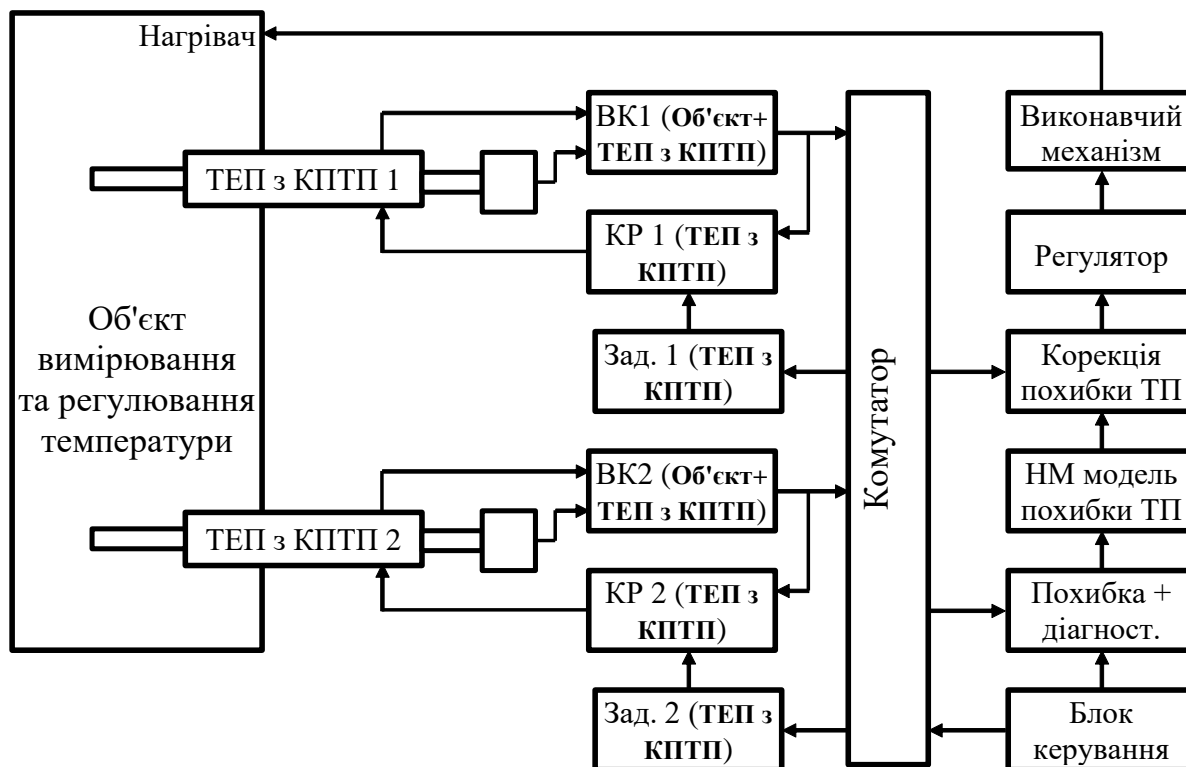


Рисунок 17. Структура двоконтурної вимірювально-керуючої системи

У контур регулювання завжди входить ТЕП з КПТП, похибка головної ТП якого недавно була визначена, а моделі її похибки та похибки її ділянок уточнені. Перевагами цієї системи є:

- 1) Вплив змін термо-е.р.с. головної ТП при визначенні її похибки і діагностуванні ділянок на контур і алгоритм регулювання температури об'єкта відсутній;
- 2) Різниця температур між робочими кінцями головних ТП, що входять у ТЕП з КПТП 1 та 2, не впливає на їх невиключену похибку;
- 3) Визначення похибки і діагностування головних ТП проводиться не у реальному часі регулювання; Якщо не виконана головна вимога розроблених оперативних методів – сталість температури злїоту – то їх можна повторити.

Розроблена система одночасно має високі точність і метрологічну надійність. Розроблені оперативні методи не вимагають використання еталонного обладнання на місці експлуатації, система має високу метрологічну автономність. Розроблені оперативні методи не вимагають зупинки технологічних процесів і демонтажу сенсорів для метрологічного обслуговування, що підвищує їх ефективність безпосередньо. Та основне підвищення ефективності розроблених методів полягає у підвищенні точності вимірювання саме температури. Це, наприклад, дає змогу зменшити допуск на температуру перегрітої пари на тепловій електростанції, що збільшує її коефіцієнт корисної дії. При термообробці металів можна забезпечити оптимальне співвідношення твердості та зернистості інструментів при гартуванні.

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням розроблених оперативних методів та засобів їх реалізації. Для цього спочатку вдосконалено

стенд дослідження ТЕП з КПТП. Використання рекомендованих у четвертому розділі технічних рішень привело до того, що стенд забезпечує чутливість 1 мкВ на діапазоні 80 мВ при нестабільності менше $\pm(0,0025+0,002(X_{\max}/X-1))\%$ за день, пригнічення завад нормального виду 80 дБ, а загального виду – 170 дБ. Систему регулювання стенду адаптовано для керування профілем температурного поля багатозонної печі (див. рисунок 10) нейромережовим методом (див. рисунок 13).

Дослідження нейромережового методу керування профілем температурного поля (див. рисунок 18) показали, що максимальні відхилення температури у зонах від заданих не перевищували 2°C , а максимальна нестабільність заданого профілю температурного поля не перевищувала $1,5^{\circ}\text{C}$, що цілком прийнятно.

За допомогою додаткової ТП на поверхні багатозонної печі та розміщення з'луту головної ТП напроти з'луту додаткової ТП, досліджено, що пропонується багатозонна піч (рисунок 10) зменшує вплив змін зовнішньої температури на профіль температурного поля головної ТП у 37 разів, що цілком прийнятно.

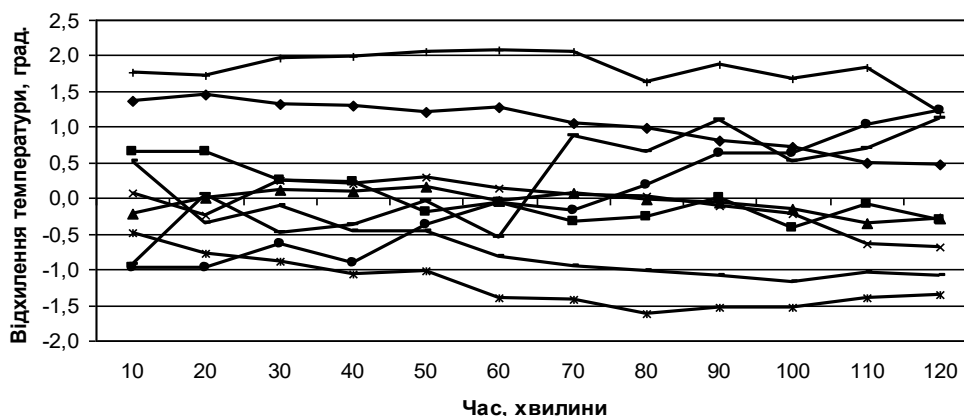


Рисунок 18. Нестабільність профілю температурного поля у багатозонній печі

Для дослідження оперативного методу визначення похибки ТП потрібен ТЕП, який може тимчасово створити задану похибку. Схема такого ТЕП, подана на

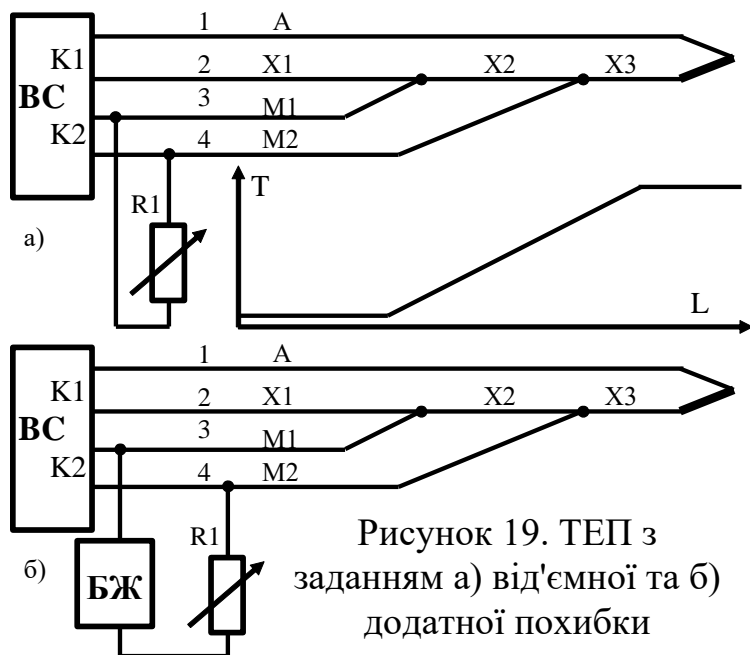


рисунок 19, містить головну ТП (електроди А та X1, X2, X3) з мідними відводами M1, M2 та шунтом R1. Якщо $R1 \rightarrow \infty$, то ФП ТП А, X1, X2, X3 не змінюється (імітована похибка рівна нулю), якщо $R1 = 0$, то ділянка X2 (див. рисунок 19а)) закорочена (коли вона знаходиться у градієнті температурного поля її термо-е.р.с. рівна нулю). Якщо $0 < R1 < \infty$, то ТП імітує від'ємну похибку, рівну вимірній каналом K2 системи ВС різниці напруг при поточному значенні R1 та

$R1 \rightarrow \infty$. При потребі імітувати додатну похибку необхідне пропускання через ділянку X2 (див. рисунок 19б)) струму від блока живлення БЖ. Додатна похибка теж рівна вимірній каналом K2 системи ВС різниці напруг при поточному значенні $R1$ та $R1 \rightarrow \infty$. Похибка задання похибки ТП залежить від розмірів і не перевищує 15%.

За допомогою стенда досліджено розроблений метод визначення похибки ТП при експлуатації (рисунок 20). Через те, що використана у стенді піч типу СУОЛ мало-інерційна, при дослідженні не можна нехтувати зміною температури у її робочій зоні при зміні потужності багатозонної печі (для великих термоагрегатів, наприклад, печі електростанції, таке нехтування цілком допустиме). Тому була розроблена методика врахування цієї зміни шляхом відносних вимірювань. При цьому головна ТП, що входить у ТЕП з КПТП, без створення заданої похибки (додаткові електроди M1 і M2 розімкнуті, див. рисунок 19) грає роль еталонної ТП, а при заданій похибці (до додаткових електродів M1 і M2 підключено резистор $R1$, див. рисунок 19) – досліджуваної ТП, похибка якої визначається. Тоді невиключену похибку Δ_M визначення заданої похибки ТЕП можна оцінити як

$$\Delta_M = \Delta E^{OV} + \Delta_{TP}^{VYM} - \Delta_{TP}^{IM} = (\Delta E^{OV1} - \Delta E^{OV2}) + (\Delta E_{TP}^{OV1} - \Delta E_{TP}^{OV2}) - (E_{TP}^{R1 \rightarrow \infty} - E_{TP}^{R1}), \quad (19)$$

де ΔE^{OV} – зміна температури у печі СУОЛ, що імітує об'єкт вимірювання, при двох профілях температурного поля (тому, що імітує режим експлуатації ТЕП, та тому, що імітує режим визначення його похибки); Δ_{TP}^{VYM} – виміряна зміна генерованої ТЕП термо-е.р.с. у вказаних двох профілях температурного поля; Δ_{TP}^{IM} – імітована похибка ТЕП; E^{OV1} , E^{OV2} – термо-е.р.с. ТЕП, генерована у вказаних двох профілях температурного поля, яке створює багатозонна піч, у режимі імітації еталонного ТЕП; E_{TP}^{OV1} , E_{TP}^{OV2} – термо-е.р.с. ТЕП генерована у вказаних двох профілях температурного поля, яке створює багатозонна піч, у режимі імітації ТЕП, похибка якого визначається; $E_{TP}^{R1 \rightarrow \infty}$ – термо-е.р.с. ТЕП при вимкненому резисторі



Рисунок 20. Дослідження методу визначення похибки ТП у процесі експлуатації

R1 (перед імітацією заданої похибки); E_{TP}^{R1} – термо-е.р.с. ТЕП при ввімкненому резисторі R1 (режим імітації заданої похибки).

Результати вимірювання термо-е.р.с. ТЕП типу ХА та результати їх опрацювання відповідно до пропонованої методики зведено у таблицю 1. Як видно із цієї таблиці, максимальна невиключна похибка Δ_M визначення заданої похибки ТЕП не перевищує 12 мкВ. Для ТЕП типу ХА похибка не перевищує $0,3^\circ\text{C}$. Але слід відзначити, що отримане максимальне значення невиключної похибки Δ_M сильно занижене. Воно не враховує похибки еталонного сенсора температури та можливої зміни температури робочого з'єднання ТЕП, який вимірює температуру об'єкта, за час реалізації оперативного методу визначення його похибки.

Таблиця 1. Результати вимірювання термо-е.р.с. ТЕП та результати їх опрацювання при дослідженні оперативного методу визначення похибки ТП

N	E^{OV1}	E^{OV2}	ΔE^{OV}	E_{TP}^{OV1}	E_{TP}^{OV2}	Δ_{TP}^{VYM}	$\Delta_{TP}^{VYM} + \Delta E^{OV}$	Δ_{TP}^{IM}	Δ_M
1	13493	13253	240	10506	13226	2721	2961	2966	-5
2	13413	13169	244	10409	13139	2730	2974	2962	12
3	13520	13303	218	10517	13227	2751	2969	2971	-2
4	13650	13406	245	10649	13375	2725	2970	2960	10
5	13604	13381	223	10601	13351	2749	2972	2972	0

Теж досліджено ТЕП із самодіагностуванням стану електродів своєї ТП (див. рисунок 9), що містить ТП 2 і 4 та нагрівник 3 (рисунок 21). Зміни профілю температурного поля фіксують 8 термісторів 5, закріплених на поверхні чохла 1. У печі стенда встановлено температуру 146°C і визначено профілі температурного поля при потужності нагрівника 0, 2 і 8 Вт (рисунок 22). Як показали дослідження, форма профілю температурного поля стійка та подібна для різних потужностей, що дає змогу керувати профілем з достатньою точністю за допомогою ТП 4.

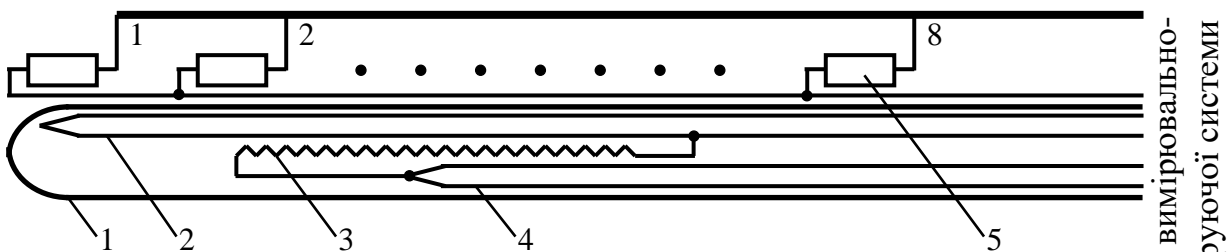


Рисунок 21. ТЕП із самодіагностуванням стану електродів своєї ТП

До вимірювально-керуючої системи

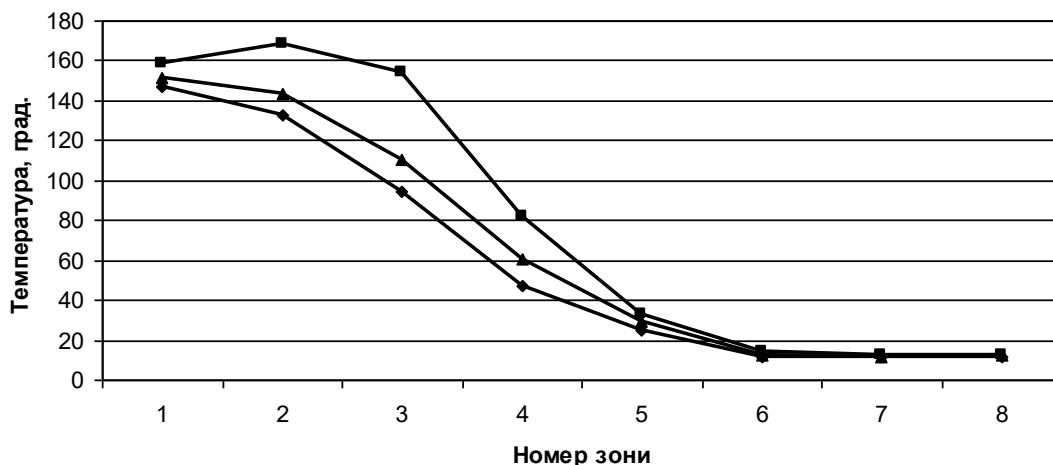


Рисунок 22. Графіки профілю температурного поля та його нестабільності

ВИСНОВКИ

1. Аналіз систем вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів показав, що деградація при експлуатації електродів їх чутливих елементів, термопар, веде до великих похибок від дрейфу функцій перетворення та від набутої термоелектричної неоднорідності. Показано, що для корекції цих похибок необхідно розробити метод визначення поточної похибки термопар у процесі їх експлуатації, але визначення похибки за допомогою ефекту Пельтьє діє лише у специфічних випадках. Аналіз метрологічного забезпечення вимірювання температури перегрітої пари на тепловій електростанції показав можливість значного економічного ефекту від підвищення точності вимірювання.
2. Аналіз умов експлуатації термопар дав змогу виділити їх ділянку, яка не деградує (її можна використати як опорну) і розробити концепцію забезпечення високої точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами при одночасному підвищенні суперечливих показників метрологічної надійності та автономності, а також ефективності.
3. Дослідження поведінки неоднорідних термопар при зміні профілю температурного поля показало, що властивості їх похибок від дрейфу функції перетворення та від набутої термоелектричної неоднорідності дають змогу визначити поточну похибку термопар за рахунок цілеспрямованої зміни профілю температурного поля вздовж електродів, тобто створити оперативний метод визначення поточної похибки термопар, потреба у якому була раніше обґрунтована. Аналітичні та імітаційні дослідження методу показали, що він не має методичної похибки.
4. Показано, що створений оперативний метод визначення похибки головної термопари, яка входить у термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, проводиться у процесі її експлуатації та вимагає лише первинного калібрування цієї термопари за допомогою еталонного засобу, але далі еталонні засоби не потрібні. Оцінка похибки визначення похибки термопари показала, що ця похибка не перевищує 1°C або $1,3^{\circ}\text{C}$ залежно від похибки еталону при первинному калібруванні. На інструментальну похибку методу найбільше впливає випадкова похибка ВК, а похибками від деградації електродів термопари та від керування профілем температурного поля можна нехтувати.

5. Обґрунтовано вибір індивідуального еквівалентного часу експлуатації термопар та їх ділянок як міри деградації їх електродів. Розроблено теоретичні основи оперативного методу діагностування стану електродів термопар без робочого еталону, що дає змогу визначити місце даної термопари у моделі її похибок. Еквівалентний час експлуатації дає змогу більш надійно оцінити похибки термопари під час експлуатації та вирішити питання про потребу її заміни.
6. Дослідження впливу похибок від швидкості деградації електродів термопар, керування профілем температурного поля та випадкової похибки вимірювального каналу показало, що на невиключену похибку визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок термопари розробленим оперативним методом діагностування стану ділянок її електродів найбільше впливає похибка від керування профілем температурного поля, що вимагає розроблення відповідного методу керування.
7. Розроблено конструктивну схему і схему ввімкнення спеціалізованого термоелектричного перетворювача із самодіагностуванням, що використовує лише один нестандартний вузол, що реалізує оперативний метод діагностування стану електродів його термопари без використання робочого еталону.
8. Розроблено спеціалізовану трубчасту багатозонну піч керування профілем температурного поля вздовж електродів стандартного термоелектричного перетворювача, яка дає змогу реалізувати розроблені оперативні методи визначення поточної похибки та діагностування стану електродів його термопари. Розрахунок необхідної потужності нагрівників зон цієї печі дає змогу оцінити її конструктивні параметри та тривалість реалізації запропонованих оперативних методів.
9. Розроблено не схильний до самозбудження нейромережевий метод керування профілем температурного поля термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, що дає змогу навчати нейронну мережу на об'єкті вимірювання температури без необхідності трудомісткої ідентифікації параметрів моделі трубчастої багатозонної печі в умовах об'єкту вимірювання температури.
10. Вдосконалено метод найменших квадратів, що коректно описує похибки термопар для збільшення обсягу значень похибок термопар шляхом інтерполяції та екстраполяції результатів експериментальних досліджень та формування навчальної і тестової вибірки для нейромережевої моделі похибки термопар від деградації їх електродів, похибка якої не перевищує $0,4^{\circ}\text{C}$.
11. Розроблені структурні схеми двоконтурних систем вимірювання та керування температурою термоагрегатів дали змогу врахувати особливості реалізації розроблених оперативних методів визначення похибки термоелектричного перетворювача та діагностування стану його термоелектродів. Ці оперативні методи разом з алгоритмом відбору технічних рішень при проектуванні цих систем дали змогу забезпечити домінування невиключеної похибки сенсора у вимірювальному каналі. Спроектвані системи забезпечують досягнення мети дисертації – одночасне підвищення єдності, точності, метрологічної надійності та автономності, а також ефективності вимірювання підвищених температур засобами термоелектричної термометрії.
12. Для експериментального дослідження похибок розроблених оперативних методів визначення поточної похибки термопар та діагностування стану її електродів модернізовано відповідний спеціалізований стенд і розроблено

термоелектричний перетворювач з можливістю оперативного гнучкого задання його поточної похибки.

13. Експериментально досліджено розроблений нейромережевий метод керування профілем температурного поля розробленої багатозонної трубчатої печі, оперативний метод визначення похибки термопар, а також спеціалізований термоелектричний перетворювач з оперативним діагностуванням стану електродів, показано високу ефективність запропонованих технічних рішень.

14. Аналіз показав можливість отримання суттєвого економічного ефекту за рахунок покращення стану метрологічного забезпечення вимірювань підвищеної температури перегрітої пари на тепловій електростанції (порівняно з результатами проведеного у першому розділі аналізу поточного стану), отримане за рахунок використання розроблених оперативних методів визначення поточної похибки термопари та діагностування стану її електродів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кочан, О., Сапожник, Г., Паучок, В., & Майків, І. (2012). Удосконалення метрологічного програмного тесту вимірювального каналу температури. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 68(№4), 175-185.
2. Васильків, Н., Кочан, В., Кочан, О., Чирка, М. (2012). Дослідження впливу нерівномірності дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Вісник Хмельницького національного університету*, 4, 142–149.
3. Кочан, О., Биковий, П., Чирка, М., Кочан, В. (2012). Дослідження впливу швидкості дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності. *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, 3(1), 54-61.
4. Єрмоменко, В. & Кочан О. (2013). Проблеми використання методу найменших квадратів при дослідженні дрейфу термопар. *Метрологія та прилади*, 2, 98–105.
5. Кочан, О. (2013). Оцінка максимальної потужності нагрівачів термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 74, 29-33.
6. Кочан, О. (2013). Піч з керованим профілем температурного поля для компенсації похибки неоднорідності термопар. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 27–32.
7. Кочан, О. В. (2012). Нейромережевий метод керування для термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 2(21), 35-45.
8. Кочан В., Яскілка, В. & Кочан, О. (2013). Подавлення завад загального виду у вимірювальних каналах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, 2, 190–196.
9. Кочан, О. В. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. *Системи обробки інформації*, 6, 90-95.
10. Кочан, О.В. (2013). Оцінка тривалості самоперевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія приладобудування*, 46, 70-80.

11. Shu, C., & Kochan, O. (2013). Method of thermocouples self verification on operation place. *Sensors & Transducers*, 160(12), 55. **(Scopus)**.
12. Chen, Z., Kochan, O., Jun, S., & Demkiv, T. (2013). Decreasing of Thermocouple Inhomogeneity Impact on Temperature Measurement Error. *Sensors & Transducers*, 160(12), 509-513. **(Scopus)**.
13. Jun, S., & Kochan, O. (2014). Investigations of thermocouple drift irregularity impact on error of their inhomogeneity correction. *Measurement Science Review*, 14(1), 29-34. **(Scopus, Web of Science)**.
14. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В., & Рошупкін, О. (2013). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 3, 26-32.
15. Єрмоменко, В. О., & Кочан, О. В. (2013). Застосування регресійного аналізу для побудови моделі дрейфу функції перетворення термопар. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Технічні науки*, 8, 50-61.
16. Єрмоменко, В., & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів дослідження поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 2(74), 244-259.
17. Кочан, О. В. (2014). Бездемонтажний метод тестування стану електродів термоелектричних перетворювачів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 4, 96-101.
18. Кочан, О. (2014). Метод визначення похибки термоелектричних перетворювачів на місці експлуатації. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 75, 32–39.
19. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. *Технічна електродинаміка*, 4, 99–101.
20. Су, Ц., & Кочан, О. (2014). Механизм возникновения приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар и его влияние на результат измерения температуры. *Измерительная техника*, (10), 38-41.
21. Су, Ц. & Кочан, О. (2014). Подавление помех общего вида в измерительных каналах. *Приборы и техника эксперимента*, 1, 87–90.
22. 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*, 57(10), 1160-1166. **(Scopus, Web of Science)**.
23. Jun, S., & Kochan, O. (2015). Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*, 58(1), 86-89. **(Scopus, Web of Science)**.
24. Кочан, Р., Кочан, О., Клим, Г. & Гоц, Н. (2014). Комбінований метод корекції нелінійності АЦП. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування*, 802, 50-54.
25. Єрмоменко, В. & Кочан О. (2014). Дослідження класичних поліноміальних регресійних моделей без вільного члена. частина I. побудова емпірично ефективних оцінок параметрів регресійних моделей. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 4, 13–23.
26. Су, Ц., Кочан, О., & Йоцов, В. (2015). Методы снижения влияния приобретенной

термоелектричної неоднорідності термопар на погрешність вимірювання температури. *Измерительная техника*, 3, 52-55.

27.Kochan, O. (2015). The Study of Classical Polynomial Regression Models Without a Constant Term. Building Empirically Effective Estimates of the Parameters of Regression Models. *Sensors & Transducers*, 187(4), 82.

28.Jun, S., Kochan, O. V., & Jotsov, V. S. (2015). Methods of Reducing the Effect of the Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples on Temperature Measurement Error. *Measurement Techniques*, 58(3), 327-331. (**Scopus, Web of Science**).

29.Су, Ц., Кочан, О., Васильків, Н., & Кочан, Р. (2015). Метод корекції погрешності вимірювань температури із-за придбаної неоднорідності електродів термопар. *Измерительная техника*, 8, 49-53.

30.Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2015). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. *АКТА ІМЕКО*, 4(2), 80-84. (**Scopus**).

31.Jun, S., Kochan, O. V., Vasylykiv, N. M., & Kochan, R. V. (2015). A method of correcting the error of temperature measurements due to acquired inhomogeneity of the electrodes of thermocouples. *Measurement techniques*, 58(8), 904-910. (**Scopus, Web of Science**).

32.Su, J., Kochan, O., Wang, C. & Kochan, R. (2015). Theoretical and Experimental Research of Error of Method of Thermocouple with Controlled Profile of Temperature Field. *Measurement science review*, 15(6), 304-312. (**Scopus, Web of Science**).

33.Jun, S., Kochan, O., Kochan, V., & Wang, C. (2016). Development and investigation of the method for compensating thermoelectric inhomogeneity error. *International Journal of Thermophysics*, 37(1), 10. (**Scopus, Web of Science**).

34.Jun, S., Kochan, O., & Kochan, R. (2016). Thermocouples with built-in self-testing. *International Journal of Thermophysics*, 37(4), 37. (**Scopus, Web of Science**).

35.Sun, H., Kochan, R., Kochan, O. & Su, J. (2016). Integral nonlinearity of second-order single-bit sigma-delta modulator. *Технічна електродинаміка*, 6, 63-68. (**Scopus**).

36.Мукучук, М., Кочан, Р., Кочан, О., Jun, S., Stadnyk, B., & Stolyarchuk, P. (2016). Increasing metrological autonomy of in-plant measuring systems. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 193-197. (**Web of Science**).

37.Кочан, О. (2016). Корекція похибок дрейфу та набуті неоднорідності у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 77, 99-108.

38.Liu, Z., Song, W., Kochan, O., Мукучук, М., & Jun, S. (2017). Theoretical Study of the Conditions of Maximum Manifestation of the Error Due to Inhomogeneity of Thermocouple Legs. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 88. (**Scopus, Web of Science**).

39.Wang, J., Kochan, O., Przystupa, K., & Su, J. (2019). Information-measuring System to Study the Thermocouple with Controlled Temperature Field. *Measurement Science Review*, 19(4), 161-169. (**Scopus, Web of Science**).

40.Кочан О. (2017). Теоретичні основи оцінки стану електродів термопар у процесі експлуатації. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 14(3), 79-90.

41.Kochan, O., Su, J., & Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for

temperature measurements. In *E3S Web of Conferences*, 19(03023), 1-6. (**Scopus, Web of Science**).

42. Chen, J., Su, J., Kochan, O., & Levkiv, M. (2018). Metrological Software Test for Simulating the Method of Determining the Thermocouple Error in Situ During Operation. *Measurement Science Review*, 18(2), 52-58. (**Scopus, Web of Science**).

43. Jotsov, V., Kochan, O. & Su, J. (2018). Decreasing Influence of the Error Due to Acquired Inhomogeneity of Sensors by the Means of Artificial Intelligence. In: *Sgurev V., Jotsov V., Kacprzyk J. (eds) Practical Issues of Intelligent Innovations. Studies in Systems, Decision and Control*, (Vol. 140, pp. 89-130). Springer. (**Scopus**).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

44. Kochan, R., Kochan, O., Sapojnyk, G. & Chyrka, M. (2011). Investigation of Histogram Method Implementation for High Resolution ADC Testing. In: *Proceedings of the International Conference IDAACS 2011* (pp. 43–49). Praha, Czech Republic. (**Scopus**).

45. Кочан, О., Васильків, Н., Кочан, В. & Рошупкін, О. (2012). Дослідження невиключеної похибки неоднорідності термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. У *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції "Температура"* (сс. 150-152). Львів.

46. Єрмоменко, В., Кочан, О. (2013). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 29-30). Тернопіль.

47. Єрмоменко, В., Кочан, О. (2013). Побудова моделі дрейфу функції перетворення термопар за допомогою регресійного аналізу. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 31-32). Тернопіль.

48. Мачужак, В., Кочан В., Кочан О. (2013). Метод керування профілем температурного поля. В *Збірник праць III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів „Сучасні комп'ютерні інформаційні технології”* (сс. 103-104). Тернопіль.

49. Kochan, O., Sapojnyk, H., & Kochan, R. (2013). Temperature field control method based on neural network. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 21-24). Berlin. (**Scopus**).

50. Kochan, R., Kochan, O., Chyrka, M., Su, J. & Bykovyy, P. (2013). Approaches of Voltage Divider Development for Metrology Verification of ADC. In: *Proceedings of the 2013 IEEE 7 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2013* (pp. 70-76). Berlin, Germany. (**Scopus**).

51. Yeromenko, V., & Kochan, O. (2013). The conditional least squares method for thermocouples error modeling. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference* (Vol. 1, pp. 157-162). Berlin, Germany. (**Scopus**).

52. Кочан, О. (2013). Модель похибки термометричних перетворювачів на базі методу умовних найменших квадратів. В *Збірник праць Міжнародної науково-*

- технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань» (с. 149). Львів.
53. Кочан, О. (2013). Метод самодіагностики термоелектричних перетворювачів на місці їх експлуатації. В *Збірник праць Міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань»* (с. 199). Львів.
54. Єрмоменко, В. & Кочан, О. (2014). Метод умовних найменших квадратів для побудови моделі похибки термопар. В *Abstracts of conf. reports Dynamical system modeling and stability investigation: XVI International Conference: Modeling and Stability* (pp. 192). Kiev.
55. Chen, Z., Kochan, R., Kochan, O. & Yaremchuk, I. (2014). Investigation of Integral Nonlinearity of Third Order Sigma-Delta Modulator. In: *Proceedings of the International Conference TCSET'2014* (pp. 129-130). Lviv-Slavske.
56. Lei, M., Kochan, O., Kochan, R., Sapojnyk, H. (2014). Neural Network Method for Temperature Field Control. In *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 232). Lviv-Slavske.
57. Lin, Q., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2014). Approach of Testing Signals Generation for ADC Metrology Verification. In: *Proceedings of the International Conference TCSET'2014*, (pp. 247-248). Lviv-Slavske.
58. Єрмоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Побудова емпірично ефективних оцінок параметрів класичної поліноміальної регресії моделі без вільного члена. У: *матеріали п'ятнадцятої міжнародної наукової конференції ім. акад. Михайла Кравчука. Т. 3. Теорія ймовірностей та математична статистика* (с. 57-58). Київ.
59. Єрмоменко, В.О. & Кочан, О.В. (2014). Емпірично ефективні оцінки параметрів класичної поліноміальної регресійної моделі без вільного члена. У: *Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів Сучасні комп'ютерні інформаційні технології АСІТ'2014* (с. 22-24). Тернопіль.
60. Кочан, Р.В., Кочан, О.В., Клим, Г.І. & Гоц, Н.Є. (2014). Нелінійність АЦП на базі сигма-дельта модулятора третього порядку. У: *Збірнику матеріалів міжнародної наукової координаційної наради "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління" ICSM-2014* (с. 97-101). Тернопіль.
61. Су, Ц., Кочан, Р.В. & Кочан, О.В. (2014). Нелінійність аналого-цифрового перетворювача на базі сигма-дельта модулятора другого порядку. У: *збірнику XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми сучасної електротехніки–2014"* (с. 101). Київ.
62. Ma, N., Kochan, O., Su, J., Kochan, V. (2014). Decreasing of thermocouple inhomogeneity impact on temperature measurement error. In *Proceedings of the 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 105-110). Warsaw. (Scopus).
63. Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Su, J. & Klym, H. (2014). Method of Integral Nonlinearity Testing and Correction of Multi-Range ADC by Direct Measurement of Output Voltages of Multi-Resistors Divider. In: *Proceedings of the 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical*

- diagnostics for systems' reliability and safety* (pp. 76-80). Warsaw. **(Scopus)**.
- 64.Su, J., Kochan, O. & Kochan, R. (2015). Evaluation of error of method of thermocouple with controlled profile of temperature filed. In: *Proceedings of the 10th International Conference Measurement 2015* (pp. 301-304). Smolenice, Slovakia.
- 65.Hu, Z., Kochan, R., Kochan, O., Klym, H. & Su J. (2015). Integral nonlinearity correction of multi-range adc by iterative applying of multi-resistors divider. In: *Proceedings of the 10th International Conference Measurement 2015* (pp. 29-32). Smolenice, Slovakia.
- 66.Li, J., Kochan, R., Kochan, O. & Klym, H. (2015). Integral Nonlinearity Correction of ADC Using Multi-Resistors Voltage Divider. In: *Proceedings of the 2015 IEEE 8 International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2015* (pp. 767-772). Warsaw, Poland. **(Scopus, Web of Science)**.
- 67.Shu, C., Kochan, O., Kochan, V., & Vasylyuk, N. (2015). The method of self-testing of thermocouples in situ. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2015 IEEE 8th International Conference* (Vol. 2, pp. 773-778). Warsaw, Poland. **(Scopus, Web of Science)**.
- 68.Кочан, О.В. & Микійчук, М.М. (2016). Застосування нейронних мереж для зменшення похибок вимірювання температури термоелектричними перетворювачами. У: *Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах ВОТТІ-2016»* (сс. 16-18). Одеса (Затока).
- 69.Hu, Z., Su, J., Jotsov, V., Kochan, O., Mykyichuk, M., Kochan, R & Sasiuk, T. (2016) Data Science Applications to Improve Accuracy of Thermocouples. In: *Proceedings 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems* (pp. 180-188). Sofia, Bulgaria. **(Scopus, Web of Science)**.
- 70.Kochan, R, Ganczarzyk, T., Kochan, O. & Klym, H. (2016). Integral Nonlinearity of Third Order Single Bit Sigma-Delta Modulator. In: *Proceedings of 16th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2016* (pp. 1591 – 1593). Gyeongju, South Korea. **(Scopus)**.
- 71.Jun, S., Kochan, O., & Levkiv, M. (2017). Metrological software test for studying the method of thermocouple error determination during operation. In *Measurement, 2017 11th International Conference* (pp. 171-174). Smolenice, Slovakia. **(Scopus)**.
- 72.Kochan, O., Su, J., Kochan, R. (2017). Designing an accurate system for temperature measurements. In *Book of abstracts of the International conference Energy, Environment and Material systems (EEMS)* (pp. 103-104). Polanica Zdroj.
- 73.Kochan, O., Kochan, R., Kochan, V., & Su, J. (2017). Thermocouple with adjustable error. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2017 9th IEEE International Conference* (Vol. 2, pp. 684-689). Bucharest, Romania. **(Scopus, Web of Science)**.
- 74.Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. (2017). Розроблення теоретичних основ оцінки стану електродів термопар у процесі експлуатації. У *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (сс. 167-168).
- 75.Кочан О., Гусіна Є., Стадник А. & Рудник П. (2017). Метрологічний програмний тест дослідження методу визначення похибки термоелектричних перетворювачів у

процесі експлуатації. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (сс. 169-170).*

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

76. Кочан, О. & Кочан, Р. *Спосіб корекції похибки головної терморари. Пат. Україна 102981. G01K7/02.*
77. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. *Піч з керованим профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.*
78. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. *Пристрій для вимірювання температури в електронечках опору. Пат. України 104099. G01K7/01.*
79. Кочан, О. *Спосіб самодіагностики терморар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 104952. G01K13/00.*
80. Кочан, О. & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115846.*
81. Кочан, О. & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач із можливістю імітації заданої похибки. Пат. України 115931.*
82. Кочан, О. & Кочан, Р. *Система вимірювання та регулювання температури. Пат. України 115927.*
83. Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан В. *Спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта та пристрій для його реалізації. Пат. Україна 105541. G01K13/00.*

АНОТАЦІЇ

Кочан О. В. Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними терморарами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 "Прилади і методи вимірювання теплових величин". – Національний університет "Львівська політехніка" МОН України, Львів, 2020.

Дисертацію присвячено підвищенню точності вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів, терморари (ТП) яких мають значну термоелектричну неоднорідність, набуту при тривалій експлуатації при високих температурах. Розвиток теорії дав змогу виявити явище заміщення похибкою від термоелектричної неоднорідності похибки від дрейфу функції перетворення ТП при зміні профілю температурного поля вздовж їх електродів. Це дало змогу запропонувати новий підхід до метрологічного забезпечення вимірювання температури – методи визначення похибки ТП та діагностування стану їх електродів у процесі експлуатації без використання робочих еталонів. Також теоретично оцінено похибки запропонованих методів. Для їх реалізації запропоновано методи і засоби, які зменшують похибку вимірювального каналу (його похибка надалі менша за невиключену похибку ТП після застосування запропонованих методів). Ці методи і засоби досліджено шляхом імітаційного моделювання та експериментально, для чого запропоновано конструкцію ТП,

похибку якої можна довільно задавати. Також вдосконалено метод найменших квадратів, що дало змогу створити нейромережеву модель похибки ТП.

Ключові слова: Термоелектричний перетворювач, похибка вимірювання температури, дрейф функції перетворення, набута термоелектрична неоднорідність, визначення похибки термопар у процесі експлуатації.

Kochan O. V. Methods and means for increasing the accuracy of temperature measurements using thermoelectric converters with inhomogeneous legs. Manuscript copyright.

Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences in specialty 05.11.04 "Instruments and methods for measuring thermal quantities". – Lviv Polytechnic National University MES of Ukraine, Lviv, 2020.

The dissertation is devoted to increasing the accuracy of temperature measurements using thermocouples (TCs) with significant thermoelectric inhomogeneity acquired during long term operation under high temperatures. The analysis of its influence on temperature measurements has shown that acquired inhomogeneity is the main source of the measurement error, which is consistent with the known literature.

The development of the theory of the thermoelectricity allows detecting the phenomenon of replacement of error due to drift of the TC conversion characteristics (CC) by error due to thermoelectric inhomogeneity when the temperature field changes along the TC legs. This allows proposing a new approach to the metrological service of temperature measurements such as the method for determining the error of TC and diagnostics of the state of their legs during operation without working standards, only by means of a purposeful change of the temperature field along their legs. The theoretical estimation of the error is carried out for these methods.

To implement these methods, there were proposed methods and means that mitigate the error of the measuring channel and ensure the state when its error is less than the residual error of the TC after the use of the proposed methods for increasing its accuracy. The proposed methods and means are investigated using mathematical modeling. The method of conditional least squares was proposed (compulsory set the sum of residuals equal to zero for the polynomial regression without an intercept using the method of Lagrange multipliers to find the regression coefficients, which ensures the physical meaning of the regression of study of changes in the CC). The experimental studies of changes in the CC for TC operation under high temperatures were approximated using this method. This allows preparing enough data for both training and testing sets for a neural network to model the error of TC legs and to estimate the error of the proposed methods for determining the error of TCs and diagnostics of the state of TC legs during operation. The proposed methods were also studied experimentally, using the developed apparatus and the proposed TC, whose error can be arbitrarily set. The results of experimental studies confirmed the high accuracy of the proposed methods.

Scientific novelty is:

For the first time there is proposed

1) a concept of in situ calibration of the TC, for its implementation it is necessary and sufficient to determine the section of the TC that undergoes no degradation, which

allows using the section by purposefully moving the temperature gradient towards the reference junction.

2) a method for in-situ determining error due to the drift using the reference section and a purposeful shift of the temperature gradient so that the gradient is applied only to the reference section.

3) a method of in situ diagnosing TC legs is proposed, that, due to purposeful changes of temperature along TC, allows determining, by solving a system of linear equations, Seebeck coefficients of sections and determine the degree of their degradation to make a justified decision about need for substituting the TC.

4) a stable method to control the temperature field using a neural network (NN), that reduces the duration of setting a preset temperature field to one iteration by implementing an open control system and training the NN on the object of control.

5) a structure of a two-contour measurement system, which, due to alternate changes of contour functions (measurement and control of object's temperature or error correction and diagnostics of legs) provides measurement error of 1.3°C for type K TCs.

6) a method for setting the CC of the TC by adding two additional wires, which allows confirming experimentally the efficiency of the proposed methods.

There is further developed:

7) a model describing changes of e.m.f. of inhomogeneous TC versus changes in temperature along its legs, that allows establishing the relationship between the current and maximum values of errors due to drift and due to inhomogeneity.

8) a model of TC error, that describes the dependence of TC error on temperature and duration of operation, and temperature difference between the current and operation temperatures, which allows predicting the future time of operation of the TC.

Keywords: thermocouple, the error of temperature measurement, drift of the conversion characteristics, acquired thermoelectric inhomogeneity, determination of the error of a thermocouple during operation.

Кочан О. В. Методы и средства повышения точности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями с неоднородными термопарами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.04 "Приборы и методы измерения тепловых величин". – Национальный университет "Львовская политехника" МОН Украины, Львов, 2020.

Диссертация посвящена повышению точности измерения температуры при помощи термоэлектрических преобразователей, термопары (ТП) которых имеют значительную, приобретенную в процессе длительной эксплуатации при высоких температурах, термоэлектрическую неоднородность. Развитие теории позволило выявить явление замещения погрешностью из-за термоэлектрической неоднородности погрешности из-за дрейфа функции преобразования термопар при изменении профиля температурного поля вдоль ее электродов. Это позволило предложить новый подход к метрологическому обеспечению измерения температуры – методы определения погрешности ТП и диагностики состояния их электродов в

процессе эксплуатации без использования рабочих эталонов. Для их реализации предложены методы и средства, снижающие погрешность измерительного канала (его погрешность и далее меньше неисключенной погрешности ТП после применения предложенных методов). Эти методы и средства исследованы путем имитационного моделирования и экспериментально, для чего предложена ТП, погрешность которой можно задавать произвольно. Также усовершенствован метод наименьших квадратов, что позволило создать нейросетевую модель погрешности ТП.

Ключевые слова: Термоэлектрический преобразователь, погрешность измерения температуры, дрейф функции преобразования, приобретенная термоэлектрическая неоднородность, определение погрешности термопар в процессе эксплуатации.