

ВСТУП

Термоелектричні перетворювачі (термопари) широко застосовують для вимірювання температури різних об'єктів, а також в автоматизованих системах управління і контролю. Вимірювання температур за допомогою термопар набуло широкого поширення через надійної конструкції датчика, можливості працювати в широкому діапазоні температур і дешевизни. Широкому застосуванню термопари зобов'язані в першу чергу своїй простоті, зручності монтажу, можливості вимірювання локальної температури. Вони набагато більш лінійні, ніж багато інших датчики, а їх нелінійність на сьогоднішній день добре вивчена і описана в спеціальній літературі.

Основним призначенням термопари є вимірювання температури. Через різні фактори покази конкретної термопари можуть відрізнятися від встановлених стандартом. При виготовленні термоелектродних матеріалів для стандартних термопар необхідно пам'ятати, що неможна забезпечити повну відтворюваність складу матеріалів та градувальну характеристику термопар, виготовлених з них. Завжди будуть існувати відхилення, які характеризують точність стандартних термопар. У зв'язку з цим необхідно виконувати перевірку термоелектричних перетворювачів.

Тому об'єктом роботи є методика перевірки термоелектричних перетворювачів, а метою – її вдосконалення для підвищення точності та єдності вимірювань. Для досягнення цієї мети були поставлені та послідовно розв'язані такі завдання:

- огляд термоелектричних перетворювачів, їх класифікації та експлуатаційних особливостей;
- огляд нормативно-правових основ регулювання виробництва й експлуатації термоелектричних перетворювачів та чинних нормативних документів;
- вдосконалення методики перевірки термоелектричних перетворювачів.

1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 Аналіз вимог законодавства

Головним документом у галузі виробництва, експлуатації, перевірки та калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», вимоги якого обов'язково стосуються законодавчо регульованої сфери. [1]. У сфері законодавчо регульованої метрології застосовуються ЗВТ, які відповідають вимогам щодо точності, регламентованим для таких засобів, у встановлених умовах їх експлуатації. Законодавчо регульовані ЗВТ дозволяється застосовувати, випускати з виробництва, ремонту та в продаж і видавати напрокат лише за умови їх відповідності цьому закону та іншим нормативно-правовим актам, що містять вимоги до таких ЗВТ. До них відносяться також й термоелектричні перетворювачі як складові термометрів та систем автоматизованих вимірювань, які застосовують у галузях [1]:

- забезпечення захисту життя та охорони здоров'я громадян;
- контроль якості та безпечності харчових продуктів і лікарських засобів;
- контроль стану навколишнього природного середовища;
- контроль безпеки умов праці;
- роботи, що виконуються за дорученням органів досудового розслідування, органів прокуратури та судів.

Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту ЗВТ» загалом не стосується термоелектричних перетворювачів та ЗВТ або систем, до складу яких вони відносяться. [2].

Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту законодавчо регульованих ЗВТ» встановлює вимоги, яким повинні відповідати ЗВТ, які призначені для застосування у сфері законодавчо регульованої метрології, коли вони надаються на ринку та/або вводяться в експлуатацію для виконання завдань, пов'язаних з вимірюваннями [3]. До таких ЗВТ відносяться

термометри для здійснення контролю харчових продуктів, безпеки умов праці та проведення судових експертиз за дорученням органів досудового розслідування, органів прокуратури та судів. Вони також містяться у переліку категорій законодавчо регульованих ЗВТ, що підлягають періодичній повірці, та у затверджених їх міжповірочних інтервалах [4, 5].

Отже, положення цих правових актів мають бути обов'язково виконані при виробництві, експлуатації та повірці термоелектричних перетворювачів, якщо вони входять до складу вказаних термометрів.

1.2 Огляд чинних нормативних документів

Щодо електромагнітних витратомірів, які безпосередньо їх стосуються, в Україні у даний час чинним є 10 національних та гармонізованих міжнародних й регіональних нормативних документів.

Першим та найзагальнішим нормативним документом щодо термоелектричних перетворювачів є словник та загальні технічні вимоги [6]. Цей стандарт установлює основні і загальні терміни щодо термопар, їх класифікації, технічних вимог та вимог безпеки, правил приймання, методів випробування, транспортування, зберігання та гарантій виробника.

ДСТУ 3622-97 (ГОСТ 30543-97) встановлює основні вимоги щодо вибору та використання термоелектричних перетворювачів, а також способів їх встановлення та вибору з'єднувальних ліній [7].

Інший стандарт [8] встановлює технічні вимоги до дротів з платини та платинородієвих сплавів для термоелектричних перетворювачів, правила їх приймання, методи контролю транспортування, зберігання та гарантій виробника.

Ще два стандарти описують технічні характеристики та допустимі відхилення електрорушійної сили [9] та допуски та систему ідентифікації подовжувальних та компенсаційних проводів [10] термоелектричних перетворювачів, включаючи температурні значення термопар у реперних точках МТШ-90, вимоги до з'єднування, матеріалів та виготовлення. Крім того, вимоги до з'єднувачів для

термопар подано у ДСТУ EN 50212:2018 [11], а до термопарних кабелів та термопар у мінеральній ізоляції – у [12].

Також діє ДСТУ EN 62460:2018, який містить таблиці електрорушійної сили (ЕРС) для комбінованих термопар з елементами без домішок [13].

Щодо процедур повірки, то в Україні дійсний стандарт з методики повірки термопар [14] та з методики повірки (калібрування) еталонних термоелектричних перетворювачів та компараторів [15].

У переліках національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності ЗВТ суттєвим вимогам Технічного регламенту законодавчо регульованих ЗВТ містяться 5 стандартів, виконання яких є обов'язковим: ДСТУ 2857-94, ДСТУ EN 60584-1:2016, ДСТУ EN 60584-3:2016, ДСТУ 3885-99, ДСТУ ГОСТ 8.338:2004 [16]. Тому у дипломній роботі будемо керуватися розглянутими правовими та нормативними документами.

1.3 Вимоги до засобів повірки термоелектричних перетворювачів

Згідно з [14], при проведенні повірки термопар необхідно використовувати такі ЗВТ:

- еталонні 2-го розряду ртутні скляні термометри із похибкою за ГОСТ 8.558-93 у діапазоні температур від 0 до 300 °С;

- еталонні 1-го, 2-го та 3-го розрядів платинородій-платинові термоелектричні перетворювачі із похибкою за ГОСТ 8.558-93 у діапазоні температур від 300 °С до 1200 °С;

- еталонні 2-го та 3-го розрядів платинородій-платинородієві термоелектричні перетворювачі із похибкою за ГОСТ 8.558-93 у діапазоні температур від 600 °С до 1800 °С;

- повірочна установка, що містить дворядний або однорядний потенціометр постійного струму класу точності не нижче 0,01 за ДСТУ EN 60523:2015 з верхньою межею вимірювань не нижче 100 мВ та ціною ступеня молодшої вимірювальної декади не більше 10^{-6} В з безтермоточним перемикачем типу ПБ-

28В (у ГОСТ 8.338:2004 вказано стандарт щодо потенціометрів постійного струму ГОСТ 9245-79, але він нечинний);

- сучасні мікропроцесорні засоби вимірювань термо-ЕРС робочих термопар, наприклад автоматизовані системи повірки з межами допустимої похибки $\pm 0,2$ °C та $\pm 0,4$ °C.

Крім того, у якості допоміжних засобів при повірці термопар можуть бути використані:

- водяний термостат з діапазоном температури від 0 до 95 °C, градієнтом температури у робочому просторі не більше 0,05 °C/см, з ванною глибиною не менше 300 мм;

- паровий термостат з перепадом температури у робочому просторі за висотою на довжині середньої частини 200 мм не більше 0,03 °C, з ванною глибиною не менше 300 мм;

- масляний термостат з діапазоном температури від 95 °C до 300 °C, градієнтом температури у робочому просторі не більше 0,05 °C/см, з ванною глибиною не менше 300 мм;

- збільшувальне скло за ДСТУ ISO 3058:2016, кратністю від 3 до 5 (у ГОСТ 8.338:2004 вказано стандарт щодо луп ГОСТ 25706-83, але він нечинний);

- дві горизонтальні трубчасті печі опору, кожна з робочим простором довжиною від 500 мм до 600 мм, діаметром від 40 мм до 50 мм та максимальною робочою температурою не менше 1200 °C, градієнт температури за віссю печі (в її середній частині) при 1000 °C не повинен перевищувати 0,8 °C/см на ділянці довжиною не менше 50 мм, одна з печей має бути використана тільки для термопар із благородних металів;

- нікелевий товстостінний стакан довжиною від 80 мм до 100 мм, зовнішній діаметр якого вибирають у залежності від діаметра робочого простору печі, товщина стінки та дна стакану – не менше 5 мм, допускається застосовувати нікелевий блок відповідних розмірів з гніздами необхідного діаметра і глибиною від 70 мм до 90 мм;

- вертикальна трубчаста піч опору з робочим простором довжиною від 400 мм до 500 мм, діаметром від 20 мм до 30 мм та максимальною робочою температурою не менше 1800 °С, градієнт температури за віссю печі (в її середній частині) при 1400 °С не повинен перевищувати 1 °С/см на ділянці довжиною не менше 50 мм;
- засіб вимірювань електричного опору ізоляції, тип якого встановлюють в стандартах або технічних умовах на термопару даного типу;
- установка для випробування електричної міцності ізоляції, тип якої встановлюють в стандартах або технічних умовах на термопару даного типу;
- амперметр класу точності 1,0 згідно з ГОСТ 8711-93 з верхньою межею вимірювань 15 А;
- регулятор напруги потужністю до 10 кВт з межами регулювання напруги від 0 до 250 В;
- ртутні скляні термометри з ціною поділки 0,1 °С і межами вимірювань від 10 °С до 35 °С за ДСТУ ISO 1771:2006 (у ГОСТ 8.338:2004 вказано стандарт щодо рідинних скляних термометрів ГОСТ 28498-90, але він нечинний, однак ДСТУ ISO 1771:2006 дозволяє його використовувати, якщо є потреба в термометрах із ширшим діапазоном температур);
- пробірка з кварцового скла довжиною 500 мм, внутрішнім діаметром $(25,0 \pm 0,5)$ мм і стінками товщиною не більше 1 мм;
- подовжувальні дроти за ГОСТ 1790:2016, ГОСТ 1791:2014 (хоча вони в Україні офіційно не затверджені) і ГОСТ 10821:2009 до термопар типів ТХК (L), ТХКн (E), ТХА (K), ТЖК (J), ТНН (N), ТСС (I), ТПП10 (S), ТПП13 (R), значення термо-ЕРС індивідуально підібраної пари скомплектованих подовжувальних дротів при температурі робочого та вільного кінців пари, відповідно рівної 100 °С та 0 °С, не повинно відхилятися від значень відповідних типу термопарі номінальної статичної характеристики більше, ніж на $\pm 0,2\Delta_{\text{доп}}$ ($\Delta_{\text{доп}}$ – межа допустимих відхилень значень термо-ЕРС чутливого елемента термопарі від значень номінальної статичної характеристики, вказаної у нормативних документах), вираженого у мілівольтах (для ТХК (L) – 0,036 мВ, для ТХКн (E) –

0,020 мВ, ТХА (К) – 0,012 мВ, ТЖК (J) – 0,016 мВ, ТНН (N) – 0,009 мВ, ТСС (I) – 0,012 мВ, ТПП10 (S) – 0,002 мВ, ТПП13 (R) – 0,002 мВ);

– теплоізоляційні посудини або інші теплоізоляційні засоби, що забезпечують задану температуру протягом 1 год з граничними відхиленнями $\pm 0,1$ °С;

– платиновий і платинородієвий дріт діаметром 0,5 мм за ГОСТ 10821:2009;

– скляні пробірки довжиною (150 ± 10) мм, внутрішнім діаметром $(6,5 \pm 0,5)$ мм зі стінками товщиною не більше 1 мм;

– захисні пробірки з кварцового скла довжиною не менше 300 мм і внутрішнім діаметром, при якому термочутливий елемент повірюваних термопар щільно входять в пробірку за ГОСТ 19908-90 (хоча зараз він в Україні нечинний, однак, замість нього не впроваджено інший стандарт).

Також, всі вживані ЗВТ повинні бути повірені органами державної метрологічної служби або метрологічними службами юридичних осіб, акредитованими в установленому порядку, і мати чинні клейма або свідоцтва встановлених форм. Допускається застосовувати інші ЗВТ, що задовольняють за точністю вимогам ДСТУ ГОСТ 8.338:2004.

Таким чином, встановлено нормативні вимоги щодо термоелектричних перетворювачів та устаткування для їх повірки, які необхідно використати у дипломній роботі.

2 ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Згідно з [6], термопара – два провідника з різнорідних матеріалів, що з'єднані на одному кінці і утворюють частину пристрою, що використовує термоелектричний ефект для вимірювання температури. У свою чергу, термоелектричний ефект – генерування термо-ЕРС, що виникає через різницю температур між двома з'єднаннями різних металів або сплавів, що утворюють частину одного й того ж ланцюга.

Термопари широко застосовують для вимірювання температури різних об'єктів, а також в автоматизованих системах управління і контролю. Вимірювання температур за допомогою термопар набуло широкого поширення через надійну конструкцію датчика, можливості працювати в широкому діапазоні температур і дешевизни. Широкому застосуванню термопари зобов'язані в першу чергу своїй простоті, зручності монтажу, можливості вимірювання локальної температури. Вони набагато більш лінійні, ніж багато інших датчики, а їх нелінійність на сьогоднішній день добре вивчена і описана в спеціальній літературі. До переваг термопар відносяться також мала інерційність, можливість вимірювання малих різниць температур. Термопари незамінні при вимірюванні високих температур (аж до 2200 °C) в агресивних середовищах. Термопари можуть забезпечувати високу точність вимірювання температури на рівні $\pm 0,01$ °C. Вони виробляють на виході термо-ЕРС в діапазоні від мікрвольт до мілівольт, однак вимагають стабільного посилення для подальшої обробки.

2.1 Конструкція та принцип роботи термопар

Для забезпечення єдності вимірювань температури в якості міжнародного стандарту в 1968 році була прийнята Міжнародна Практична Температурна Шкала МПТШ-68 (в даний час стандартом є уточнена в 1990 році версія шкали – ITS-90 (МТШ -90), яка використовує в якості опорних (реперних) точок температури зміни агрегатного стану певних речовин, які можуть бути відтворені. Крім цього,

стандарт визначає типи еталонних засобів вимірювання у всьому діапазоні температур. Перелік деяких реперних точок МТШ-90 наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Короткий перелік реперних точок МТШ-90

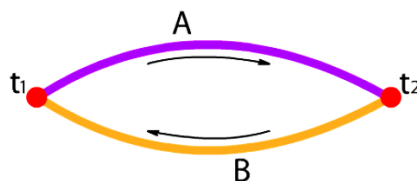
Реперна точка	Температура, К	Температура, °С
Точка затвердіння золота	1337,33	1064,18
Точка затвердіння срібла	1234,93	961,78
Точка затвердіння цинку	692,677	419,527
Потрійна точка води	273,16	0,01
Потрійна точка кисню	54,3584	-218,7916
Точка плавлення галію	302,9146	29,7646

Залежно від діапазону вимірюваних температур розрізняють дві основні групи методів вимірювання: контактні (власне термометрія) і безконтактні (пірометрія або термометрія випромінювання). Безконтактні способи застосовуються, як правило, для вимірювання дуже високих температур. Вимірювання температури за допомогою термопар відноситься до контактного способу вимірювання.

Принцип роботи термопар заснований на термоелектричному ефекті. Явище термоелектрики було відкрито німецьким фізиком Т. Зеєбеком у 1821 р. і також отримало назву ефект Зеєбека. Він полягає в наступному: якщо з'єднати два провідники (термоелектрода) з різнорідних металів або сплавів таким чином, щоб вони утворили замкнутий електричний ланцюг (рисунок 2.1), і потім підтримувати місця контактів (спаї) при різній температурі, то в ланцюзі буде протікати постійний струм. Ланцюг, який складається тільки з двох різних провідників (термоелектродів), називається термоелементом або термопарою [17].

ЕРС, що викликає струм в ланцюзі, називається термо-ЕРС Зеєбека і в першому наближенні залежить тільки від матеріалу термоелектродів і різниці температур спаїв. Величина термо-ЕРС становить мілівольти при різниці

температур в 100 К (173,15 °С) і температурі холодного спаю в 0 °С (наприклад, пара мідь-константан дає 4,25 мВ, платина-платинородій – 0,643 мВ).



$t_1 > t_2$; A – позитивний електрод; B – негативний електрод; спай з температурою t_1 – гарячий спай (робочий кінець), з температурою t_2 – холодний спай (вільний кінець); стрілками показано напрямок струму

Рисунок 2.1 – Схема термопари

Термоелектроди, за якими струм йде від гарячого спаю до холодного, домовилися вважати позитивним, від холодного до гарячого – негативним. При позначенні термопари, наприклад ТХА (термопара хромель-алюмель), на першому місці в назві вказується матеріал позитивного електрода, на другому – негативного.

Таким чином, знаючи температуру одного спаю (зазвичай її підтримують постійною, наприклад, 0 °С) і вимірюючи струм або напругу в ланцюзі, можна однозначно визначити невідому температуру іншого спаю.

Правильніше говорити, що температуру вимірюють не за допомогою термопари, а за допомогою термоелектричного термометра. Чутливим елементом такого термометра є термопара; термометричною величиною – термо-ЕРС, що виникає в термопарі; термометричною властивістю – зміна термо-ЕРС зі зміною температури;.

Основними факторами, від яких залежить конструкція термопари, є умови її експлуатації. При конструюванні того чи іншого термоелектричного перетворювача враховуються такі чинники, як агрегатний стан речовини, температуру якого потрібно вимірювати, «агресивність» зовнішнього середовища, діапазон вимірюваних температур, теплова інерційність та ін. Можна виділити наступні особливості конструкції термопар:

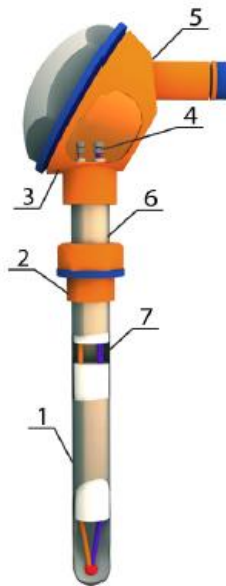
1. Кінці двох термоелектродів з'єднуються між собою в одній точці, утворюючи робочий спай. З'єднання відбувається, як правило, за допомогою зварки, а термоелектроди перед зварюванням скручують між собою. У спеціальних випадках замість зварювання може застосовуватися пайка. Термоелектроди з тугоплавких металів, наприклад, у вольфрам-ренієвих або вольфрам-молібденових термопарах, часто з'єднують тільки скруткою без подальшого зварювання.

2. Термоелектроди повинні бути з'єднані між собою тільки в робочому спаю. По всій решті довжині потрібна їх електрична ізоляція один від одного.

3. Спосіб ізоляції термоелектродів залежить від верхньої температурної межі застосування термоелектричного термометра. Якщо вказана межа не перевищує (100-1200 °С, то може застосовуватися будь-яка ізоляція, в тому числі повітряна. При температурах до 1300 °С ізоляцію виконують за допомогою порцелянових одно- і двоканальні трубок або бус. При більш високих температурах електроізоляційні властивості пірометричної порцеляни сильно погіршуються, а сама вона розм'якшується. У зв'язку з цим при більш високих температурах використовують трубки з окису алюмінію (до 1950 °С) і з окису магнію, окису берилію, двоокису торію і двоокису цирконію (вище 2000 °С).

4. Залежно від середовища, в якому здійснюється вимірювання температури, термопара може мати зовнішню захисну трубку-чохол з закритим кінцем. Дана трубка може бути металевою, керамічною або металокерамічною. Вона повинна забезпечувати механічну стійкість термоелектричного термометра, відсутність механічної напруги термоелектродів, гідроізоляцію, а в деяких випадках герметичність термометра. Матеріал захисної трубки-чохла повинен витримувати тривале перебування при температурі верхньої межі застосування даної конструкції термопари, а також бути хімічно стійким до середовища, в якому здійснюються вимірювання, мати гарну теплопровідність. Захисна трубка-чохол повинна бути газонепроникною і нечутливою до дії різких змін температури.

На рисунку 2.2 представлений один з варіантів конструктивного виконання термопари, а на рисунку 2.3 – класифікація типів конструктивного виконання термопар.



1 – захисна гільза, 2 – нерухомий штуцер (є варіанти виконання з рухомим штуцером), 3 – голівка, 4 – розетка із ізоляційного матеріалу із затискачами для приєднання термоелектродів та подовжувальних дротів, 5 – патрубок з сальниковим ущільнювачем, 6 – з'єднувальна трубка, 7 – термоелектроди

Рисунок 2.2 – Конструктивна схема термоелектричного термометра

Довжина робочої частини термопари може бути різною: від 120 мм до 1580 мм для одностонних термоелектричних перетворювачів, до 20000 мм – для багастонних.

Згідно з принципом роботи термопари її вільні кінці (холодний спай) повинні знаходитися при постійній температурі, бажано близькою до 0 °С. До цих кінців приєднують з'єднувальні дроти, які йдуть до вимірювального приладу. Якщо розташовувати вільні кінці у голівці термоелектричного термометра (рисунок 2.2), то виконати цю умову практично неможливо. Головка термометра може перебувати при дуже високих температурах, а також ці температури можуть змінюватися через зміну стану середовища, в якій здійснюються вимірювання. Також не завжди можливо розмістити вимірювальний прилад у безпосередній близькості від термопари. Таким чином, виникає необхідність у віддаленні точок підключення вимірювального приладу (вільних кінців термопари) від безпосереднього місця вимірювання температури. Цю задачу вирішують за допомогою компенсаційних (подовжувальних) дротів.

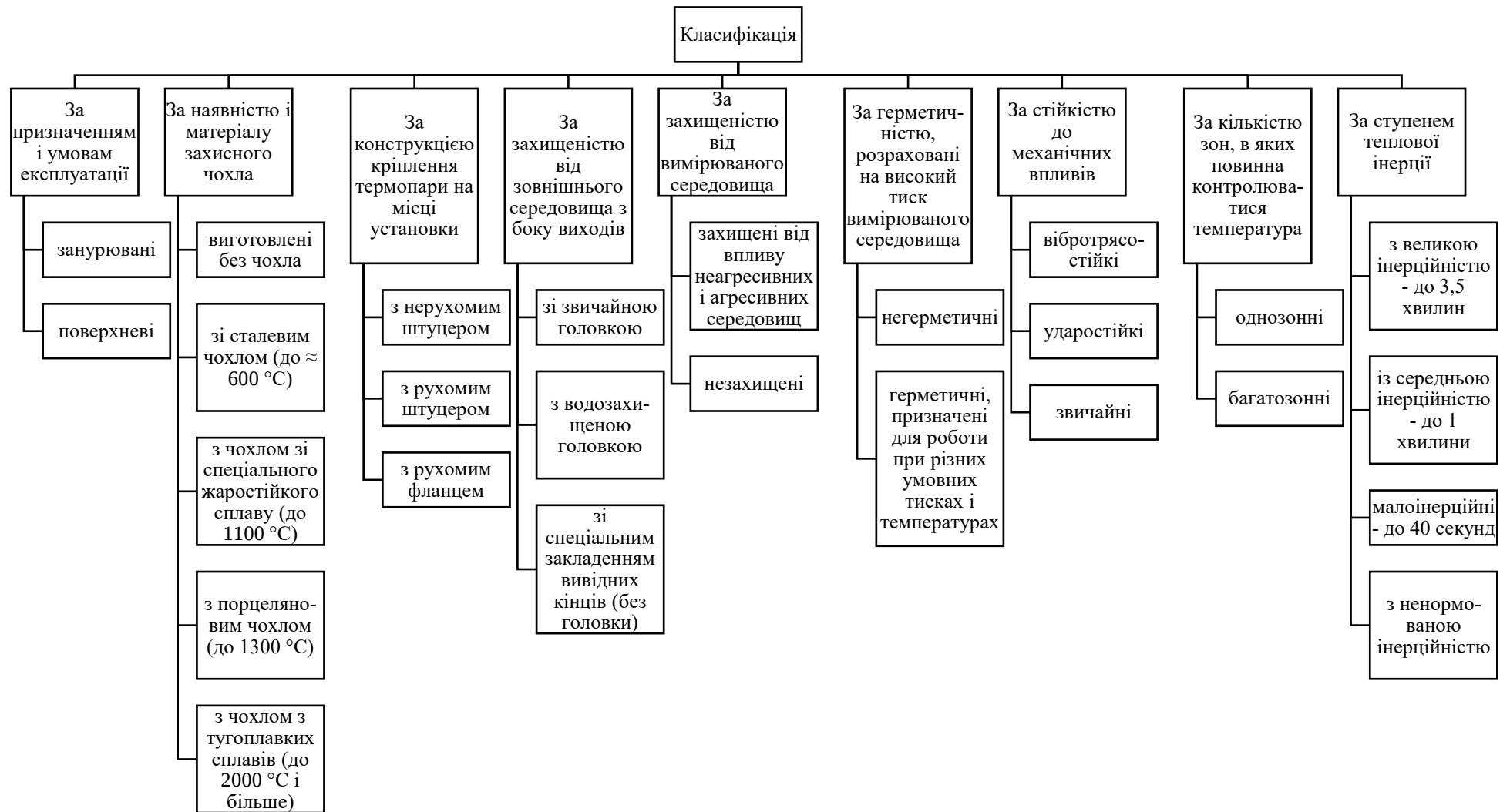
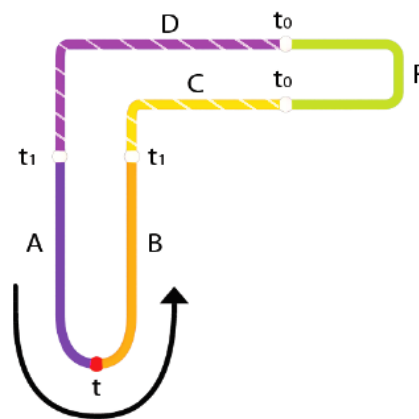


Рисунок 2.3 – Класифікація типів конструктивного виконання термопар

У найпростішому випадку компенсаційні дроти можуть бути виготовлені з тих же сплавів, що й термоелектроди. Але, як правило, дроти, що виводяться з головки термометра, будуть перебувати при температурах набагато нижчих, ніж термоелектроди. Цей факт дозволяє замінити дорогі термоелектродні сплави зі спеціальними властивостями на більш дешеві. Необхідно тільки забезпечити умови, що виключають можливість утворення паразитних (наведених) термо-ЕРС.

Схема термоелектричного ланцюга, яка створюється при наявності подовжувальних дротів, представлена на рисунку 2.4.



A, B – основні термоелектроди; C, D – компенсаційні (подовжувальні) дроти; F – з'єднувальні дроти, за допомогою яких підключаються вимірювальний прилад

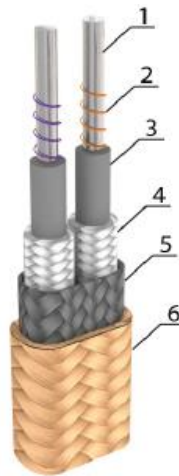
Рисунок 2.4 – Схема включення подовжувальних дротів у ланцюг термопари

Для уникнення утворення паразитних термо-ЕРС необхідно, щоб дроти C та D при температурах T_1 та T_0 створювали таку саму термо-ЕРС, що й термоелектроди A та B при тих самих температурах:

$$E_{AB}(T_1; T_0) = E_{CD}(T_1; T_0), \quad (2.1)$$

Дроти, що задовольняють умові (2.1), називаються подовжувальними (компенсаційними). Такі дроти, з'єднані з термоелектродами і з'єднувальними дротами, розвивають при невеликих температурах (не більше (100-150) °C) термо-ЕРС, рівну термо-ЕРС термопари. Основне призначення компенсаційних дротів –

відведення вільних кінців термопари в зону з відомою і постійною температурою [17]. Приклад конструкції компенсаційних дротів наведена на рисунку 2.5.



1- жила, 2 – кольорова бавовняна розпізнавальна нитка, 3 – гумова ізоляція, 4 – бавовняне обплетення, 5 - бавовняне обплетення, просочене протигнільним розчином, 6 – зовнішнє обплетення із сталевого чи мідного дроту

Рисунок 2.5 – Конструкція подовжувальних дротів типу КПП

2.2 Види термопар

2.2.1 Термопара хромель-алюмель (ТХА)

Одна з найпоширеніших термопар, що застосовуються в промисловості і наукових дослідженнях. Дозволяє довго вимірювати температури до 1100 °С і короткочасно – до 1300 °С. Також використовується для вимірювання низьких температур до -200 °С. ТХА призначена для роботи в інертних і окислювальних середовищах, може використовуватися для вимірювань в сухому водні і короткочасно в вакуумі. Термоелектрична характеристика даної термопари практично лінійна, чутливість становить близько 40 мкВ/°С. ТХА є найбільш стійкою серед термопар інших типів в умовах реакторного опромінення [18].

До недоліків даної термопари можна віднести високу чутливість до деформації термоелектродів і оборотну нестабільність термо-ЕРС.

ТХА виготовляють за [9], термоелектродний дріт для неї – за [11]. У ТХА позитивним електродом є дріт з сплаву нікель-хром, негативним – дріт з сплаву нікель-алюміній за ДСТУ ГОСТ 492:2007.

Дана термопара застосовується для вимірювання температури в промислових печах, нагрівальних пристроях, енергосиловому устаткуванні, а також в різній науковій апаратурі і лабораторних приладах. ТХА призначена для вимірювання температури в окислювальних і інертних середовищах. Вміст кисню в окислювальному середовищі має бути не менше 2-3% або його присутність повинна бути практично виключена. В іншому випадку у дроті різко збільшується селективне окислення хрому, його концентрація зменшується, що призводить до істотного зменшення термо-ЕРС цього сплаву. ТХА може також застосовуватися в відновлювальній або змінній окислювально-відновній атмосфері, якщо має надійний захисний чохол.

Як ізоляційні матеріалів для ТХА можуть бути використані: фарфор, азбест, скловолокно, кварц, емалі, високо вогнестійкі оксиди.

Найбільш частими причинами виходу ТХА з ладу є: руйнування термоелектрода з алюмелю внаслідок його інтеркристалітної корозії та окрихчення; руйнування термоелектрода з хромелю внаслідок його корозії (корозія типу «зеленої гнилі»). Інтеркристалітна корозія і окрихчення сплаву алюмель відбувається в результаті нагрівання термоелектрода до температури від 650 °С до 820 °С в атмосфері, що містить сірку. Джерелами появи сірки можуть бути: паливо печей, залишки олії й емульсій в захисних чохлах термопари, деякі сорти азбесту, цементу та інших матеріалів, з яких можуть бути виготовлені захисні чохла. Запобігти цьому можна тільки повністю виключивши влучення сірки в навколишнє атмосферу. Корозія сплаву хромель може бути викликана селективним внутрішнім окисленням хрому внаслідок роботи термоелектрода в атмосфері, що містить пари води або СО (слабоокислювальна атмосфера). Запобігання корозії можна шляхом застосування вентильованих захисних чохлів великого діаметру або чохлів з розміщеними усередині геттером.

2.2.2 Термопара хромель-копель (ТХК)

Одна з найпоширеніших термопар, що застосовуються в промисловості і наукових дослідженнях. ТХК дозволяє проводити вимірювання температури в інертних і окислювальних середовищах до 800 °С тривало і до 1100 °С короткочасно. Нижня межа вимірюваних температур обмежена -253 °С. У зв'язку з наявністю в промисловості ТХА, ТХК застосовується, як правило, для тривалих вимірювань до 600 °С. Термопари даного типу мають найбільшу чутливість з усіх промислових термопар, яка перевищує 81 мкВ/°С при температурах вище 200 °С. Також ця термопара має практично лінійну градувальну характеристику. ТХК властива виключно висока термоелектрична стабільність при температурах до 600 °С. До недоліків термопар даного типу можна віднести високу чутливість до деформації термоелектрода [18].

Градування ТХК здійснюється за градувальними таблицями відповідно до [9], термоелектродний дріт для неї виготовляють за [11]. У ТХК позитивним електродом є дріт з нікелевого сплаву хромель, негативним – дріт з мідно-нікелевого сплаву копель за ДСТУ ГОСТ 492:2007.

Основним робочим середовищем ТХК є окислювальне або таке, що містить інертні гази. Термопара також може використовуватися в вакуумі при високій температурі, але нетривалий час. Постійне використання ТХК у вказаному середовищі може призвести до селективного випаровування хрому з позитивного електрода. Для використання даної термопари в атмосфері, що містить сірку, в відновній, змінній окислювально-відновній, а також в слабокислій атмосфері потрібний високий (газощільний) захист. В атмосфері, що містить хлор або фтор, ТХК може працювати при температурах до 200 °С.

2.2.3 Термопара залізо-константан (ТЗК)

Термопари даного типу широко використовуються в промисловості і наукових дослідженнях. ТЗК дозволяє проводити вимірювання в відновлювальних,

окисних, а також інертних середовищах і вакуумі. ТЗК дозволяє вимірювати як позитивні температури (до 1100 °С), так і негативні (до -203 °С). Слід окремо зауважити, що саме вимір позитивних спільно з негативними температурами є рекомендованим застосуванням термопари даного типу. Використання цих термопар для вимірювання виключно негативних температур не рекомендується, так як існують аналоги з кращими характеристиками. При тривалому застосуванні максимальна робоча температура становить 750 °С, при короткочасному – 1100 °С.

Термопари даного типу мають високу чутливість, яка становить (50-65) мкВ/°С. Також варто відзначити їх порівняно низьку вартість. До їх недоліків можна віднести високу чутливість до деформації термоелектродів, а також низьку корозійну стійкість залізного термоелектрода.

У ТЗК позитивний електрод виконаний з технічно чистого заліза (маловуглецевої сталі), негативний – з мідно-нікелевого сплаву константан (ДСТУ ГОСТ 492:2007) [18].

ТЗК стійко працює в окислювальній і відновній атмосферах. При температурах близько 769 °С і 910 °С залізо, з якого виготовлений позитивний електрод термопари, зазнає магнітне і $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення, які впливають на термоелектричні властивості. У зв'язку з цим термопара, яка перебувала при температурах вище 760 °С навіть протягом короткого тимчасового інтервалу, не може використовуватися для подальших точних вимірювань при температурах нижче 760 °С, так як її покази можуть не відповідати градууювальній таблиці.

Термін служби термопари залежить від поперечного перерізу термоелектродів. Діаметр електродів термопари слід вибирати прямопропорційно вимірюваній температурі. У деяких джерелах наводяться наступні рекомендації щодо вибору діаметра електродів термопар в чохлах для тривалого вимірювання температури: 760 °С – 3,2 мм; 590 °С – 1,6 мм; 480 °С – 0,8 мм; 370 °С – (0,3-0,5) мм.

При температурах більше 500 °С використання ТЗК в атмосфері, що містить сірку, можливо тільки при наявності надійного газощільного захисту.

2.2.4 Термопара вольфрам-рений (ТВР)

ТВР є однією з кращих серед промислових термопар для вимірювання температур вище 1800 °С. Вона використовується для вимірювання температур до 3000 °С. Нижня межа вимірюваних температур, як правило, обмежена 1300 °С. Робочою атмосферою є аргон, азот, гелій, сухий водень або вакуум. Термо-ЕРС при 2500 °С становить 34 мВ для термопар з сплавів ВР5/20 і ВАР5/ВР20 і 22 мВ для термопар зі сплаву ВР10/20, чутливість термопар – (7-10) мкВ/°С і (4-7) мкВ/°С відповідно.

ТВР мають хороші механічні властивості при високих температурах, можуть працювати при впливі великих знакозмінних навантажень, а також при частих і різких теплозмінах. Термопари даного типу невибагливі при виготовленні і монтажі, так як порівняно мало чутливі до забруднень. Серед недоліків ТВР можна виділити погану відтворюваність термо-ЕРС; нестабільність термо-ЕРС в умовах опромінення; значне падіння чутливості при температурах вище 2400 °С.

Градуювання ТВР здійснюється за градуовальними таблицями відповідно до [9]. Дріт для термоелектродів зі сплавів ВР5, ВАР5 і ВР20 виготовляється за технічними умовами. Термоелектродний дріт зі сплаву ВР10 серійно не виробляється. Термопара з сплавів ВАР5/ВР20 дає більш точний результат при тривалих вимірюваннях, ніж термопара з сплавів ВР5/20.

ТВР застосовують в галузях промисловості, пов'язаних з високими температурами, наприклад, для вимірювання температури при виробництві тугоплавких металів, твердих сплавів і кераміки, при виплавці і розливанні сталей і сплавів, для вимірювання температури газових потоків і низькотемпературної плазми в газотурбінних двигунах, МГД-генераторах, а також в атомній енергетиці.

ТВР призначені для тривалого вимірювання температури в чистих інертних середовищах, сухому водні і вакуумі. Навіть невелика кількість кисню істотно зменшує термін служби термопари. В окислювальних середовищах термопари даного типу можуть бути використані тільки для вимірювання температури в швидкоплинних процесах. При значеннях температури вище значень, при яких

починається катастрофічне окислення, термін служби термопари обчислюється хвилинами.

Використання ТВР не рекомендується в атмосфері вологого водню і відновлювальних середовищах, що містять вуглець. Реакція вольфрам-ренієвих сплавів з парами вуглеводнів починається вже при 1000 °С. Взаємодія з вуглецем може привести до окрихчування термоелектродів й істотного збільшення нестабільності термопари. Виникнення крихкості спостерігається вже при 1700 °С. Контакт з вуглецем знижує граничну вимірювану температуру до 2500 °С. Однак, існують випадки використання ТВР в високотемпературних печах з графітовими нагрівачами. Загальний висновок можна сформулювати наступним чином: термін служби термопари залежить у великій мірі від характеру атмосфери, матеріалу ізоляції і робочої температури.

Для ізоляції термоелектродів використовують кераміку з BeO, HfO₂, ThO₂, Y₂O₃. Окис берилію може використовуватися при температурах, що не перевищують температуру плавлення даного матеріалу (~ 2570 °С). BeO є найвживанішим ізолятором для ТВР. Слід зазначити, що необхідно використовувати BeO чистотою не менше 99,9 % [18]. Для вимірювання температур нижче 1600 °С електроди термопари ізолюють окисом Al₂O₃ чистотою 99,5% або MgO. При цьому кераміка повинна бути прожарена для видалення органічних і неорганічних домішок. При дуже високих температурах використовують термопари з неізольованими термоелектродами. В окислювальних середовищах для захисту термопари використовують металеві чохла з Nb, Ta, Mo і сплавів Mo- Re, W-Re з покриттями. Термопара з термоелектродами, покритими іридієм, може короткочасно експлуатуватися на повітрі ((30-40) год при температурі (2000-2400) °С).

2.2.5 Термопара вольфрам-молібден (ТВМ)

Термопара призначена для вимірювання високих температур. Вимірювання за допомогою ТВМ можуть проводитися в інертних середовищах, середовищі

водню або вакуумі. Діапазон вимірюваних температур становить (1400-1800) °С, У спеціальних випадках даний діапазон може бути розширений до 2100 °С, гранична робоча температура ~ 2400 °С. ТВМ має чутливість 6,5 мкВ/°С в зазначеному діапазоні температур. Термоелектроди мають високу механічну міцність. При виготовленні, монтажі та експлуатації термопар не пред'являються жорсткі вимоги до дотримання хімічної чистоти. ТВМ є найдешевшою у виготовленні серед інших термопар, придатних для вимірювання високих температур.

Серед недоліків ТВМ можна виділити погану відтворюваність термо-ЕРС; невелику величину термо-ЕРС і чутливості; інверсію полярності; окрихчування після нагрівання при високих температурах.

Основна область застосування ТВМ – короточасні вимірювання температури рідких сталей, сплавів і шлаків в різного роду печах, конверторах і ківшах. Варто зауважити, що з появою ТВР і платинородій-платинородій, ТВМ стала використовуватися для вимірювання температур в процесах виплавки та розливання тільки невідповідальних сплавів.

Для виготовлення термоелектродів ТВМ використовуються метали технічної чистоти. Метали високої чистоти, як правило, не застосовуються, так як значно збільшують вартість термопар і пред'являють підвищені вимоги до відсутності забруднення. Позитивний електрод в ТВМ зроблений з вольфраму, негативний – з молібдену (через інверсії полярності дане твердження справедливо для температур вище 1400 °С) [18].

ТВМ служить для вимірювання температури в середовищі водню, інертних газів або вакуумі. Вольфрам і молібден починають окислюватися на повітрі при температурі близько 400 °С. З ростом температури процес окислення посилюється. Зазначені метали не вступають в реакцію з воднем аж до температури плавлення та інертними газами. При цьому ні водень, ні інертні гази не повинні містити окислювальних домішок. При використанні термопар вище встановлених границь рекомендується використовувати термопару без ізоляції, так як при температурах більше 2000 °С молібден і вольфрам починають взаємодіяти з багатьма оксидами, з яких зазвичай виготовляють ізоляцію.

Якщо електроди захищені за допомогою кераміки і термопара має захисний ковпачок, то з її допомогою можна проводити короточасні вимірювання температури в окислювальних середовищах і розплавлених металах.

Термoeлектроди ТВМ для разових вимірювань температури рідкої сталі ізолюють глиноземистою керамікою (Al_2O_3) і захищають кварцовими наконечниками.

2.2.6 Термопари платинородій-платина (ТПП)

ТПП є одними з найпоширеніших для вимірювання температур до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. До цього типу належать термопари, виготовлені з платини і сплаву платини з родієм (10 % Rh), і з платини і сплаву платини з родієм (13% Rh). ТПП призначені для виконання вимірювань температури в окислювальних і інертних середовищах. Гранична робоча температура при тривалих вимірюваннях становить $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, при короточасних – $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. ТПП мають практично лінійну термоелектричну характеристику в області температур від $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, чутливість (10-12) $\text{мкВ}/^{\circ}\text{C}$ (10% Rh) і (11-14) $\text{мкВ}/^{\circ}\text{C}$ (13% Rh). Іншими перевагами цих термопар є висока точність вимірювань, хороша відтворюваність і стабільність термо-ЕРС. Варто зауважити, що термопари даного типу виступають в якості еталонних приладів для відтворення Міжнародної практичної температурної шкали (МПТШ) в області температур від $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

До недоліків ТПП можна віднести високу вартість, нестабільність роботи в умовах опромінення, високу чутливість до забруднень металевими і неметалевими домішками при виготовленні, монтажі та експлуатації.

ТПП використовуються в різних галузях промисловості і науки, де потрібна висока точність і надійність вимірювань.

Градування ТПП (10% Rh) здійснюється за [9], термоелектродний дріт виготовляється за [8]. Термоелектродний дріт для ТПП (13% Rh) виготовляється за технічними умовами. Позитивним є термоелектроди, виготовлений з платинородію, негативним – з платини.

ТПП призначена для вимірювання температури в окислювальних і інертних середовищах. При наявності захисту термопар даного типу можуть бути використані для вимірювань в відновлювальних середовищах і середовищах, що містять пари миш'яку, сірки, свинцю, цинку, фосфору.

На практиці ТПП рідко застосовують для вимірювання температур нижче 0°C , так як чутливість термопар даного типу падає при зниженні температури і стає рівною нулю при -138°C . Проте, в деяких стандартах термо-ЕРС термопар нормується при температурах до -50°C . ТПП не використовують для вимірювання температур в діапазоні від 0 до 300°C , а для температур від 300°C до 600°C застосовують тільки для отримання порівняльних даних [18].

Верхня температурна межа короткочасного застосування ТПП обмежується 1600°C , довготривалого застосування – 1400°C . При температурах вище 1400°C відбувається стрімке зростання зерен платинового термоелектрода. При наявності хорошого захисту термопару можна використовувати для тривалих вимірювань при температурах до 1500°C .

Ізоляцією для термоелектродів робочих термопар до температури 1200°C можуть служити кварц, фарфор, муллит, силіманіт, вогнетривкий фарфор. Термоелектроди зразкових термопар ізолюють плавленням кварцом. Якщо термопара використовується для вимірювання температур до 1400°C , то в якості ізоляції застосовується кераміка з підвищеним вмістом Al_2O_3 . У слабоокислювальній і відновній атмосфері при температурах понад 1200°C , а також у всіх випадках застосування термопар при температурах більше 1400°C слід використовувати кераміку з високочистого окису алюмінію. При роботі в відновлювальній атмосфері іноді в якості ізоляції застосовують окис магнію.

Внутрішні чохла для термопар, як правило, виготовляють з тих же матеріалів, з яких зроблена ізоляційна кераміка. Обов'язковою умовою є газощільність таких матеріалів.

Для захисту робочих спаїв термопар, призначених для разових вимірювань температури рідких сталей і сплавів, застосовуються кварцові наконечники.

ТПП дуже чутливі до різного роду хімічних забруднень, які можуть бути причиною крихкості і зниження міцності, а також виникнення сильного дрейфу показів термопари. Особливо чутливий до забруднень платиновий електрод. Джерелами забруднення можуть стати матеріали, з яких виготовлена ізоляція і захисний чохол, нагрівальний пристрій і його атмосфера, предмети, що знаходяться в безпосередній близькості від термопари.

Термоелетроди повинні бути ізольовані однією двоканальною керамічною трубкою по всій робочій довжині. Між ізолюючої трубкою і керамічним захисним чохлом, так само як між термоелектродами і трубкою, повинні бути достатні, добре вентильовані зазори. Слід ретельно очистити термоелектроди від слідів мастила та жиру перед їх розміщенням в ізолюючу і захисну кераміку. Металеві чохла повинні бути також очищені від бруду, залишків мастила, стружки та ін. Перед монтажем всі компоненти термопари – електроди, ізолюючу і захисну кераміку і чохла – необхідно відпалити при високій температурі. Конструкція термопари повинна бути такою, щоб термоелектрод не служив опорою для ізолюючої кераміки. Дана рекомендація особливо важлива для термопар, що встановлюються вертикально.

2.2.7 Термопари платиновородій-платиновородій (ТПР)

ТПР призначена для вимірювання температури в окислювальних і нейтральних середовищах. Також можливо її використання в вакуумі. Максимальна робоча температура при тривалих вимірюваннях становить 1600 °С, при короткочасних – 1800 °С. При температурах вище 1200 °С ТПР має лінійну термоелектричну характеристику, чутливість (10,5-11,5) мкВ/°С і хорошу стабільність термо-ЕРС. ТПР може застосовуватися без подовжувальних дротів завдяки низькій чутливості в області температур від 0 до 100 °С [18].

У порівнянні з ТПП, ТПР має трохи меншу термо-ЕРС, при цьому з її допомогою можна вимірювати більш високі температури. ТПР має велику механічну міцність, велику стабільність при високих температурах, меншу

схильність до зростання зерна і окрихчування, а також меншу чутливість до забруднення.

ТПР активно використовується в областях, де необхідне тривале вимірювання температури вище 1400 °С. До них відносяться металургія, склоплавильна, цементна промисловість, виробництво вогнетривів. Також термопари даного типу застосовуються у зразкових термометрах.

Градуювання ТПР здійснюється за [9], термоелектродний дріт виготовляється за [8]. Для виготовлення ТПР використовуються сплави платини з родієм ПР30 і ПР6, що містять 30% і 6% родію (Rh) відповідно. Чистота платини і родію, які використовуються у виробництві сплавів, повинна бути більше або дорівнювати 99,95%. Позитивним є термоелектроди, виготовлений з платинородію ПР30, негативним – з платинородію ПР6.

ТПР використовують в окислювальних і нейтральних середовищах, а також у вакуумі. Максимальна робоча температура ТПР визначається температурою плавлення негативного термоелектрода, виготовленого із сплаву ПР6 (1820 °С) і становить 1800 °С. При тривалих вимірах робоча температура обмежується значенням 1600 °С.

Без надійного захисту не можна використовувати термопари даного типу в відновлювальних атмосферах і атмосферах, що містять пари металів і неметалів. Для ізоляції і захисту ТПР застосовують кераміку з Al_2O_3 високої чистоти.

Причини виходу ТПР з ладу внаслідок крихкості, зниження механічної міцності або виключно великого дрейфу термо-ЕРС, як правило, збігаються з причинами аналогічних проблем, що виникають у ТПП. Але вихід з ладу ТПР відбувається значно рідше в порівнянні з ТПП, так як сплави платини з родієм менш схильні до хімічних забруднень і зростання зерна, ніж чиста платина, з якої виготовляють негативний електрод ТПП.

3 РОЗРОБКА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ПОВІРКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1 Основні джерела похибок вимірювань за допомогою термопар

Будь-яке вимірювання виконується з тією або іншою точністю. Точність вимірювання залежить від методу, зовнішніх умов, стану засобів вимірювання і деяких інших чинників. Основні джерела похибок вимірювань температури за допомогою термопар є такі [19]:

1. Зміна термо-ЕРС в процесі роботи термопар. Це явище отримало назву термоелектричної нестабільності термоелектродних сплавів. Встановлено, що в процесі експлуатації всі термоелектродні сплави змінюють свою термо-ЕРС, що призводить до зміни показів термопар. При відносно низьких температурах або при короткочасній експлуатації зміни термо-ЕРС можуть бути незначними і не збільшувати похибку вимірювань. При високих температурах або тривалій експлуатації термопар нестабільність може досягати великих значень, що призводить до істотного зниження точності вимірювань. Основними причинами, що викликають термоелектричну нестабільність, є: взаємодія термоелектродів з навколишнім середовищем; взаємодія електродів з ізолюючими і захисними матеріалами; взаємодія термоелектродів один з одним; внутрішні процеси, що протікають в термоелектродних сплавах при зміні температури, вплив радіації, електромагнітних полів, високого тиску.

2. На точність вимірювань може впливати опір ізоляції термоелектродів. Під впливом високих температур може знизитися електричний опір ізоляції термоелектродів, що, в свою чергу, може привести до суттєвого спотворення показань термопар.

3. До виникнення похибок вимірювань може привести неправильний вибір вимірювального приладу. При зменшенні діаметра термоелектродів зростає питомий опір (опір на одиницю довжини) ланцюга. Такий же ефект спостерігається і при підвищенні температури. Якщо вхідний опір вимірювального приладу не

відповідає опору підключеного ланцюга, то можуть виникнути великі похибки вимірювань.

4. Причиною виникнення похибок може стати зміна температури вільних кінців термопари. Ця температура може змінюватися в процесі вимірювання або може відрізнятися від температури вільних кінців під час градуювання термопари.

5. Похибка вимірювання може виникнути через те, що електроди термопари мають різні значення термо-ЕРС уздовж своєї довжини. Це явище називається термоелектричної неоднорідністю термоелектродних сплавів і виникає через неоднорідність фізичних властивостей металів і сплавів, з яких виготовлені електроди термопари. Неоднорідність фізичних властивостей обумовлена коливаннями складу і структури матеріалів, причинами яких можуть бути радіоактивне опромінення, механічний або електромагнітний вплив на безпосередньо електроди або заготовки, з яких вони виготовлені, хімічні реакції, що протікають в процесі виготовлення або експлуатації електродів термопари.

6. Похибки у визначенні градуювальної характеристики еталонних термопар.

7. Відхилення градуювальної характеристики термопар від стандартної градуювальної таблиці.

3.2 Градуювання та перевірка термопар

Щоб визначити температуру за допомогою термопар, необхідно зіставити конкретні значення термо-ЕРС з відповідними значеннями температури. Тобто шкала термоелектричного термометра повинна відображати градуси.

Термопари можна умовно розділити на дві групи:

- з номінальними статичними характеристиками перетворення (стандартні градуювання);
- з індивідуальним градуюванням (нестандартні градуювання).

Для термопар, що входять до першої групи, визначена стандартна залежність термо-ЕРС від температури, яка регламентується стандартом ДСТУ EN 60584-1:2016 [9]. Вона представлена як номінальні статичні характеристики перетворення

(НСХ) значення термо-ЕРС, що розвивається термопарою, в відповідне значення температури. НСХ визначається експериментально за результатами вимірів в лабораторії, отриманим для великої кількості термопар. Вимірювання здійснюються при температурі вільних кінців термопари, рівної 0 °С. Термопари кожного типу позначаються відповідною буквою латинського алфавіту. Залежно від допустимих відхилень термо-ЕРС, що розвивається термопарою при певних температурах, виділяють класи точності (допуску) термопар.

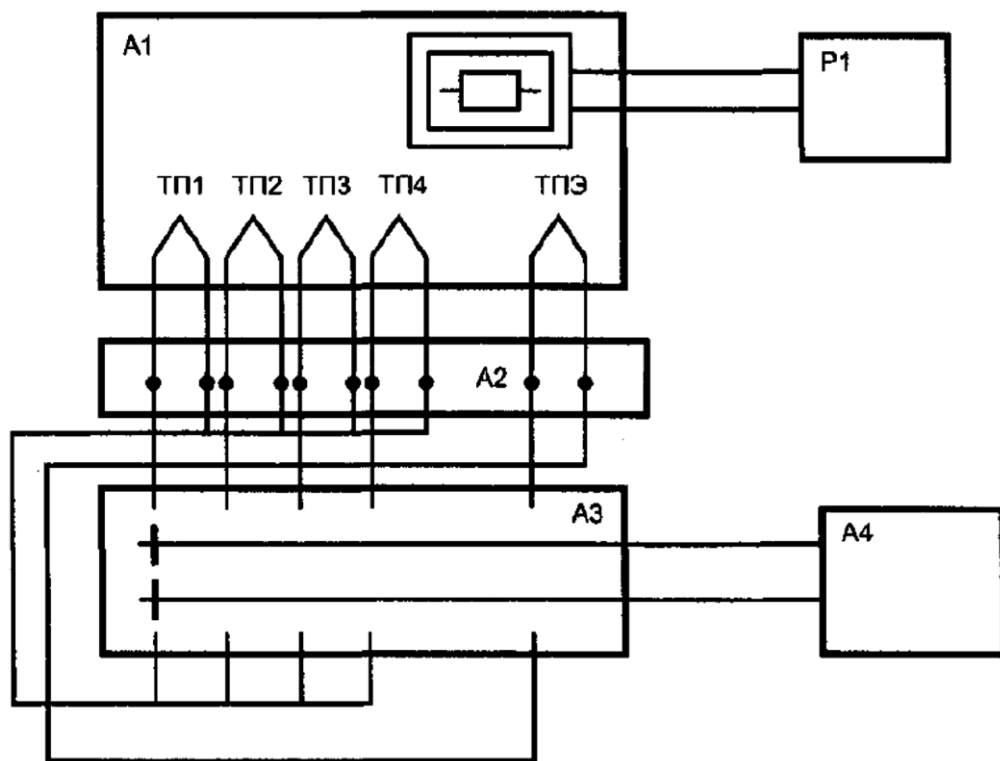
Для термопар з індивідуальним градування не існує залежності термо-ЕРС від температури, яка визначається державними стандартами. Для кожної термопари з даної групи необхідно проводити градування. Методи градування таких термопар збігаються з методами градування стандартних термопар. Прикладами таких термоелектричних перетворювачів є термопари вольфрам-молібден, вольфрам-тантал, карбід титану-графіт і деякі інші.

В силу різних факторів покази конкретної термопари можуть відрізнятися від показів, регламентованих стандартом. У зв'язку з цим необхідно виконувати повірку термопар. Ця операція виконується для нових термопар стандартних типів з метою визначення їх класу точності і із заданою періодичністю для всіх термопар в процесі експлуатації для контролю точності вимірювань. Для термопар стандартних типів повірка здійснюється відповідно до вимог стандарту ДСТУ ГОСТ 8.338:2004 [14].

Виділяють чотири основні методи повірки термопар:

Метод безпосереднього звірення [14]. Відповідно до нього температура в нагрівальному пристрої, в якому знаходяться робочі спаї еталонної і повірюваної термопар, визначається за допомогою еталонної термопари, після чого вимірюється термо-ЕРС, що розвивається повірюваними термопарами. Нагрівання печі має відбуватися до заданої температури з допустимим відхиленням не більше ± 10 °С. Під час вимірювання термо-ЕРС повірюваної термопари температура робочого спаю (в печі) не повинна змінюватися більш, ніж на 0,4 °С/хв. Даний метод застосовується для повірки робочих (технічних) термопар.

Цикл вимірювань здійснюють безперервним відліком показань: в прямій послідовності (від відліку показань чутливого елемента еталонної термопары до відліку показань повірюваної термопары), потім у зворотній послідовності і т. д. до отримання чотирьох відліків показів чутливого елемента еталонної термопары і термо-ЕРС чутливого елемента кожної повірюваної термопары. За показами ртутних скляних термометрів визначають значення температури вільних кінців чутливих елементів повірюваної й еталонної термопары. Електрична схема підключення термопары до повірочної установки при методі безпосереднього звірення показана на рисунку 3.1.



A1 – піч; A2 – термостат для вільних кінців термопары (чутливий елемент); A3 – безтермоточний перемикач; A4 – вимірювальний потенціометр постійного струму; P1 – регулятор напруги; ТП1-ТП4 – повірювані термоперетворювачі; ТПЕ -еталонний термоперетворювач

Рисунок 3.1 – Електрична схема підключення термопары до повірочної установки при методі безпосереднього звірення

З результатів вимірювань обчислюють середньоарифметичні значення температури в термостаті за показами еталонного ртутного скляного термометра і середньоарифметичні значення термо-ЕРС чутливого елемента повірюваної термопари. Середньоарифметичні значення термо-ЕРС чутливого елемента еталонної термопари і чутливих елементів кожної з повірюваних термопар приводять до значень термо-ЕРС чутливих елементів термопар $E_{нов}^{np}$ та $E_{ем}^{np}$ при температурі вільних кінців $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, вносячи поправку $E(t_{с.к})$ на температуру вільних кінців чутливого елемента. За наведеним значенням термо-ЕРС еталонної термопари визначають температуру t , $^{\circ}\text{C}$, робочих кінців чутливого елемента повірюваної термопари за формулою:

$$t = t_{свiд} + \frac{E_{ем}^{np} + E_{ем}^{свiд}}{(\Delta E / \Delta t)_t}, \quad (3.1)$$

де $t_{свiд}$ - значення температури, що відповідає значенню $E_{ем}^{свiд}$, $^{\circ}\text{C}$;

$E_{ем}^{np}$ - приведені значення термо-ЕРС еталонної термопари, мВ;

$E_{ем}^{свiд}$ - значення термо-ЕРС термопари, узяті із свідоцтва на еталонну термопару, найближче до $E_{ем}^{np}$, мВ;

$(\Delta E / \Delta t)_t$ - чутливість еталонної термопари на одиницю температури, мВ/ $^{\circ}\text{C}$.

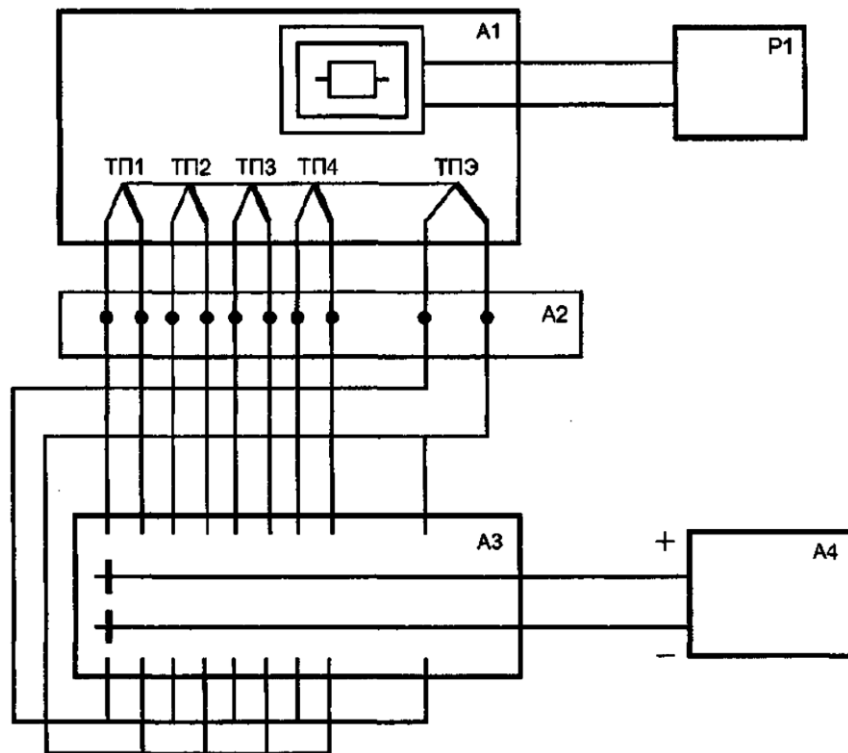
За номінальною статичною характеристикою чутливого елемента повірюваної термопари знаходять нормовані значення термо-ЕРС чутливого елемента термопари $E_{НСХ}$, відповідне показам еталонного ртутного скляного термометра $t_{ем}^{np}$ температурі t , обчисленої за формулою (3.1), за показами еталонної термопари. Для чутливого елемента кожної повірюваної термопари визначають різницю Δ між приведеним $E_{нов}^{np}$ і нормованим $E_{НСХ}$ значеннями термо-ЕРС при кожному значенні температури t , обчисленої за формулою (3.1). Різниця Δ зазначених значень для термопари відповідного типу не повинна перевищувати межі допустимого відхилення від номінальної статичної характеристики.

Різницевий (диференційний) метод [14] дає більш високу точність у порівнянні з методом безпосереднього звірення. В даному методі вимірюється різниця термо-ЕРС між еталонною і поверюваною термопарами. Термо-ЕРС поверюваної термопари отримують розрахунковим шляхом на основі вимірної різниці термо-ЕРС і термо-ЕРС еталонної термопари. Даний метод застосовується в тому числі і для перевірки еталонних термопар.

Метод поелектродного звірення [15] полягає в тому, що при певних температурах, що встановлюються в нагрівачі за показами еталонної термопари, вимірюються термо-ЕРС між однойменними електродами еталонної і поверюваної термопар. На основі отриманих значень термо-ЕРС обчислюють термо-ЕРС поверюваної термопари. Даний метод застосовується в тому числі і для перевірки еталонних термопар.

Вимірюють спочатку E_{em} , потім термо-ЕРС термоелектродів чутливих елементів поверюваних термопар відносно однойменних термоелектродів чутливого елемента еталонної термопари $\Delta e_1, \Delta e_2$. Термо-ЕРС кожної пари термоелектродів вимірюють двічі: спочатку вимірювання ведуть в прямому порядку, переходячи послідовно від чутливого елемента першої поверюваної термопари до останньої, після чого вимірювання повторюють в зворотному порядку, закінчуючи цикл виміром E_{em} . Всі відліки термо-ЕРС чутливих елементів термопари проводять до 10^{-3} мВ. За показами ртутного скляного термометра визначають значення температури вільних кінців термопари чутливого елемента поверюваної та еталонної термопари. Електрична схема підключення термопари до повірочної установки при поелектродному звірнні показана на рисунку 3.2.

Потім розраховують середньоарифметичне значення термо-ЕРС термоелектродів чутливого елемента кожної поверюваної термопари відносно однойменних термоелектродів чутливого елемента еталонної термопари $\bar{\Delta e}_{1j}; \bar{\Delta e}_{2j}$ ($j=1, 2, 3, \dots$ - порядковий номер поверюваної термопари).



А1 – піч; А2 – термостат для вільних кінців чутливого елемента термопари; А3 – безтермоточний перемикач; А4 – вимірювальний потенціометр постійного струму; Р1 – регулятор напруги; ТП1-ТП4 – повірювані термопари; ТПЕ – еталонна термопара
Рисунок 3.2 – Електрична схема підключення термопари до повірочної установки при поелектродному зв'язанні

Визначають відхилення термо-ЕРС чутливого елемента j -ої повірюваної термопари від термо-ЕРС чутливого елемента еталонної термопари за формулою:

$$\bar{\Delta E}_j = \bar{\Delta e}_{1j} - \bar{\Delta e}_{2j}, \quad (3.2)$$

де $\bar{\Delta e}_{1j}$ - термо-ЕРС пари, утвореної позитивними термоелектродами чутливих елементів еталонної та повірюваної термопар при температурі t , мВ;

$\bar{\Delta e}_{2j}$ - термо-ЕРС пари, утвореної негативними термоелектродами чутливих елементів еталонної та повірюваної термопар при температурі t , мВ;

Обчислюють значення термо-ЕРС повірюваних термопар при температурі t за формулою:

$$E_{noj} = E_{em}^{np} + \bar{\Delta}E_j, \quad (3.3)$$

За номінальною статичною характеристикою для чутливих елементів повірюваних термопар типів ТПП10 і ТПР знаходять нормоване значення їх термо-ЕРС, яке відповідає температурі t , обчислений за формулою (3.1). Для чутливого елемента кожної повірюваної термопари визначають різницю Δ між обчисленим значенням E_{nov} і нормованим значенням при кожній заданій температурі.

Метод повірки в реперних точках [15] передбачає перевірку термопар в точках плавлення (затвердіння) чистих металів і застосовується для повірки еталонних термопар вищих розрядів.

В якості реперних точок обрано такі точки:

- точка затвердіння міді (1084,620 °C);
- точка затвердіння алюмінію (660,323 °C);
- точка затвердіння цинку (419,527 °C).

Відповідний метал в твердому стані міститься в спеціальній ампулі. Ампула нагрівається до температури, що на 10 °C перевищує температуру затвердіння металу. Через деякий час після завершення нагрівання, коли розплавлений метал починає твердіти, в ампулу вводять повірювану термопару і здійснюють вимірювання термо-ЕРС. У кожній реперній точці проводять кілька вимірів однієї і тієї ж повірюваною термопарою. Потім розраховують середнє арифметичне значення термо-ЕРС в кожній реперній точці. Якщо значення термо-ЕРС повірюваної термопари не відповідають еталонним, то термопару відбраковують або переводять в клас робочих.

Еталонні значення термо-ЕРС термопар у відповідних реперних точках:

- точка затвердіння міді (10574 ± 30) мкВ;
- точка затвердіння алюмінію (5860 ± 17) мкВ;
- точка затвердіння цинку (3447 ± 14) мкВ.

Методи, що застосовуються для повірки еталонних термопар, мають більш високу точність в порівнянні з методами, застосовуваними для повірки робочих термопар. Як правило, методи безпосереднього звірення і диференційний метод використовують при перевірці робочих термопар, а методи поелектродного звірення і в реперних точках – при повірки еталонних термопар.

У разі невиконання вимог повірки термопару відбраковують або переводиться в більш низький клас точності. Міжповірочні інтервали (частота повірки) регламентуються нормативними документами (стандартами, технічними умовами та іншими) для відповідних типів термопар.

3.3 Недоліки методики повірки термопар

В умовах лабораторії повірка термопар включас зовнішній огляд, визначення відповідності статичної характеристики перетворювача щодо стандартної НСХ [14].

Під час проведення повірки дотримуються наступні умови: температура навколишнього повітря (20 ± 5) °С; відносна вологість навколишнього повітря від 30 % до 80 %; атмосферний тиск від 84,0 кПа до 106,7 кПа (від 630 мм рт. ст. до 800 мм рт. ст.); напруга живлення ($220 \pm 4,4$) В; частота живильної мережі ($50 \pm 0,5$) Гц.

Зовнішній огляд виконується для виявлення несправностей захисної арматури, головки, затискачів і чутливого елемента термопар. На підставі зовнішнього огляду встановлюють можливості подальшої експлуатації приладу, визначають характеристики, зазначені на голівці термопар.

При зовнішньому огляді повірюваних термопар типів хромель-копелеві, хромель-константанові, хромель-алюмелеві, залізо-константанові з нерозбірними конструкціями повинна бути встановлена відповідність наступним вимогам:

– захисна арматура не повинна мати пошкоджень поверхні, повинні бути відсутніми порушення кріплення арматури і головки, цілісності головки, має бути дотримана відповідність підключення термоелектродів маркуванню;

– на кожній повірюваній термопарі повинна бути перевірена наявність маркування із зазначенням її номера, типу НСХ, року випуску, робочого діапазону вимірювань і класу допуску.

Далі методика повірки полягає в прямому або по електродному звіренні робочих термопар з еталонною в печі й оцінці відхилення її характеристики від НСХ. Серйозним недоліком методики є те, що при періодичній повірці термопар не враховується можливість виникнення термоелектричної неоднорідності. Якщо глибина занурення термопар в піч відрізняється від робочої глибини занурення, то ділянка найбільшого температурного перепаду, в якій виникла неоднорідність потрапляє при перевірці в зону рівномірної температури і реальна похибка термопар не визначається. Така періодична повірка може привести до помилкових результатів, причому різниця термо-ЕРС в робочих умовах і при перевірці термопар типу хромель-алюмелеві може досягати $5-10^{\circ}\text{C}$. Необхідно переробити стандарт, вказавши на дану проблему, і ввести в стандарт перевірку термоелектричної неоднорідності [20].

Також недоліком є відсутність підсумкової оцінки вимірювальних можливостей і розрахунку невизначеності результатів повірки. При перевірці термопар досліджується тільки нестабільність термопар і контролюється повторюваність результату градування.

Але основною складністю, пов'язаною з проведенням повірки термоелектричних перетворювачів, є необхідність демонтажу термопар, яка може входити в конструкцію іншого приладу або автоматизовану систему.

Відомий спосіб бездемонтажної оцінки достовірності показів термопар в процесі їх експлуатації. Спосіб полягає в періодичному визначенні величини диференціальної термо-ЕРС сили при заданих значеннях температури, порівнянні отриманих даних з первісної величиною диференціальної термо-ЕРС, виміряної до початку експлуатації термопар. При цьому додатково через його електроди пропускають електричний струм в прямому і зворотному напрямку з однаковими силою і тривалістю імпульсу і вимірюють додаткову складову термо-ЕРС при прямому проходженні електричного струму і додаткову складову термо-ЕРС при

зворотному проходженні електричного струму. Про достовірність поазів термопари судять за величиною зміни диференціальної термо-ЕРС dS , яка визначається за залежністю:

$$\delta S = \sqrt{\frac{(\Delta E'_{np} - \Delta E'_{3g})}{(\Delta E_{np} - \Delta E_{3g})}} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

де $\Delta E'_{np}$ – додаткова складова термо-ЕРС при прямому проходженні електричного струму, виміряна до початку експлуатації термопари;

$\Delta E'_{3g}$ – додаткова складова термо-ЕРС при зворотному проходженні електричного струму, виміряна до початку експлуатації термопари.

До недоліків даного способу можна віднести необхідність спеціального апаратного забезпечення, а також те, що він визначає зміну термо-ЕРС в порівнянні з початковою величиною на ділянках термоелектродів в зоні робочого спаю, а не в цілому по їх довжині. Отже, про необхідність проведення чергової повірки або калібрування термопари можна лише припускати. Крім того, цей спосіб вимагає витрат часу на проведення і припинення реєстрації температури на період проведення вимірювань.

Для вирішення даної проблеми, а також для досягнення технічного результату можна використовувати термопару, що містить вузол комутації, захисний чохол, вузол кріплення термопар, виконаний з наскрізним отвором, призначеним для розміщення контрольного або еталонного засобу вимірювання всередині захисного чохла, два чутливих елемента у вигляді термопар з однією і тією ж НСХ. [14].

Додатково можна в якості першого чутливого елемента використовувати кабельну термопару стандартної компоновки в оболонці з жаростійкої сталі або сплаву з мінеральною ізоляцією, наприклад, з окису магнію або окису алюмінію. Під кабельної термопарою стандартної компоновки мається на увазі перетворювач термоелектричний кабельний. А в якості другого чутливого елемента застосувати термопару з термоелектродами, ізольованими один від одного, від основного

чутливого елемента і захисного чохла одно- або багатоканальної керамічної соломкою, або склонитками, або кремнеземної ниткою [20].

Також пропонується перший чутливий елемент виготовити у вигляді кабельної термопари стандартної компоновки з зовнішнім діаметром від 4 мм до 8 мм, а другий чутливий елемент – від 1 до 3 мм.

Таким чином, метрологічна стабільність термоелектричних перетворювачів залежить від типу матеріалів, ізолюючих термоелектроди, від перетину термоелектродів, від концентрації легуючих елементів в термоелектродах, від виду їх попередньої термічної обробки, від кількості елементів механічного захисту термоелектродів і його геометричних параметрів.

3.4 Вимірювальна система для повірки термопар

Для проектування системи повірки термопар будемо використовувати положення стандарту [14] з урахуванням виявлених недоліків, а також продукти компанії National Instruments, яка є лідером виробництва сучасних систем автоматизованого тестування та вимірювань. Вони виготовляють настільні прилади для вимірювання і тестування на базі персональних комп'ютерів, системи розподілених вимірювань і управління CompactRIO, системи висопродуктивного тестування PXI, різні контролери, шасі, модулі, програмне забезпечення для розробки цих систем (LabVIEW, SystemLink).

Отже, структура системи повірки термопар наведена на рисунку 3.3. До її складу входять наступні структурні блоки: регулятор потужності (трансформатор і реле); електрична піч; повірювана термопара; еталонна термопара; модуль для роботи з термопарами cDAQ 9211; 8-ми слотове USB шасі cDAQ 9178; блок живлення NI PS-15; EOM.

Повірювана й еталонна термопари підключаються до відповідних роз'ємів модуля NI 9211, який, в свою чергу, встановлюється в шасі NI 9178. Шасі підключається до EOM через USB інтерфейс. Нагріванням електричної печі управляє регулятор потужності, який може управлятися з EOM.

Регулятор потужності – це трансформатор ТПП255- 127/220-50 з реле NI-9481. Трансформатор має номінальну потужність в 90 Вт, струм первинної обмотки 0,34/0,19 А, масу 1 кг. Реле NI-9481 виконано в корпусі з гвинтовими затичкачами, забезпечує підключення чотирьох каналів, має 10 контактів. Кожен канал має два виходи, Cha і Chb, а також власний світлодіод, який показує стан цього каналу. Призначення виходів реле NI-9481 представлено в таблиці 3.1, а схема підключення – на рисунку 3.4.

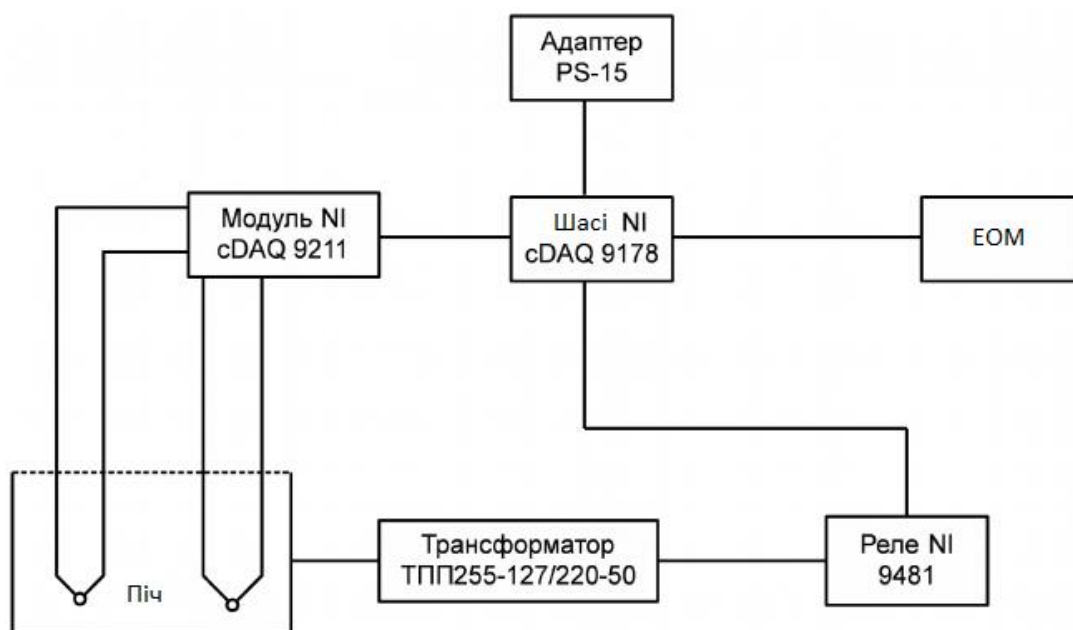
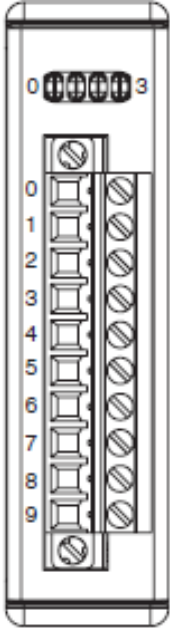


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи повірки термопар

Таблиця 3.1 – Призначення виходів реле NI-9481

	0	Ch0a
	1	Ch0b
	2	Ch1a
	3	Ch1b
	4	Ch2a
	5	Ch2b
	6	Ch3a
	7	Ch3b

	8	Немає з'єднання
	9	Немає з'єднання

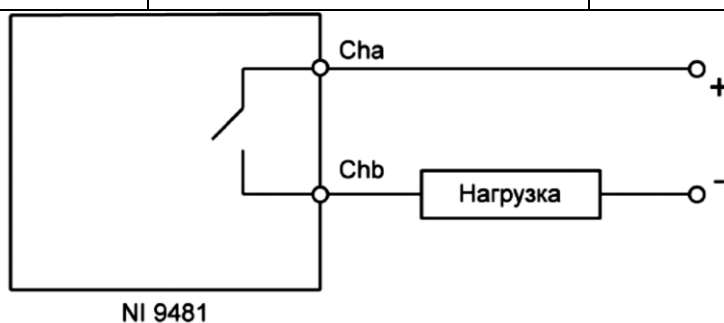


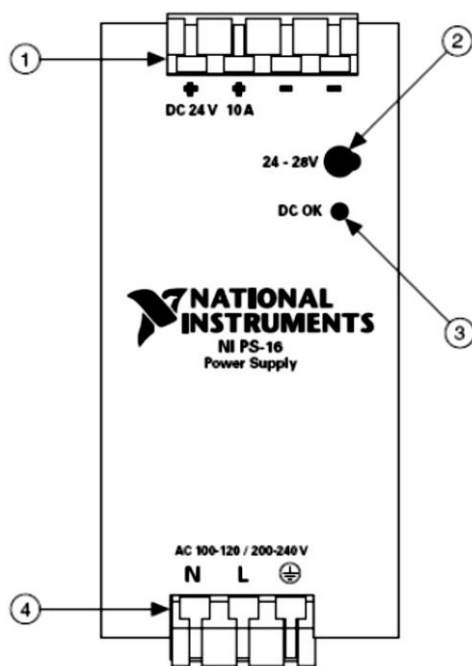
Рисунок 3.4 – Схема підключення реле NI-9481

Піч для перевірки термопар є муфельною. Це нагрівальний пристрій, призначений для нагрівання різноманітних матеріалів до певної температури. Головною особливістю цієї печі є наявність муфеля, що захищає оброблюваний матеріал і є головним робочим простором муфельної печі (муфель оберігає матеріал або виріб від термічного контакту). У корпусі печі стаціонарно встановлений блок з глухими, концентрично розташованими отворами (камерами) для розміщення в них повірюваних і еталонних термопар. Нагрівач печі з метою усунення теплової інерції виконаний у вигляді декількох ідентичних секцій, концентрично розташованих із зовнішнього боку щодо камер.

Шасі NI 9178 являє собою 8-слотове USB-шасі, призначене для роботи з модулями введення/виведення. Шасі дозволяє здійснювати вимірювання широкого набору аналогових і цифрових сигналів введення/виведення і датчиків за допомогою інтерфейсу Hi-Speed USB 2.0. Електричне живлення шасі здійснюється

через джерело живлення PS-15 (рисунок 3.5), вихідна напруга якого $U = 24 \text{ В}$, максимальна потужність $P = 120 \text{ Вт}$. Допускається заміна джерела живлення NI PS-15 на адаптери живлення, які мають характеристики: вихідна напруга від 9 В до 30 В , максимальна потужність 15 Вт .

Модуль NI-9211 має 10-ти контактний знімний роз'єм з гвинтовими затискачами для підключення чотирьох термопар. На нього можна подавати сигнали з термопар. Позитивний вихід термопар під'єднується до затиску TC +, а негативний – до затиску TC-. При використанні екранованого кабелю необхідно приєднати до затиску COM екран кабелю. Затиск COM з'єднаний всередині модуля з його загальною шиною («землею»). На рисунку 3.6 показаний спосіб підключення екранованого кабелю.



1 – вихідні роз'єми, 2 – потенціометр вихідної напруги, 3 – індикатор DC OK, 4 – вхідні роз'єми

Рисунок 3.5 – Передня панель джерела живлення PS-15

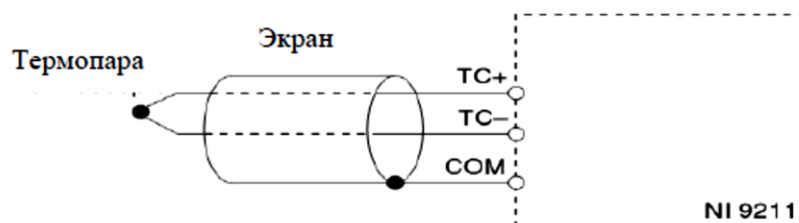


Рисунок 3.6 – Підключення вихідних сигналів з термопари за допомогою екранованого кабелю

Для підключення більш ніж одного провідника до одного гвинтового затиску необхідно попередньо укласти їх в двоконтактний обжиманий з'єднувач. Лінії введення модуля мають загальну шину, ізольовану від загальних шин інших модулів системи. Кожен канал введення має ФНЧ і 24-бітове АЦП. Також кожен канал має схему розпізнавання термопар (OTD), яка має в своєму складі джерело струму, включене між виходами TC + і TC-. Якщо термопара підключена до каналу, джерело струму видає повний робочий діапазон напруги між виходами. На рисунку 3.7 показана схемотехніка каналу. У кожному каналі є резистор, що задає опір між виходами TC + і COM і між виходами TC- і COM. У більшості випадків помилка зміщення і помилка за рівнем залежать від опору джерела, нехтувано малі. Якщо опір термопари з підключеним кабелем перевищує вхідний опір каналу модуля, то величини помилок можуть зрости.

Як видно, за допомогою обладнання National Instruments легко зібрати власну систему для потрібних завдань, в даному випадку для повірки термопар, забезпечивши як регулювання потужності нагріву печі для повірки термопар, так і виведення результатів вимірювання на ЕОМ. У разі необхідності, можна доповнити систему, наприклад, елементом охолодження, керованим з ЕОМ, забезпечити перевірку більше однієї термопари, і т.п.

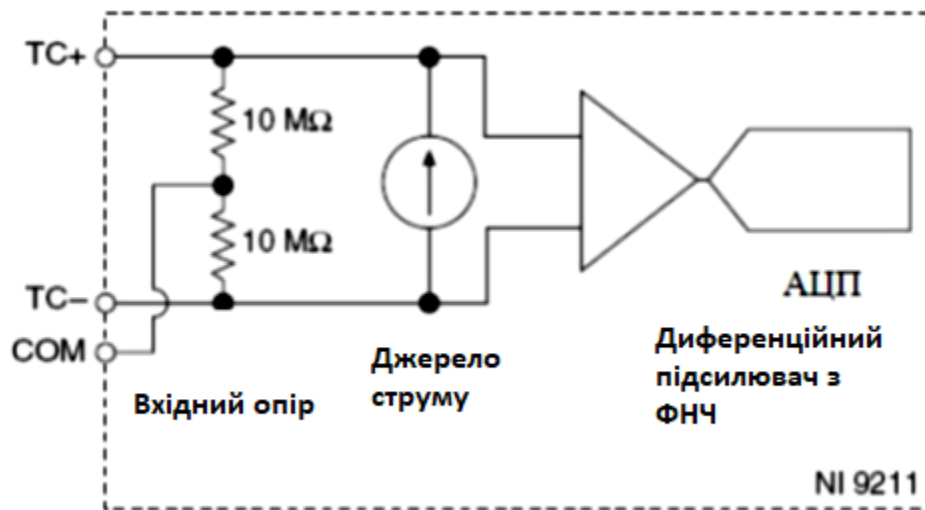


Рисунок 3.7 – Схемотехніка каналу модулю

3.5 Розрахунок похибок повірки термопар

Спочатку необхідно провести вимірювання термо-ЕРС і температури повірюваної термопар. Результати вимірювань записуються в таблицю вручну з інтервалом через кожні 10 °С, починаючи з початкової (кімнатної температури) до температури, яка дорівнює 300 °С. Далі результати вимірів порівнюються з табличними значеннями. Для підтвердження відтворюваності результатів, треба провести 2 досліди, в першому випадку в ручному режимі (плавний нагрів до 300 °С з високою потужністю), у другому випадку – автоматичний режим (швидкий нагрів до 300 °С). Далі потрібно розрахувати похибки. Формула абсолютної похибки:

$$\Delta E_i = |E_{HCHi} - E_i|, \quad (3.4)$$

де E_{HCHi} - табличне значення термо-ЕРС повірюваної термопар, мВ;

E_i - виміряне значення термо-ЕРС повірюваної термопар, мВ.

Формула відносної похибки:

$$\Delta E_i = \frac{|E_{HCXi} - E_i|}{E_{HCXi}} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

Похибки, що виникають в результаті вимірів, пояснюються нерівномірністю нагріву печі, температурними флуктуаціями, впливом зовнішніх чинників, таких як температура навколишнього середовища, вологість повітря і т. п. Проаналізувавши похибки вимірювань, можна зробити висновок, що при вимірах в автоматичному режимі присутня велика нерівномірність нагріву. При вимірах в ручному режимі відносна похибка менше через більш якісний прогрів.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуто нормативно-правові основи виробництва, повірки та експлуатації термопар. Встановлено, що вони відносяться до законодавчо регульованої сфери, на них поширюється відповідний технічний регламент, тому вони підлягають обов'язковій періодичній повірці. Визначено перелік нормативних документів, яким обов'язково мають відповідати термопари, а також вимоги до засобів їх повірки. Розглянуто конструктивні особливості термопар, їх переваги та недоліки. Виявлено основні джерела похибок вимірювань температури за допомогою термопар, серед яких зміна термо-ЕРС в процесі їх роботи, опір ізоляції термоелектродів, неправильний вибір ЗВТ, зміна температури вільних кінців термопари, різні значення термо-ЕРС уздовж довжини термоелектродів, похибки у визначенні градууювальної характеристики еталонних термопар, її відхилення від стандартної градууювальної таблиці.

Досліджено чотири методи та особливості процесу повірки термопар, а також схеми їх підключення до повірочної установки при методі безпосереднього звірення та при поелектродному звірненні. Проаналізовано встановлену державним стандартом методику повірки термопар та виявлено її недоліки: не враховується можливість виникнення термоелектричної неоднорідності, відсутність підсумкової оцінки вимірювальних можливостей і розрахунку невизначеності результатів повірки, необхідність демонтажу термопари. Також визначено фактори, що впливають на метрологічну стабільність термопар: матеріал ізоляції термоелектродів, їх перетин, концентрація в них легуючих елементів, вид їх попередньої термічної обробки, кількість елементів механічного захисту термоелектродів і його геометричних параметрів.

На основі цього розроблено систему для повірки термопар за допомогою продуктів компанії National Instruments, до якої входять регулятор потужності, електрична піч, еталонна термопара, модуль для роботи з термопарами, USB шасі, ЕОМ та блок живлення. Результати роботи можуть бути корисними випробувальним та повірочним лабораторіям та промисловим підприємствам.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. *Офіційний вісник України*. 2014 р. № 54. С. 11. Ст. 1439.
2. Про затвердження Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки : Постанова Кабінету Міністрів України від 24.02.2016 р. № 163. *Офіційний вісник України*. 2016 р. № 21. С. 89.
3. Про затвердження Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки : Постанова Кабінету Міністрів України від 13.01.2016 р. № 94. *Офіційний вісник України*. 2016 р. № 16. С. 69.
4. Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці : Постанова Кабінету Міністрів України від 04.06.2015 р. № 374. *Офіційний вісник України*. 2015 р. № 46. С. 150.
5. Про затвердження міжповірочних інтервалів законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, за категоріями : Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 06.12.2015 р. № 1747. *Офіційний вісник України*. 2016 р. № 92. С. 65.
6. ДСТУ 2857-94. Перетворювачі термоелектричні. Загальні технічні умови (ГОСТ 6616-94, IDT). [Чинний від 1997-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 32 с.
7. ДСТУ 3622-97. Перетворювачі термоелектричні. Основні вимоги щодо вибору та використання (ГОСТ 30543-97, IDT). [Чинний від 1999-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1997. 18 с.
8. ДСТУ ГОСТ 10821:2009. Дріт з платини та платинородієвих сплавів для термоелектричних перетворювачів. Технічні умови (ГОСТ 10821-2007, IDT). [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 14 с.
9. ДСТУ EN 60584-1:2016. Перетворювачі термоелектричні. Частина 1. Технічні характеристики та допустимі відхилення електрорушійної сили (ЕРС) (EN

60584-1:2013, IDT). [Чинний від 2016-11-01]. Вид. офіц. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2016. 96 с.

10. ДСТУ EN 60584-3:2016. Перетворювачі термоелектричні. Частина 3. Подовжувальні та компенсаційні проводи. Допуски та система ідентифікації (EN 60584-3:2008, IDT). [Чинний від 2016-11-01]. Вид. офіц. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2016. 10 с.

11. ДСТУ EN 50212:2018. З'єднувачі для термоелектричних перетворювачів (EN 50212:1996, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2018. 13 с.

12. ДСТУ 3885-99. Кабелі термопарні і термопари в мінеральній ізоляції. Загальні технічні вимоги (IEC 61515:1995, IDT). [Чинний від 1999-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1999. 14 с.

13. ДСТУ EN 62460:2018. Температура. Таблиці електрорушійної сили (EPC) для комбінованих термопар з елементами без домішок (EN 62460:2008, IDT; IEC 62460:2008, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2018. 35 с.

14. ДСТУ ГОСТ 8.338:2004. Метрологія. Перетворювачі термоелектричні. Методика повірки (ГОСТ 8.338-2002, IDT). [Чинний від 2005-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 30 с.

15. ДСТУ 7231:2011. Метрологія. Перетворювачі та компаратори термоелектричні еталонні. Методика повірки (калібрування). [Чинний від 2011-08-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 13 с.

16. Про затвердження Переліку національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності засобів вимірювальної техніки суттєвим вимогам Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 23.04.2019 № 717. URL: <http://www.me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=fbe1ad1b-6d48-407e-a2bd-aae55f31afec&tag=PerelikiNatsionalnikhStandartivPidTekhnichniReglament>

17. Крамарухин Ю. Е. Приборы для измерения температуры. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.

18. Никонов Н. Термопары. Типы. Характеристики, конструкции, производство. М.: ООО «МТК «МЕТОТЕХНИКА», 2015. 62 с.

19. Зимин Г. Ф. Поверка и калибровка термоэлектрических преобразователей: учебное пособие. М.: АСМС, 2001. 49 с.

20. Мартемьянов Д. Б., Пшеничникова В. В., Крутько С. К. Недостатки методики поверки термоэлектрических преобразователей и пути их решения. *Омский научный вестник*. 2015. № 2 (140). С. 179-182.

ДОДАТОК А
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра Метрології та безпеки життєдіяльності

Дипломна робота

бакалавра

Вдосконалення методики повірки термоелектричних перетворювачів

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

О . В. Полярус

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент

І. В. Грайворонська

Керівник, канд. техн. наук, доцент

О. С. Букреєва

Студент гр. ММ-41

К. В. Новицька

Харків – 2020

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет Механічний

Кафедра: Метрології та безпеки життєдіяльності

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Метрології та БЖД

_____ **О. В. Полярус**

« » _____ 2020 р

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Новицькій Катерині Вікторівні

1. Тема роботи: «Вдосконалення методики перевірки термоелектричних перетворювачів»

Керівник роботи Букреева Ольга Сергіївна, к.т.н., доцент, затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» _____ 2020 року № __

2. Строк подання студентом роботи 15 травня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики; діапазон вимірюваної величини від 0 до 80 мВ; вихідна величина – цифровий код; максимально допустима похибка 1 %.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1 Огляд нормативних основ виробництва та експлуатації термоелектричних перетворювачів. 2 Особливості термоелектричних перетворювачів. 3 Розробка устаткування для перевірки термоелектричних перетворювачів. 4 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Титульний лист. 2. Мета і постановка задач дослідження. 3. Конструкція термопар. 4. Класифікація термопар. 5. Стандартне устаткування для перевірки термопар. 6. Структурна схема розробленої системи перевірки термопар. 7. Висновки.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 5 лютого 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд нормативних основ виробництва та експлуатації термоелектричних перетворювачів	26.02.2020	
2	Особливості термоелектричних перетворювачів	19.03.2020	
3	Розробка устаткування для перевірки термоелектричних перетворювачів	16.04.2020	
4	Формування висновків по роботі. Оформлення дипломної роботи	07.05.2020	
5	Підготовка презентації та доповіді	21.05.2020	

Студент

(підпис)

Новицька К. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Букрєєва О. С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: 64 с., 11 рис., 1 додаток, 20 джерел.

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ПОВІРКА, ПОХИБКА
ВИМІРЮВАННЯ, ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ,
ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

Об'єктом роботи є методика перевірки термоелектричних перетворювачів.

Мета роботи – її вдосконалення для підвищення точності та єдності вимірювань.

Термопари широко застосовують для вимірювання температури різних об'єктів, а також в автоматизованих системах управління і контролю. Вимірювання температур за допомогою термопар набуло широкого поширення через надійної конструкції датчика, можливості працювати в широкому діапазоні температур і дешевизни. Широкому застосуванню термопари зобов'язані в першу чергу своїй простоті, зручності монтажу, можливості вимірювання локальної температури.

Встановлено нормативно-правові основи їх виробництва та експлуатації, а також визначено обов'язкові вимоги до них. Розглянуто їх конструктивні особливості, принцип дії та типи. Визначено джерела похибок вимірювання температури термопарами, особливості їх градування та перевірки. Проаналізовано недоліки чинної методики перевірки термоелектричних перетворювачів. Запропоновано систему перевірки термопар за допомогою сучасних засобів автоматизації, тестування та вимірювання.

Результати роботи можуть бути корисними випробувальним та повірочним лабораторіям, підприємствам, які використовують термопари.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Нормативно-правові основи виробництва та експлуатації термоелектричних перетворювачів.....	6
1.1 Аналіз вимог законодавства.....	6
1.2 Огляд чинних нормативних документів.....	7
1.3 Вимоги до засобів повірки термоелектричних перетворювачів.....	8
2 Особливості термоелектричних перетворювачів	12
2.1 Конструкція та принцип роботи термопар	12
2.2 Види термопар.....	19
3 Розробка устаткування для повірки термоелектричних перетворювачів...	30
3.1 Основні джерела похибок вимірювань за допомогою термопар.....	30
3.2 Градування та повірка термопар.....	31
3.3 Недоліки методики повірки термопар.....	38
3.4 Вимірювальна система для повірки термопар.....	41
3.5 Розрахунок похибок повірки термопар.....	45
Висновки.....	47
Перелік посилань.....	48
Додаток А Ілюстративний матеріал до дипломної роботи.....	51

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(ХНАДУ)

Механічний фікультет
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

до дипломної роботи бакалавра

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПОВІРКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

О . В. Полярус

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент

І. В. Грайворонська

Керівник, канд. техн. наук, доцент

О. С. Букреєва

Студент гр. ММ-41

К. В. Новицька

Харків – 2020

Мета, об'єкт, задачі дослідження

- **Об'єкт** — методика перевірки термоелектричних перетворювачів
- **Мета** — її вдосконалення для підвищення точності та єдності вимірювань
- **Задачі**
 - огляд термоелектричних перетворювачів, їх класифікації та експлуатаційних особливостей;
 - огляд нормативно-правових основ регулювання виробництва й експлуатації термоелектричних перетворювачів та чинних нормативних документів;
 - вдосконалення методики перевірки термоелектричних перетворювачів.

Нормативно-правові основи



Вимоги до засобів повірки термопар

ЗВТ

- еталонні ртутні скляні термометри
- еталонні платинородій-платинові термопары
- еталонні платинородій-платинородієві термопары
- повірочна установка
- сучасні мікропроцесорні засоби вимірювань термо-ЕРС

Допо-
міжні
засоби

- водний, паровий, масляний термостат
- збільшувальне скло
- печі
- нікелевий товстостінний стакан
- засіб вимірювань та випробувань електричного опору ізоляції
- амперметр
- регулятор напруги
- ртутні скляні термометри
- подовжувальні дроти
- теплоізоляційні посудини
- пробірки

Конструкція термопар

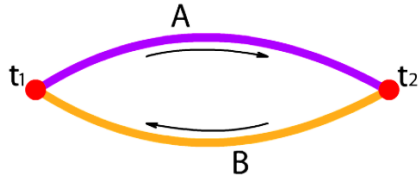


Рисунок 1

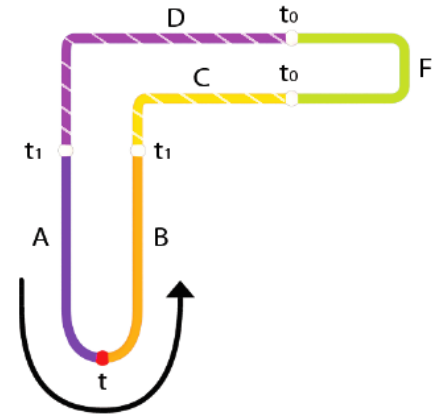


Рисунок 3

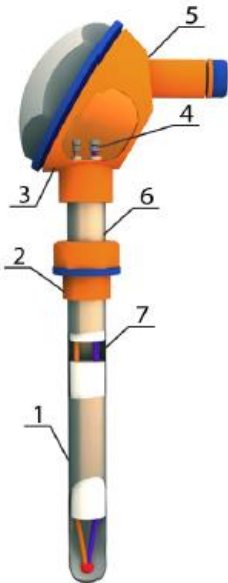


Рисунок 2

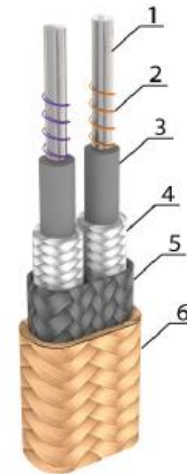
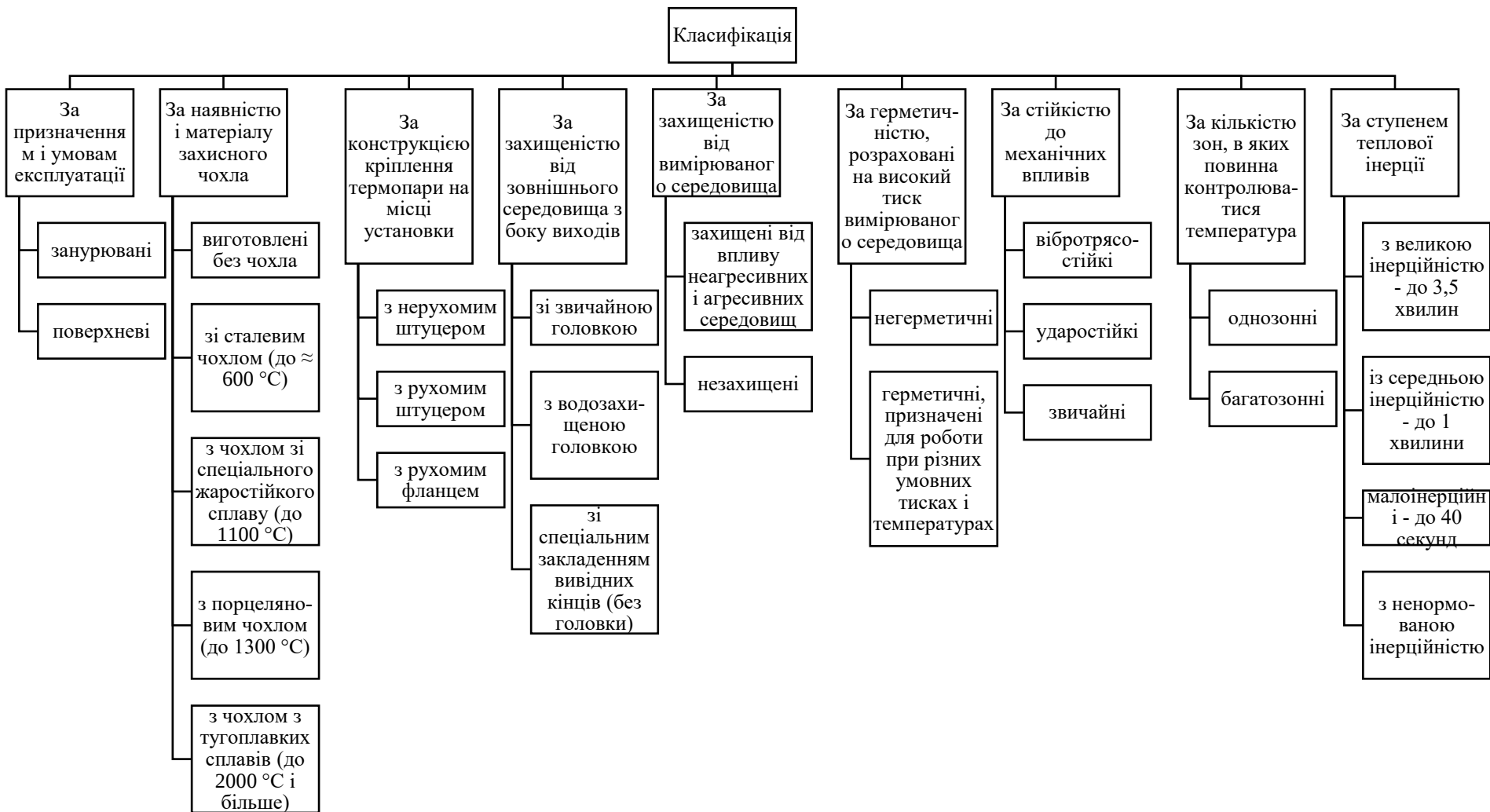


Рисунок 4

Класифікація термопар



Класифікація термопар

Тип термопар	Матеріал термоелектродів		Діапазон робочих температур, °C
	позитивний	негативний	
ТПП (S)	Платинородій (10% Rh)	Платина	0 – 1300 (1600)
ТПП (R)	Платинородій (13% Rh)	Платина	0 – 1300 (1600)
ТПР (B)	Платинородій (30% Rh)	Платинородій (6% Rh)	600 – 1700
ТХК (L)	Хромель	Копель	-200 – 700 (900)
ТХА (K)	Хромель	Алюмель	-200 – 1200 (1300)
ТЖК (J)	Залізо	Константан	-200 – 750 (900)
ТВР (A)	Вольфрам-реній (5% Re)	Вольфрам-реній (20% Re)	0 – 2200 (2500)

Основні джерела похибок вимірювань температури за допомогою термопар

зміна термо-ЕРС в процесі роботи термопар

опір ізоляції термоелектродів

неправильний вибір вимірювального приладу

зміна температури вільних кінців термопар

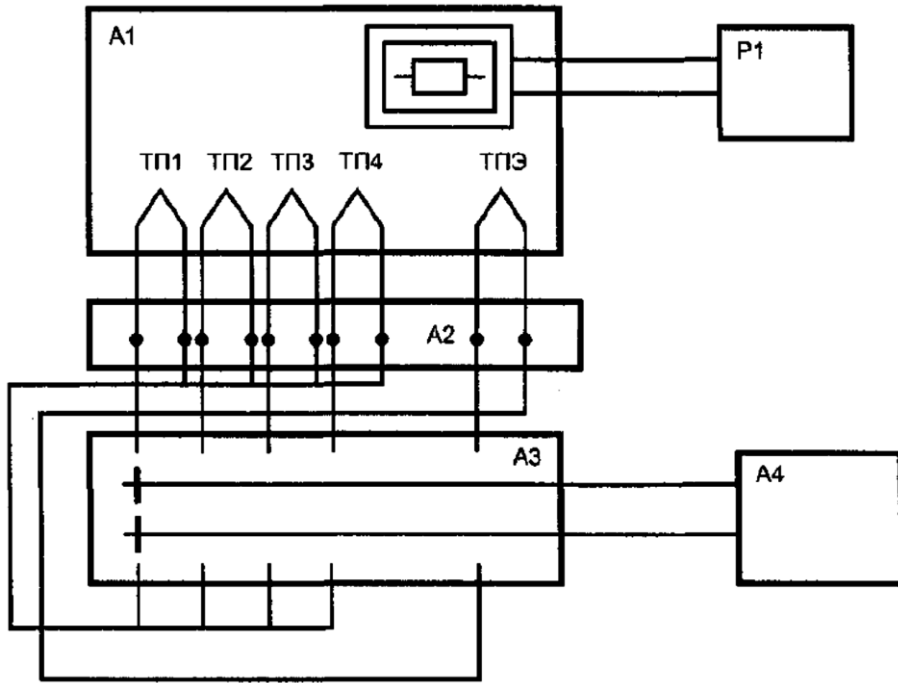
різні значення термо-ЕРС уздовж довжини термоелектродів

похибки у визначенні градуєвальної характеристики еталонних термопар

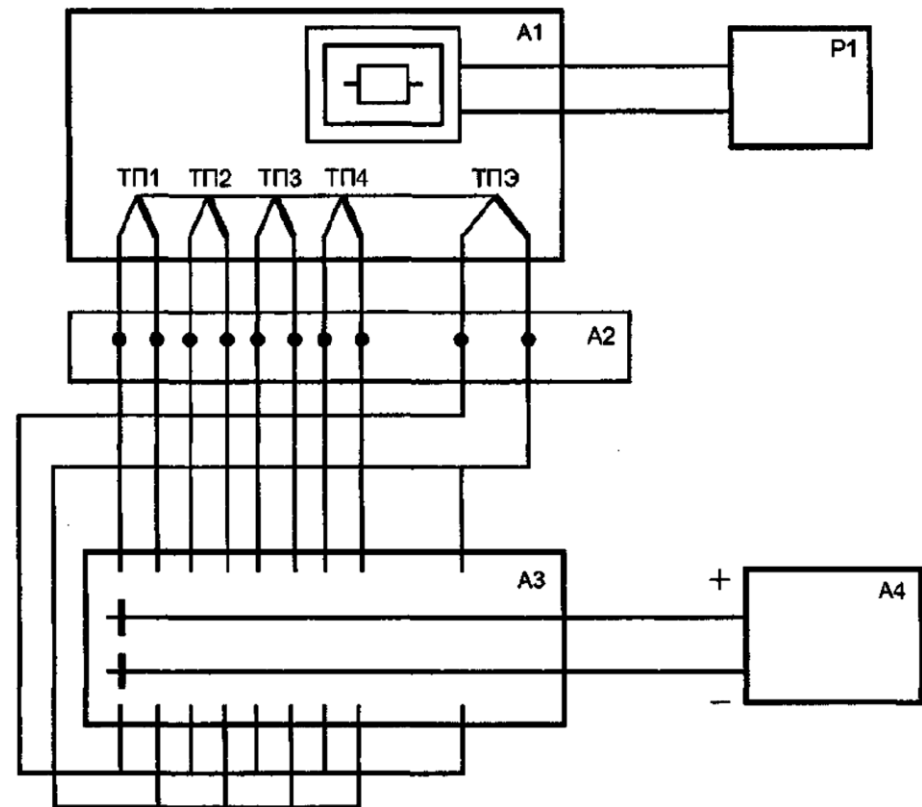
відхилення градуєвальної характеристики термопар від стандартної градуєвальної таблиці

Повірка термопар

Метод безпосереднього з'єднання



Метод поелектродного з'єднання



Недоліки методики повірки термопар

не враховується можливість виникнення термоелектричної неоднорідності

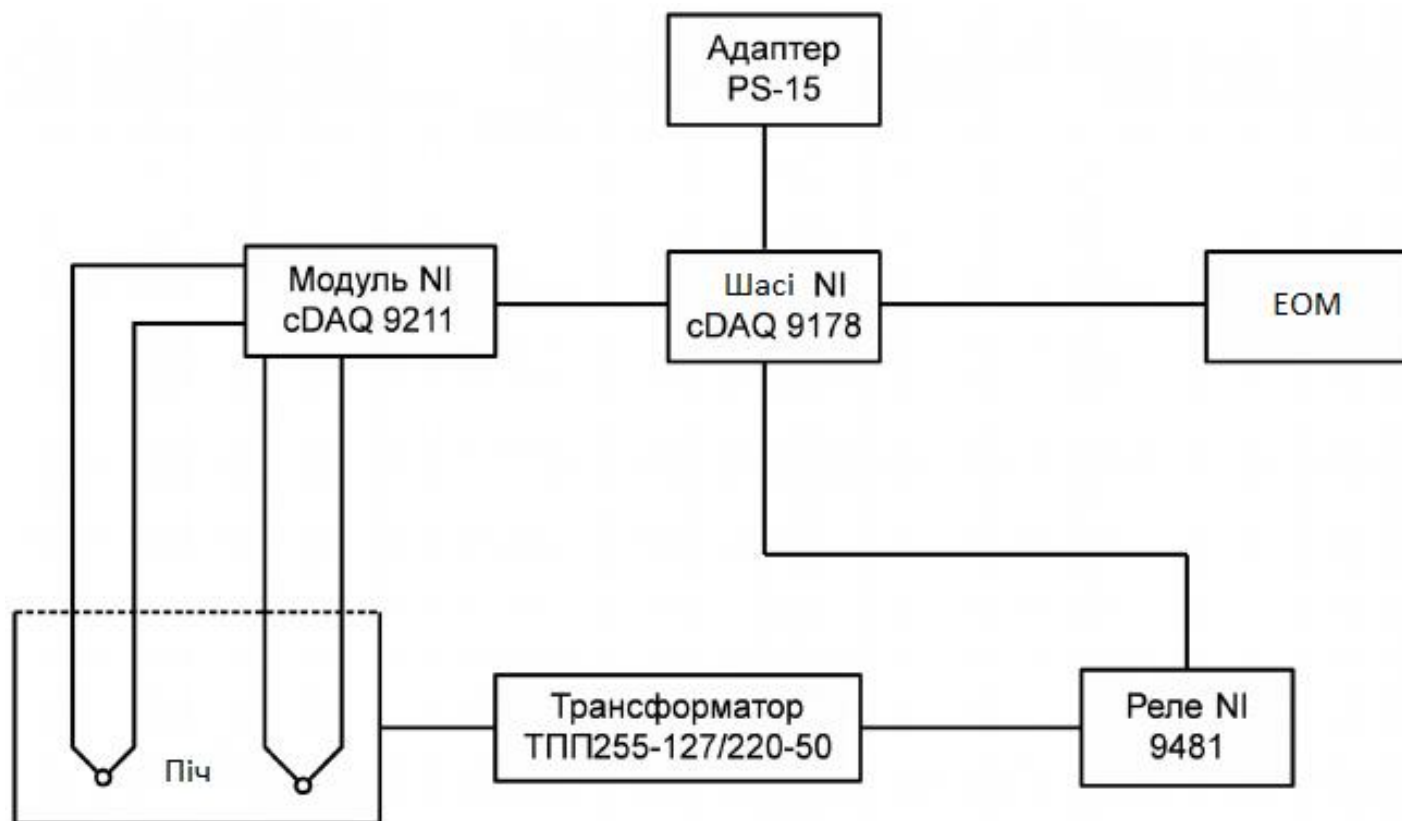
відсутність підсумкової оцінки вимірювальних можливостей і розрахунку невизначеності результатів повірки

необхідність демонтажу термопар

Фактори, що впливають на метрологічну стабільність термопар



Система повірки термопар



$$\Delta E_i = |E_{HCXi} - E_i|$$

$$\Delta E_i = \frac{|E_{HCXi} - E_i|}{E_{HCXi}} \cdot 100\%$$

Структурні елементи системи повірки термопар

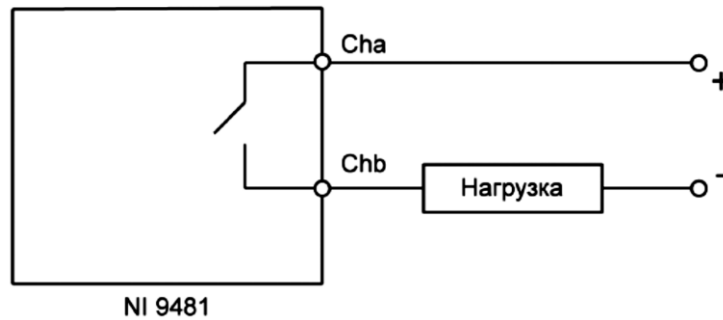
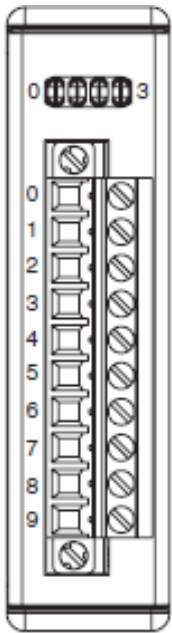


Рисунок 5

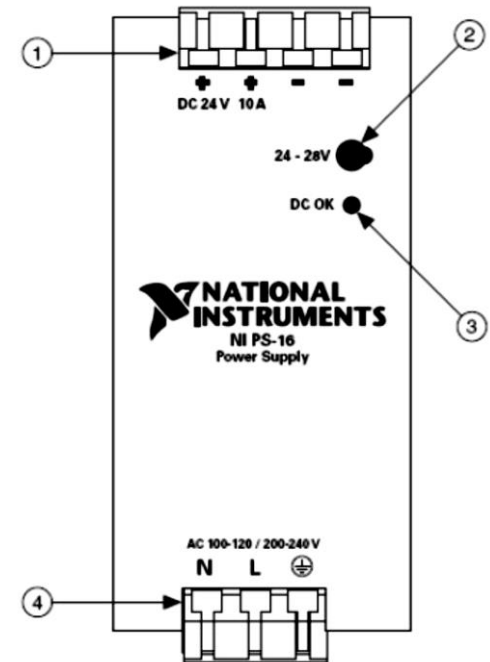
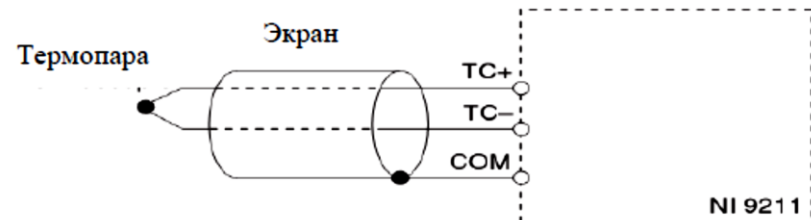


Рисунок 6



Висновки

- У дипломній роботі розглянуто нормативно-правові основи виробництва, повірки та експлуатації термопар. Встановлено, що вони відносяться до законодавчо регульованої сфери, на них поширюється відповідний технічний регламент, тому вони підлягають обов'язковій періодичній повірці. Визначено перелік нормативних документів, яким обов'язково мають відповідати термопари, а також вимоги до засобів їх повірки.
- Розглянуто конструктивні особливості термопар, їх переваги та недоліки. Виявлено основні джерела похибок вимірювань температури за допомогою термопар, серед яких зміна термо-ЕРС в процесі їх роботи, опір ізоляції термоелектродів, неправильний вибір ЗВТ, зміна температури вільних кінців термопари, різні значення термо-ЕРС уздовж довжини термоелектродів, похибки у визначенні градувальної характеристики еталонних термопар, її відхилення від стандартної градувальної таблиці.
- Досліджено чотири методи та особливості процесу повірки термопар, а також схеми їх підключення до повірочної установки при методі безпосереднього звірення та при поелектродному звірненні. Проаналізовано встановлену державним стандартом методику повірки термопар та виявлено її недоліки: не враховується можливість виникнення термоелектричної неоднорідності, відсутність підсумкової оцінки вимірювальних можливостей і розрахунку невизначеності результатів повірки, необхідність демонтажу термопари. Також визначено фактори, що впливають на метрологічну стабільність термопар: матеріал ізоляції термоелектродів, їх перетин, концентрація в них легуючих елементів, вид їх попередньої термічної обробки, кількість елементів механічного захисту термоелектродів і його геометричних параметрів.
- На основі цього розроблено систему для повірки термопар за допомогою продуктів компанії National Instruments, до якої входять регулятор потужності, електрична піч, еталонна термопара, модуль для роботи з термопарами, USB шасі, ЕОМ та блок живлення. Результати роботи можуть бути корисними випробувальним та повірочним лабораторіям та промисловим підприємствам.