

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

_____ Олександр БОВНА
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження електронної системи термоелектричного контролю дефектів у металах»

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛТм-21
(шифр групи)

спеціальності 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

Примас Валерій Вікторович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник професор кафедри ЕТ, д.т.н., проф. _____ Анатолій ЗОПІ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент зав. кафедри ЕЛІН, к.т.н., доц. _____ Олександр КОЛЛАРОВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент в.о. зав. кафедри АТ, к.т.н., доц. _____ Валерій ПОЦЕПАСВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Нормоконтроль

зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

_____ Олександр БОВНА
(підпис)

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ДЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота
_____магістра_____

Тема: «Розробка та дослідження електронної системи термоелектричного контролю дефектів у металах»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕЛТм – 21

Керівник

Консультанти:

Валерій ПРИМАС

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Анатолій ЗОРІ

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Анатолій ЗОРІ

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації

Кафедра Електронна техніка

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)

Спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр ВОВНА

« 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Примас Валерій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка та дослідження електронної системи термоелектричного контролю дефектів у металах

керівник проекту (роботи) Зорі Анатолій Анатолійович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 28.09.2022 року № 446

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз технічних характеристик об'єкту; аналіз та узагальнення відомих результатів у предметній області досліджень; математична модель вимірювального блоку електронної системи; обґрунтування та розробка структури електронної системи; розробка структурної та принципової схем електронної системи

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Зорі А.А.		
2	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Зорі А.А.		
3	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
4	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз параметрів і характеристик термоелектричного методу визначення дефектів у сплавах металів		
2	Удосконалення методу вимірювання величини термо-е.р.с.		
3	Розробка математичної моделі вимірювального термоелектричного перетворювача		
4	Розробка структурної схеми системи контролю дефектів у сплавах металів		
5	Додаток А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві		

Студент

_____ (підпис)

Валерій ПРИМАС

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Анатолій ЗОРІ

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада П.І.Б.	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Примас, В.В. Розробка та дослідження електронної системи термоелектричного контролю дефектів у металах / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 171 Електроніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022.

Пояснювальна записка: 82 стор., 31 рис., 20 посилань.

Виконано аналіз параметрів і характеристик термоелектричного методу визначення дефектів у сплавах металів; удосконалено метод вимірювання величини термо-е.р.с.; розроблено математичну модель вимірювального термоелектричного перетворювача; розроблено структурну схему системи контролю дефектів у сплавах металів.

Розроблено та досліджено математичну модель еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного включення декількох джерел, це має місце, якщо утворюється контакт в багатьох точках між електродом та об'єктом дослідження.

Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик різних типів джерел термо-е.р.с., а також еквівалентного джерела під час паралельного підключення декількох різних типів джерел.

Одержано аналітичні залежності між змінами термо-е.р.с. та опором навантаження, які можна застосувати під час термоелектричного контролю дефектів у сплавах металів, якщо має місце шорсткість та неоднорідність поверхні об'єкта досліджень і вимірювальних електродів.

Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик різних типів джерел термо-е.р.с., а також еквівалентного джерела під час паралельного підключення декількох різних типів джерел.

Ключові слова: контроль, дефект, метал, термоперетворювач, електрод, математична модель, контакт, структурна схема, точність, достовірність.

ABSTRACT

Prymas, V.V. Development and research of the electronic system thermoelectric control of defects in metals / Graduation qualification work for obtaining an educational degree 'Master' in specialty 171 Electronics. – SHEI 'DonNTU', Lutsk, 2022.

Explanatory note: 82 p., 31 fig., 20 reference.

An analysis of the parameters and characteristics of the thermoelectric method for determining defects in metal alloys was performed; the method of measuring the value of thermo-electric power has been improved; a mathematical model of the measuring thermoelectric converter was developed; a structural diagram of the defect control system in metal alloys was developed.

A mathematical model of an equivalent source of thermo-electrical current has been developed and investigated. during the parallel inclusion of several sources, this occurs if contact is formed at many points between the electrode and the research object.

Studies of electrical parameters and characteristics of various types of thermal E.S. sources, as well as an equivalent source during the parallel connection of several different types of sources, have been carried out.

Analytical dependences between changes in thermo-e.r.s. and load resistance, which can be applied during thermoelectric control of defects in metal alloys, if there is roughness and inhomogeneity of the surface of the object of research and measuring electrodes.

Studies of electrical parameters and characteristics of various types of thermal E.S. sources, as well as an equivalent source during the parallel connection of several different types of sources, have been carried out.

Key words: control, defect, metal, thermoconverter, electrode, mathematical model, contact, structural diagram, accuracy, certainty.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ У СПЛАВАХ МЕТАЛІВ.....	12
1.1 Аналіз методів вимірювального контролю параметрів і характеристик сплавів металів.....	12
1.1.1 Рентгенографічний метод неруйнівного контролю.....	13
1.1.2 Ультразвуковий метод неруйнівного контролю.....	15
1.1.3 Магнітопружний метод контролю.....	17
1.1.4 Тепловий метод вимірювального контролю.....	18
1.2 Термоелектричний методу вимірювального контролю дефектів у сплавах металів.....	20
1.3 Схемотехнічні реалізації для вимірювання величина термо-е.р.с.....	23
1.4 Аналіз метрологічних вимог забезпечення термоелектричних вимірювань.....	26
1.5 Аналіз методів вимірювання величини термо-е.р.с.....	31
1.6 Висновки.....	33
2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИНИ ТЕРМО-Е.Р.С.....	35
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	44
3.1 Розробка методики розрахунку еквівалентного джерела.....	44
3.2 Розробка моделі вимірювального термоелектричного перетворювача.....	47
3.3 Розробка інтерфейсу програмного забезпечення математичної моделі перетворювача.....	49

3.4 Результати досліджень еквівалентного джерела під час застосування багатоточкового контакту.....	54
3.5 Висновки.....	59
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ У СПЛАВАХ МЕТАЛІВ.....	60
4.1 Розробка структури системи контролю дефектів.....	60
4.2 Розробка системи керування характеристиками та параметрами теплової камери.....	63
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	76

ВСТУП

Актуальність теми. Якщо у сплавах металів має місце дефекти, то це є однією з базових причин зменшення корозійної стійкості, а також істотному зменшенню часу експлуатації конструкцій, які зроблено зі зазначених сплавів металів. Під час періодичного вимірювання для виявлення утворення дефектів використовуються заходи, виконання яких дозволяє зменшити ймовірність виникнення техногенних катастроф і нещасних випадків на виробництві. Застосування зазначених заходів дозволяє зберегти життя та здоров'я персоналу промислових підприємств.

Один із найскладніших процесів неруйнівного контролю параметрів і характеристик виробів зі сплавів металів виконується для свердловин. Дуже складно здійснювати його при безперервній роботі промислового обладнання. Не всі методи неруйнівного контролю можна застосовувати для виконання перевірки промислового обладнання, яке безперервно працює. Одним з найбільш інноваційним методом вимірювального контролю є термоелектричний. Використання зазначеного методу дозволяє виконувати неруйнівний контроль у режимі реального часу для сплавів з металів при безперервній експлуатації промислового обладнання.

Тому, необхідно розробити електронну систему термоелектричного контролю дефектів у металах і сплавах для виконання експериментальних досліджень електричних характеристик і параметрів величини еквівалентної термо-е.р.с. Значення цієї е.р.с має місце при забезпеченні контакту в точках електрода зі зразком дослідження, що має місце при спробі здійснення неруйнівного контролю характеристик і параметрів легованих сталей.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення достовірності ідентифікації дефектів у сплавах металів зі застосуванням термоелектричного методу вимірювального контролю.

Для досягнення зазначеної мети в дослідженні сформульовано такі

задачі:

- виконати аналіз параметрів і характеристик термоелектричного методу визначення дефектів у сплавах металів;
- удосконалити методу вимірювання величини термо-е.р.с.;
- розробити математичну модель вимірювального термоелектричного перетворювача;
- розробити структурну схему системи контролю дефектів у сплавах металів.

Об'єкт дослідження: процеси, що протікають у вимірювальних канал термоелектричного перетворювача для виявлення дефектів у сплавах металів.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення точності ідентифікації дефектів у сплавах металів.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії випадкових процесів, теорії математичної статистики та ймовірності, теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорії планування експерименту, імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено та досліджено математичну модель еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного включення декількох джерел, це має місце, якщо утворюється контакт в багатьох точках між електродом та об'єктом дослідження.

2. Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик різних типів джерел термо-е.р.с., а також еквівалентного джерела під час паралельного підключення декількох різних типів джерел.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Одержано аналітичні залежності між змінами термо-е.р.с. та опором навантаження, які можна застосувати під час термоелектричного контролю дефектів у сплавах металів, якщо має місце шорсткість та неоднорідність поверхні об'єкта досліджень і вимірювальних електродів.

2. Застосування удосконаленого методу термоелектричного вимірювального контролю якості поверхні сплаву металів дозволить покращити метрологічні характеристики процедури ідентифікації дефектів у сплавах металів.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати випускної кваліфікаційної роботи магістра одержані автором самостійно. Автором особисто: виконано аналіз параметрів і характеристик термоелектричного методу визначення дефектів у сплавах металів; удосконалено метод вимірювання величини термо-е.р.с.; розроблено математичну модель вимірювального термоелектричного перетворювача; розроблено структурну схему системи контролю дефектів у сплавах металів.

Апробація результатів роботи. Основні розділи роботи пройшли апробацію на наукових семінарах кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (м. Покровськ, 2021 – 2022 рр.).

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Структура випускної кваліфікаційної роботи магістра визначена загальною схемою наукового дослідження, метою досліджень та шляхами її досягнення. Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи містить 82 сторінки машинописного тексту, зокрема 75 сторінок основного тексту, 31 рисунка та список використаних джерел із 20 найменувань.

1 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ У СПЛАВАХ МЕТАЛІВ

У теперішній час методи і засоби для здійснення неруйнівного випробування застосовуються під час виготовлення виробів, а також при їх експлуатації, для гарантування надійності та цілісності виготовленої продукції, вимірювальному контролю процесів промислового виробництва, зменшення витрат та забезпечення постійної високої якості продукції. Неруйнівний вимірювальний контроль застосовується для забезпечення високої якості сплавів металів, а також їх з'єднань під час виготовлення. Неруйнівний вимірювальний контроль під час експлуатації застосовується для визначення цілісності, а також безпечності промислової продукції.

1.1 Аналіз методів вимірювального контролю параметрів і характеристик сплавів металів

Випробування металу є процедурою чи процесом, що застосовується для здійснення перевірки складу аналізованої речовини. Мають місце як деструктивні, так неруйнівні процеси. Випробування металів і сплавів включають визначення базових властивостей сплавів металів, які отримано вперше.

У теперішній час існує достатньо велика кількість баз даних про хімічні властивості металів і сплавів, тому можна без особливих труднощів здійснювати ідентифікацію металів, які не мають маркування. Зазначений процес може бути достатньо легким і швидким. Під час цього зразок, що досліджувався, може бути придатним для подальшого застосування.

Зазначений вид аналізу є неруйнівним. Проте, під час роботи зі сплавами

металів виявлення точного складу призводить до того, що досліджуваний зразок буде розділено на початкові матеріали, а потім виконано вимірювання та розрахунок. Після визначення початкових речовин, їх порівнюють з відомими су теперішній час сплавами металів. Якщо зразок, що досліджується, буде зруйнованим під час здійснення вимірювального контролю, то зазначений метод є руйнівним.

Зазвичай застосовують такі методи дослідження: термоелектричний, електромагнітний, ультразвуковий та рентгенографічний. Виконаємо аналіз характеристик і параметрів відомих методів дослідження металів і сплавів, а також наведемо їх недоліки та переваги.

1.1.1 Рентгенографічний метод неруйнівного контролю

Для неруйнівного вимірювального контролю застосовується рентгенографічний метод, під час застосування якого застосовуються гамма- та рентгенівські промені для визначення внутрішньої структури об'єкта досліджень [1]. У хімічній та нафтовій промисловості метод рентгенографії зазвичай застосовується під час перевірки апаратів, які мають в своєму складі судини, що знаходяться під тиском, а також клапанів. За допомогою цього методу здійснюється ідентифікація дефектів, а також метод використовується для перевірки якості шва, який має місце під час зварювальних робіт. Якщо порівняти цей метод з іншими, то рентгенографія має декілька переваг. Рентгенографія має доволі високу достовірність вимірювальних результатів, може застосовуватися під час досліджень різних матеріалів, а вимірювальна інформація може бути збережена для здійснення подальшого її аналізу. Рентгенографія є достатньо ефективним методом, для реалізації якого необхідно здійснення невеликих заходів для підготовки поверхні. Також, переважна більшість систем рентгенографії є переносними, що дозволяє застосувати їх в польових умовах.

Розроблено та застосовуються різні типи рентгенівських методів, до складу яких входить звичайна рентгенографія, а також цифрова рентгенографія. У кожного з зазначених методів є незначні відмінності, а також визначені недоліки та переваги. У звичайній рентгенографії (див. рис. 1.1) застосовується чутлива плівка, що реагує на рентгенівське випромінювання, яке проходить через деталь, що досліджується. Потім отримане зображення аналізують на наявність дефектів і пошкоджень.

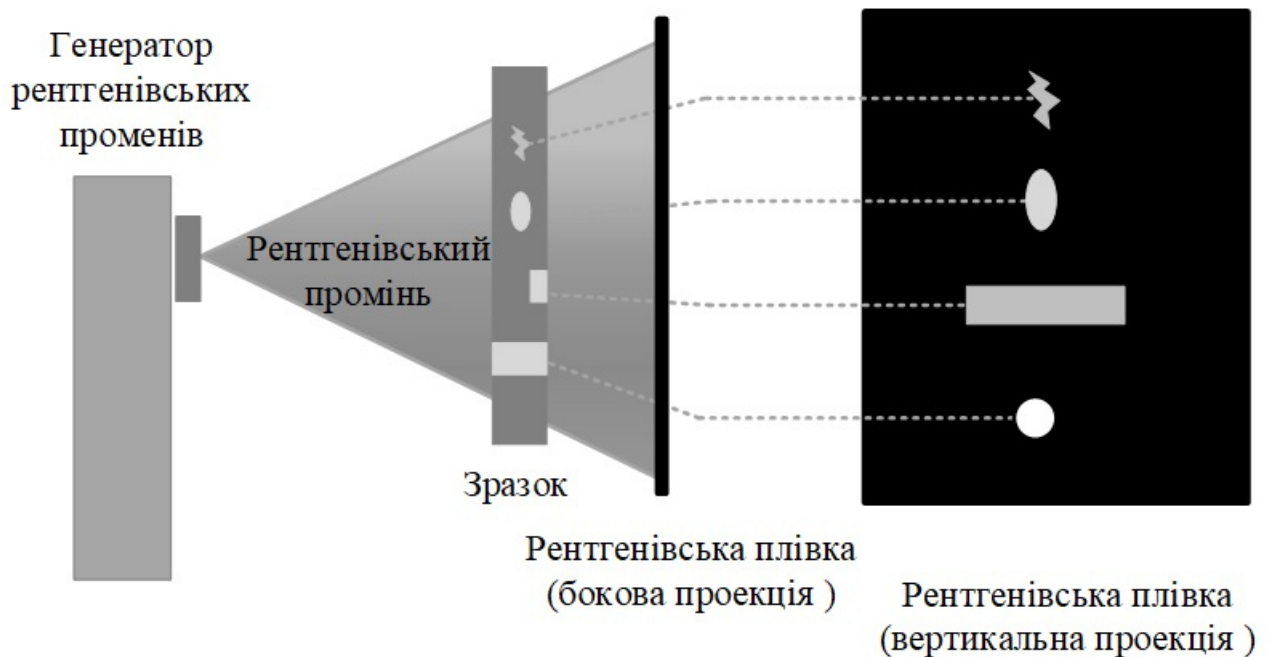


Рисунок 1.1 – Рентгенографічна система для здійснення неруйнівного вимірювального контролю сплавів металів

Істотним обмеженням для рентгенографічного методу є те, що плівку можна застосувати тільки один раз. Аналізувати та обробляти інформації на цій плівці можна достатньо великий проміжок часу. Цифрова рентгенографія на відміну від звичайної не вимагає застосування цих плівок. За допомогою цифрового рентгенографічного детектора зображення можна отримати практично миттєво на екрані персонального комп'ютера. Це дає змогу істотно зменшити час експозиції для того, щоб зображення могли аналізувати швидше. Також у цифрових рентгенографічних зображеннях має місце набагато більша

якість, якщо здійснювати порівняння зі зображеннями, що отримано під час застосування звичайної рентгенографії. Завдяки можливості одержання високоякісних зображень, рентгенографічні методи можна застосовувати для ідентифікації дефектів у сплавах металів, сторонніх предметів у об'єктах досліджень, визначення якості ремонту швів, що мають місце під час зварювання, а також ідентифікації корозії під ізоляційним покриттям. У хімічній та нафтогазовій промисловості зазвичай використовуються наступні методи цифрової радіографії: пряма рентгенографія, комп'ютерна рентгенографія, комп'ютерна томографія та рентгенографія, що здійснюється в режимі реального часу [2].

1.1.2 Ультразвуковий метод неруйнівного контролю

Під час застосування ультразвукового неруйнівного вимірювального контролю для ідентифікації дефектів у металах і сплавах застосовуються короткі ультразвукові хвилі [3]. Принцип роботи цього типу контролю базується на вимірюванні параметрів пружної хвилі в металах і сплавах, що контролюються (див. рис. 1.2). Під час вимірювання змін характеристик і параметрів цих хвиль визначають властивості металу та сплавів, що дає змогу ідентифікувати дефекти в них.

Переважна більшість систем ультразвукового вимірювального контролю має в своєму складі достатньо велику кількість блоків і вузлів. До складу системи входять приймачі та випромінювачі, монітори та перетворювачі. Тип ультразвукового контролю обирається в залежності від об'єктів контролю, які досліджуються.

У теперішній час розроблено та застосовується достатньо велика кількість реалізацій ультразвукового вимірювального контролю.

Методика ультразвукового зворотного розсіювання випромінювання [4].

Під час ультразвукового вимірювального контроль зі застосуванням

фазованих ґрат використовується набір зондів, до складу яких входить від 16 до 250 доволі невеликих елементів. Кожен зі зазначених елементів пристрої здатен індивідуально пульсувати, що дозволяє спрямовувати промінь під різними кутами, а також різними фокусними відстанями.

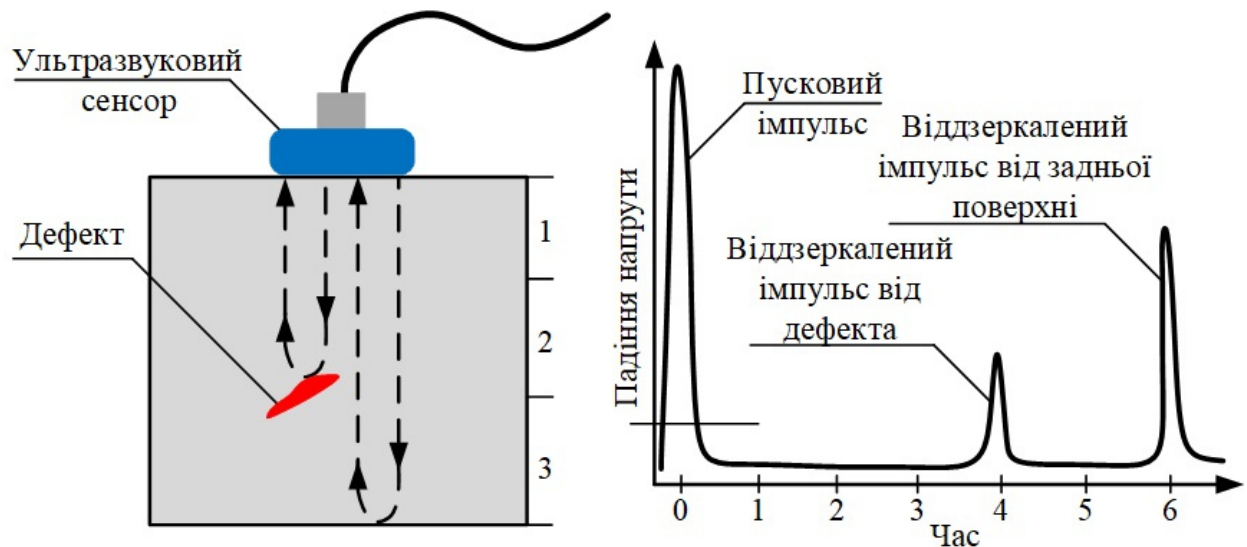


Рисунок 1.2 – Принцип ультразвукового контролю

Ультразвуковий метод вимірювального контролю протяжних об'єктів розроблено та впроваджено для здійснення тестування великих об'ємів матеріалу з однієї точки. Зазначений метод працює завдяки рівномірному розташуванню кіл вимірювального перетворювача, які розташовано навколо об'єкту дослідження – труби. Розташовані кола формують серію низькочастотних коливань. Ці коливання у вигляді хвиль розповсюджуються симетрично вздовж осі труби. Завдяки цьому забезпечується повне покриття труби [5].

Для ідентифікації корозії в трубопроводах застосовується внутрішня інспекційна система, що обертається. Вимірювальний зонд розташований в трубі, він рухається вздовж її, що дозволяє виконувати сканування внутрішньої поверхні труби.

Для ідентифікації дефектів у швах, що утворено під час зварювання, застосується дифракція розповсюдженої хвилі. Для визначення місця, де

розташований відбивач, використовується як інформативний параметр у зазначеному методі – час розповсюдження ультразвукового імпульсу. Для такої реалізації застосовують окремі сенсори. Передавач генерує низькочастотні хвилі, які формуються під деяким кутом. Передавачі повертаються до приймача тоді, коли хвилі проходять через дефект [6].

Для одержання надійного акустичного контакту об'єкта досліджень та сенсора застосовується ультразвуковий вимірювальний контроль в сухому стані. Зазначений метод є дешевим у застосуванні метод, для його реалізації застосовується імерсійна рідина. Також, вимірювальні перетворювачі зберігають робочий стан під час дії на них високої напруги. Зазначений метод можна реалізувати зі застосуванням контактних, гнучких, дистанційних або колісних вимірювальних перетворювачів.

Ультразвуковий метод вимірювального контролю має ряд недоліків та переваг. За допомогою цього методу можна ідентифікувати внутрішні дефекти в об'єкті досліджень. Також, метод є простий в реалізації та доволі точним. Проте, не всі матеріали можуть бути сприйнятливими до застосування ультразвукового вимірювального контролю. Це метод має важливий недолік, який полягає в тому, що для його реалізації необхідна висока кваліфікація обслуговуючого персоналу.

1.1.3 Магнітопружний метод контролю

Зворотний магнітострикційний ефект, або його ще називають магнітопружний ефект, має місце під час зміни магнітної сприйнятливості матеріалу, коли на цей матеріал діє механічний вплив (див. рис. 1.3). Зазначений ефект вказує на ступінь намагніченості матеріалу, якщо до нього прикладено магнітне поле. У порівнянні з ультразвуковим, то зазначений метод має такі переваги, як стаціонарність апаратури, висока чутливість вимірювання, широке застосування, довговічність та простота реалізації.

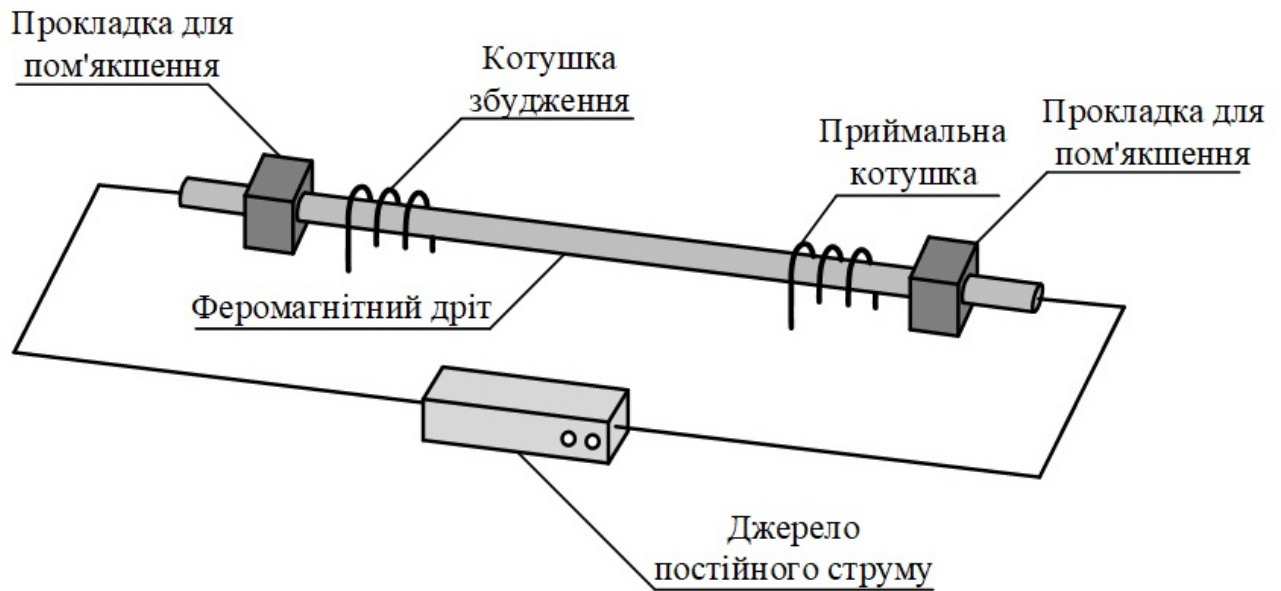


Рисунок 1.3 – Структура магнітострикційної системи вимірювального контролю

Магнітострикційний метод отримав розповсюдження у газовій, нафтовій, хімічній промисловості та електроенергетики, а також під час досліджень та випробувань мостів. До недоліків зазначеного методу можна віднести те, що зі застосуванням його можна здійснювати контроль тільки об'ємних матеріалів. Також ефективність вимірювального перетворення зменшується зі збільшеннями частот сигналів.

1.1.4 Тепловий метод вимірювального контролю

Інфрачервоний або тепловий контроль застосовується для вимірювання значень температури поверхні на базі інфрачервоного оптичного випромінювання, що генерується об'єктом під час проходження тепла через цього або до нього [3]. Інфрачервоне оптичне випромінювання має більш довгі хвилі, ніж видиме випромінювання, проте його можна визначити зі застосуванням тепловізорів, які мають назву інфрачервоні камери. Для підвищення точності визначення параметрів інфрачервоного випромінювання

об'єкт, що досліджується, необхідно розташувати у прямій видимості з інфрачервоною камерою. Об'єкти камери не повинен перекриватися іншим об'єктами, окрім досліджуваного, оскільки це може призвести до розсіювання тепла, та, як наслідок, до зменшення точності результатів вимірювання. Під час правильного застосування тепловізійних зображення, за допомогою їх можна ідентифікувати корозійні пошкодження, відшарування, включення, порожнини, а також інші шкідливі умови. Термографічний вимірювальний контроль має два різновиди (див. рис. 1.4):

1) пасивний, в якому визначаються ознаки, що мають місце під час дії більш низької або високої температури, ніж фон (див. рис. 1.4, а);

2) активний, в якому застосовується джерело випромінювання для утворення теплового контрасту між фоном та об'єктом дослідження (див. рис. 1.4, б) [7].

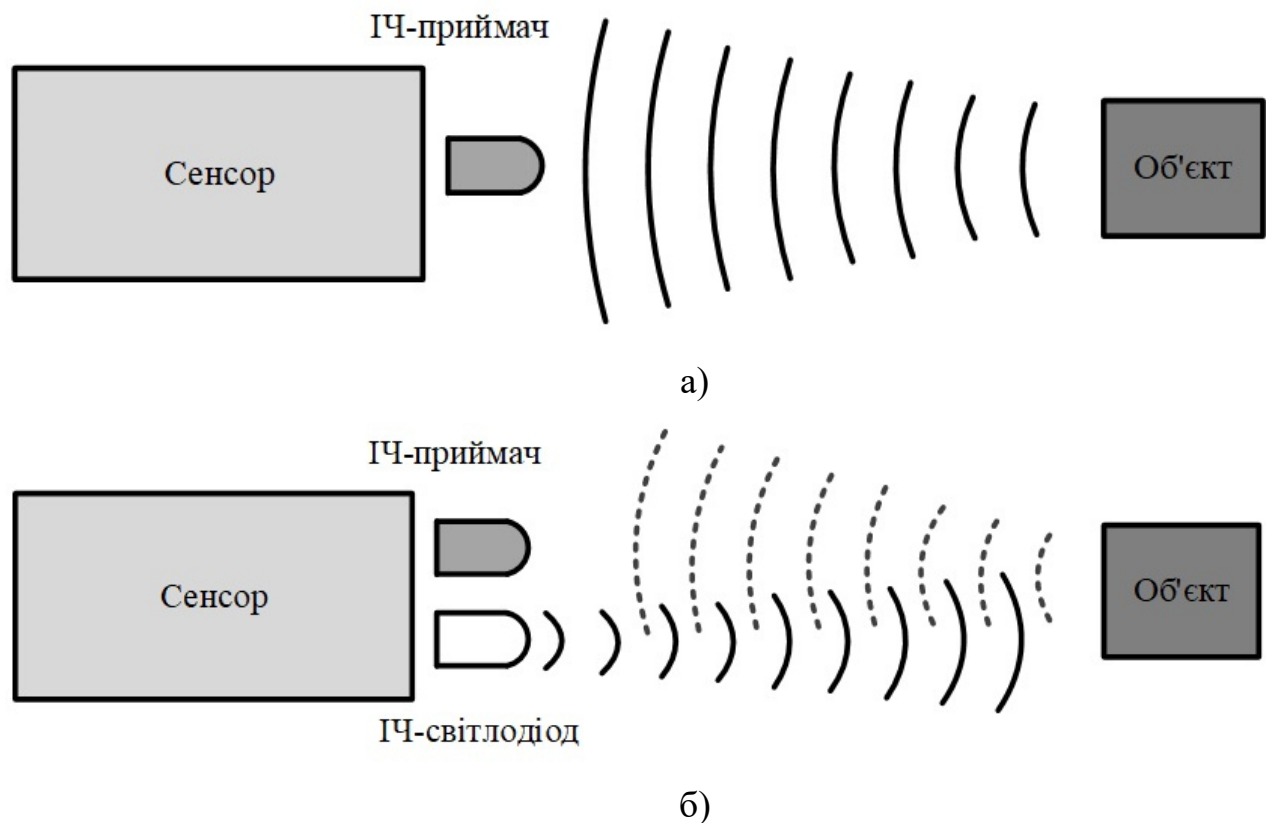


Рисунок 1.4 – Методи термографічних вимірювань:

- а) пасивний термографічний вимірювальний контроль;
- б) активний термографічний вимірювальний контроль

Інфрачервона термографія має такі переваги: безконтактне здійснення вимірювального контролю, під час виконання вимірювання захоплюється фіксована ділянка, що є аналогічно відеокамері у видимій частині спектру, також зі застосуванням зазначеного методу здійснюються вимірювання властивостей об'єктів дослідження, що обертаються або рухаються, навіть тих об'єктів, що мають доволі високу температуру. До базового недоліку інфрачервоної термографії можна віднести те, що на результат вимірювання істотно впливає зміна таких факторів, як властивості об'єкта дослідження: коефіцієнт пропускання, здатність до випромінювання, здатність до віддзеркалення, температура та властивості навколишнього середовища та ін.

Для здійснення вимірювання значень температури з достатньо високою точністю необхідно знати величини оптичних властивостей об'єкта дослідження. Визначення зазначених властивостей зазвичай є складною задачею, що вимагає застосування складного та дорогого обладнання, а також потребує високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

1.2 Термоелектричний методу вимірювального контролю дефектів у сплавах металів

Для забезпечення неруйнівного вимірювального контролю сплавів металів отримав подальший розвиток термоелектричний метод [8], технічна реалізація якого дозволила вирішити такі завдання:

- вхідний контроль для проведення сертифікації продукції, що надходить до виробника;
- ідентифікація шару, який немає вуглецю, та визначення глибини шару без вуглецю;
- контроль якості продукції при здійсненні її термічної обробки;
- визначення геометрії шару, де має місце цементація виробів зі сталі;
- забезпечення сортування виробів за марками та видами сплавів металу.

Термоелектричний методу контролю має одну основну перевагу серед інших методів. За допомогою термоелектричного методу можна виконувати вимірювання в реальному часі. Також до основних переваг зазначеного методу відносять те, що технічна реалізація методу є доволі простою, технічні пристрої, у яких реалізовано зазначений метод, мають невеликі розміри, а також вони можуть працювати в автономному режимі. Не має потреби виконувати доволі складну підготовки об'єкту дослідження до виконання експерименту. Доволі проста реалізація зазначених електронних систем не вимагає залучення персоналу, що має високу кваліфікацію, для технічного обслуговування електронних систем. Тому, має місце істотне зростання інтересу до вимірювальних систем, які засновано на термоелектричному методі контролю дефектів у сплавах металів.

На початку XIX сторіччя Зеєбеком виявлено термоелектричний ефект [9], який базується на явищі протікання в замкнутому колі електричного струму, під час цього коло має два сплави металів, що різномірні між собою. На зазначені сплави діють різні значення температури. Електричне коло, що показує умови виникнення ефекту Зеєбеку, наведено на рис. 1.5. Величина падіння напруга на кінцях термоелектричної пари сплавів металу дорівнює:

$$E = -\Delta T \cdot S, \quad (1.1)$$

де ΔT – градієнтне значення зміни температури;

S – коефіцієнт пропорційності або коефіцієнт Зеєбеку.

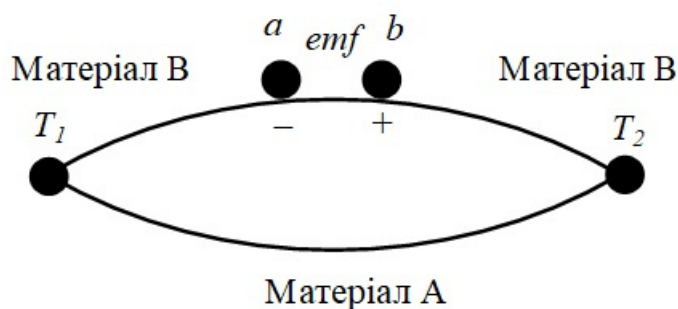


Рисунок 1.5 – Електричне коло, що показує умови ефекту Зеєбеку

Термоелектричні ефекти засновано на взаємодії між електронними та тепловими властивостями сплавів металів. Термоелектричні ефекти виникають при вимірюванні сили струму та падіння напруги, що зумовлено зміною теплової енергії. Завдяки наявності теплового потоку, який індуковано, формується градієнт значення температури, що має особливості з нагріванням тіл. Ефекти Пельтьє та Зеебека разом з фундаментальними законами термічної динаміки використовуються для математичного опису всіх термоелектричних ефектів. Якщо для сплаву металу, який має властивості щодо проведення струму, утворити градієнт температури, то має місце міграція носіїв електричного заряду від гарячого шару до холодного, це є суттю ефекту Зеебека. Якщо розімкнути електричне коло, то має місце в холодній частині сплаву металу накопичення електричних зарядів, що може призвести до утворення падіння напруги на кінцях розімкненого кола (див. рис. 1.5).

Термічний ефект Зеебека можна описати зі застосуваннями локально створеного термоелектричного поля, та значення коефіцієнта Зеебека можна визначити:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (1.2)$$

де ΔT – величина різниці температури між двома сплавами металів;

V – різниця потенціалів між двома провідниками;

S – значення коефіцієнта Зеебека;

Якщо здійснювати нагрівання один з двох сплавів металу, то електричні носії заряду рухаються від гарячого до холодного кінців. Під час підключення цих кінців до джерела електричного струму, має місце утворення постійного струму, який протікає за електричним колом. Величина термо-е.р.с. є має невелике значення, що становить одиниці міковольт на один градус. Під час дії великої різниці температур між сплавами металів має місце значена різниця потенціалів між ними, що складає декілька десятків мілівольт.

Якщо два провідника виготовлені з різних типів сплавів металів А і В, як наведено на рис. 1.5, то під час послідовного підключення можна отримати термоелектричний генератор. Під час підключення вимірювального пристрою до затисків «а» і «b», можна отримати реалізацію сенсора. Якщо елементи підключати послідовно у цій схемі, то має місце підвищення величини вихідної напруги, а якщо підключення здійснюється паралельно, то зростає величина сили електричного струму. Переважна кількість термоелектричних елементів використовується для отримання електричної енергії. Якщо має місце високе значення різниці температур, то її необхідно підтримувати на стиках термоелементів.

Ефект Зеєбека є базовим під час вимірювання величини температури зі застосуванням термопар. Зазначений ефект використовується в термічному охолодженні електричним струмом та визначенні якісних показників сплавів металів. Широкого використання отримали комбінації таких сплавів металів для виготовлення термопар, як хромель – алюмель, хромель – константан, алюмель – константан, мідь – константан та залізо-константан.

1.3 Схемотехнічні реалізації для вимірювання величина термо-е.р.с.

Величину термо-е.р.с. вимірюють зі застосуванням різних методів. На практиці широко розповсюдження отримали два методи вимірювання диференціальний та інтегральний. Схему, за допомогою якої виконується вимірювання величина термо-е.р.с., зі застосуванням інтегрального методу наведено на рис. 1.6, де позначено: V_T – падіння напруги, величина якого вимірюється на виходів термічної пари; T – значення температури робочого сплаву; T_0 – еталонна величина температури.

До складу електричної схеми входять два типи провідників, які мають різні властивості. Один з цих провідників є робочим, а інший виконує функцію еталоном. Одні з кінців обох провідники підключені зі застосуванням

вимірювального пристрою. Для виконання процедури вимірювання величини температури контакту робочого зразка та електроду, який виконує функцію порівняння використовується електрод, він має заздалегідь визначену величину термо-е.р.с., що разом з еталонним електродом утворює термопару:

$$\Delta V = \int_{T_0}^T (S_l - S_x) dT, \quad (1.3)$$

де $(S_l - S_x)$ – відносний приріст термо-е.р.с. сплавів металів.

T_0 – еталонна величина температури;

T – значення температури, яке має робочий спав;

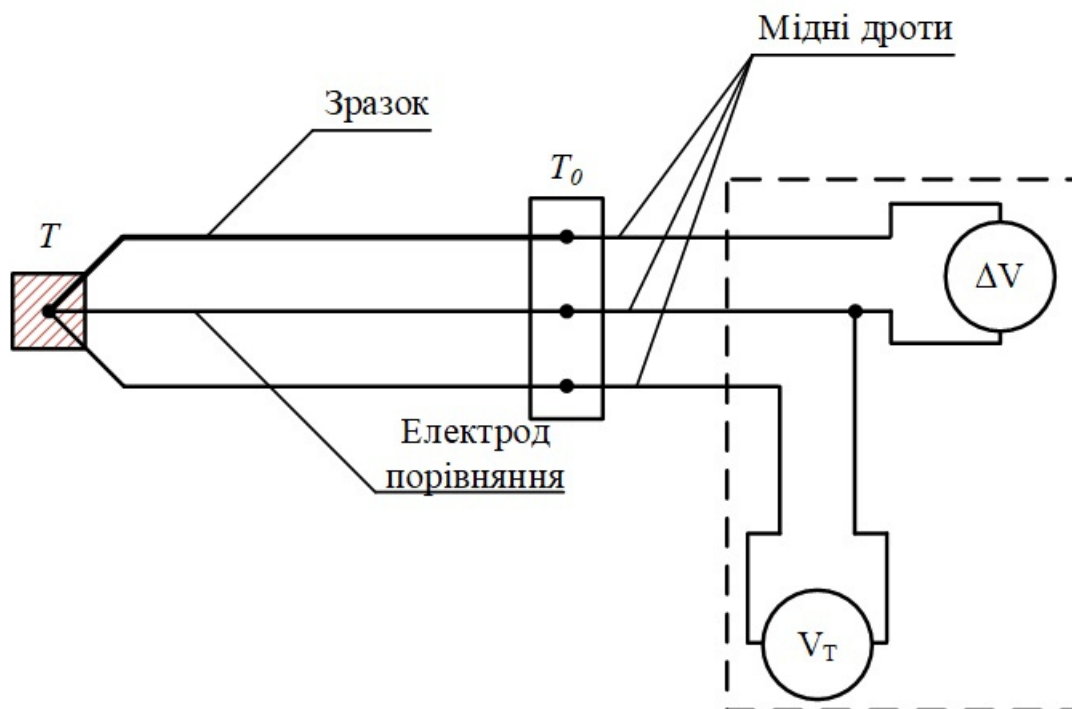


Рисунок 1.6 – Схема інтегрального методу вимірювання величини термо-е.р.с.

Для реалізації зазначеного методу вимірювання зразки виготовляються у вигляді однорідних дротів. Зазначене є одним з базових недоліків інтегрального методу вимірювання, тому що отримання таких зразків, є достатньо складною

задачею. Тому, інтегральний метод вимірювання термо-е.р.с. не отримав широкого розповсюдження.

Якщо зразки мають довільну форму та невеликі розміри, то вимірювання їх величина термо-е.р.с. здійснюється диференціальним методом, схемотехнічну реалізацію якого представлено на рис. 1.7. Величину різниці температури, що утворюється між двома точками аналізованого зразка, визначають з використанням двох термопар або інших датчиків, що здійснюють вимірювання температури. Процес вимірювання величина термо-е.р.с. (ΔV) здійснюється місце між гілками термопар.

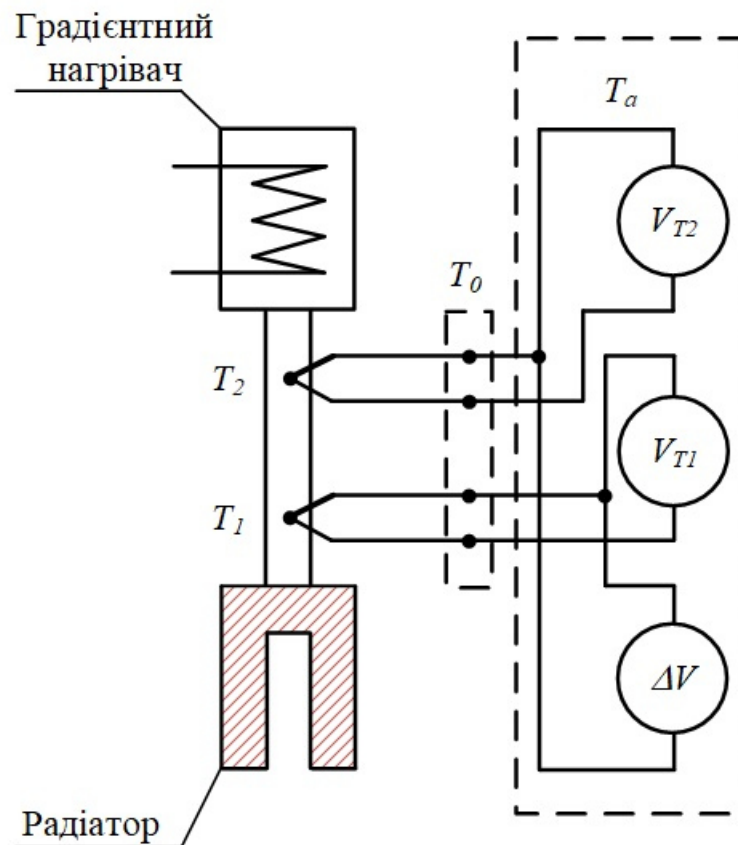


Рисунок 1.7 – Схемотехнічна реалізації диференційного методу вимірювання величина термо-е.р.с.

Зі застосуванням нагiвача формується тепловий потiк, який спрямований до зразка, завдяки цьому формується градiєнт температур. Для проведення процедури вимірювання зазначеного градiєнта використовують дві термопари,

що встановлено поверхні зразка в різних його точках. Величина термо-е.р.с. визначається зі застосуванням такого відношення:

$$S_x = S_l - \frac{\Delta T}{\Delta V}, \quad (1.4)$$

де S_l та S_x – коефіцієнти термо-е.р.с. еталона та зразка, що досліджується;

ΔV – падіння напруги між еталом і зразком, що досліджується;

ΔT – градієнт зміни температури.

1.4 Аналіз метрологічних вимог забезпечення термоелектричних вимірювань

Величина термо-е.р.с. може змінюватися від застосування різних типів сплавів металу, а так саме від градієнту температур між точками, де має місце з'єднання різних сплавів металів. Теплова енергія також може обернено перетворюватися до електричної. Процес вимірювання величини термо-е.р.с. не може виконуватися сумісно з процесом вимірюванням значення температури. Це пояснюється тим, що значення сили електричного струму, який має місце в термопарі, не залишається незмінною. Якщо електричний струму проходить через коло, то мають місце зміни температури переходів.

Величина градієнту температури ΔT в сплавах металів є пропорційною від щільності носіїв електричних заряду, а також залежить від значення різниці потенціалів ΔV . Якщо поділити різницю потенціалів ΔV на градієнт температури ΔT , то можна визначити значення коефіцієнта Зеєбека $S = \Delta V / \Delta T$. Значення різниці потенціалу термо-е.р.с. має однозначний зв'язок з базовими типами носіїв електричного заряду, та не залежить від напрямку руху цих носіїв. Переважна більшість вимірювальних систем, що застосовуються в теперішній час, не забезпечує виконання наведених мов, у результатах

вимірювання присутня доволі велике значення методичної похибки.

Якщо потрібно підвищити точність вимірювання значення термо-е.р.с., то забезпечується виконання наступних важливих умов:

- через наявність механічного контакту електрода та зразка, що досліджується, має місце утворення істотної зміни температури між електродом і зразком;

- процес вимірювання різниці потенціалів та температури необхідно проводити в одній точці зразка, що досліджується;

- якщо здійснювати механічне притискання до зразка, що досліджується, вимірювального електрода, то виникає бар'єр Шотки;

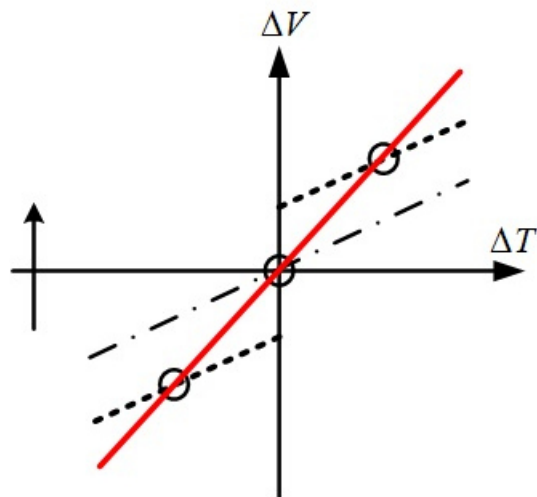
- величина коефіцієнта Зеєбека S змінюється від температури, тому значення падіння напруги ΔV також залежить від зміни ΔT . Величину $S(T_0)$ необхідно розраховувати для $S(T \rightarrow T_0)$;

- якщо має місце механічний контакт двох твердих сплавів металів, які мають властивості щодо електричної провідності, то утворюється контактне падіння напруги, навіть, якщо з'єднання утворено під час пайки. Знак контактного падіння напруги та її величина визначається положенням рівня Фермі сплавів металів. Також впливають на результат вимірювання наявність інших поверхневих ефектів, облік яких достатньо складно здійснювати. Для виконання вимірювання величини термо-е.р.с. з високими показниками точності необхідно істотно зменшити величину контактного падіння напруги.

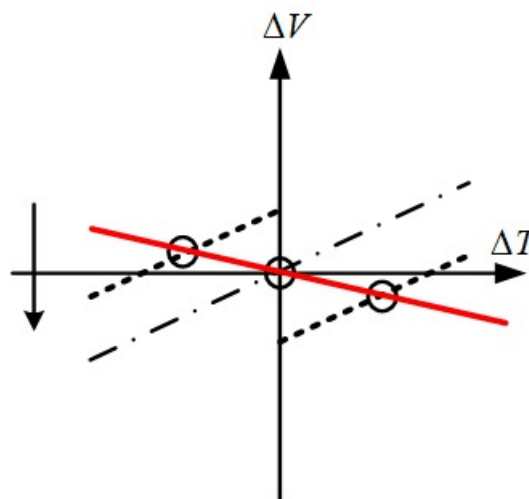
Величину коефіцієнта Зеєбека, значення якого визначається через термо-е.р.с. $S = \Delta V / \Delta T$, обчислюють після вимірювання величини термоелектричного падіння напруги $V(T)$, якщо має місце вплив двох температур. Функціональна залежність $S(T)$ має лінійний вигляд [10], тому що не здійснюється облік впливу на результат вимірювання контактного падіння напруги (див. рис. 1.8). Це є основною причиною того, що знак коефіцієнта Зеєбека S може змінюватися на протилежний.

На рис. 1.8 наведено наступні позначення: за допомогою стрілок

позначають контактне падіння напруги; колами позначено результати експериментальних досліджень; зі застосуванням пунктирної лінії позначено вплив контактного падіння напруги; за допомогою суцільної червоної лінії позначено помилкова величина термо-е.р.с.; зі застосуванням штрих-пунктирної лінії позначено істинне значення, що визначається без обліку контактного падіння напруги.



а)

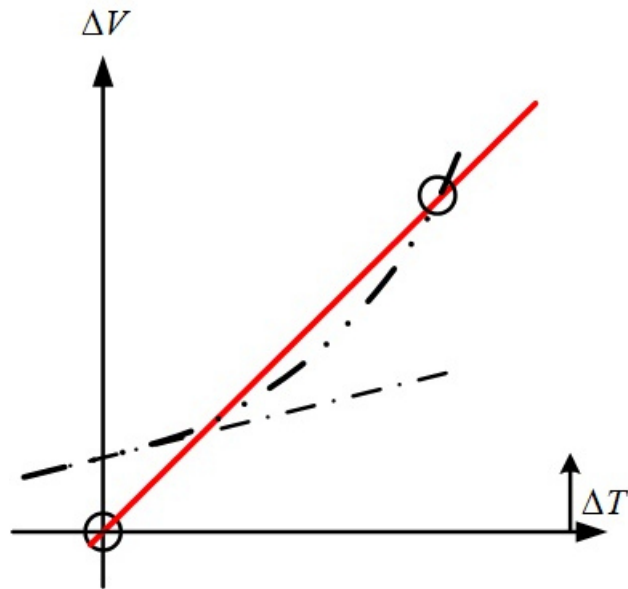


б)

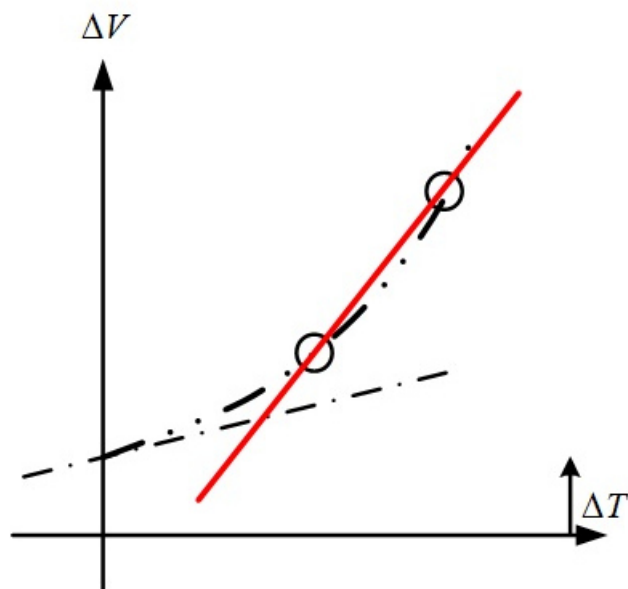
Рисунок 1.8 – Залежність контактного падіння напруги на величину коефіцієнта Зеебека: позитивне (а) та негативне (б) падіння напруги

Під час вимірювання величини термо-е.р.с. тільки в двох точках, неможливо проаналізувати характер зміни функції термо-е.р.с. від температури

(див. рис. 1.9). Цього можна уникнути, якщо здійснювати вибір незначної зміни ΔT . Це може призвести до вибору ΔV , яке буде мати теж незначне значення, що знаходиться на рівні власних шумів електронного підсилювача, а це, в свою чергу, призведе до істотного зменшення точності вимірювань.



а) $T > T_0$; $T = T_0$



б) $T_2 > T_1$, $T_1 > T_0$

Рисунок 1.9 – Похибки, що виникають, якщо виконувати вимірювання величин термо-е.р.с. тільки в двох точках

На рис. 1.9 представлено наступні позначення: стрілки позначено величини контактного падіння напруги; зі застосуванням кіл позначаються результати експериментальних досліджень; за допомогою суцільної червоної лінії позначено величина термо-е.р.с., яка має похибки результату вимірювання; зі застосуванням штрих-пунктирної лінії позначено істинне значення термо-е.р.с. з адитивною складовою ΔV ; з використанням штрих-пунктирної чорної лінії наведено істинне значення, що має місце, якщо діє температури T_0 , та не впливає контактне падіння напруги.

Під час аналізу функціональної залежності, що наведено на рис. 1.9, визначено, якщо виконувати вимірювання значення термо-е.р.с., то мають місце достатньо великі похибки в результатах вимірювання. Величину коефіцієнта Зеєбека можна визначити, якщо побудувати асимптотичну залежність $S(T_0) = \lim(\Delta V / \Delta T)$, як показано на рис. 1.10, де використано такі позначення: суцільною червоною лінією позначена асимптотична залежність термо-е.р.с., що проведено до T_0 ; штрих-пунктирною чорною лінією позначено істинна залежність термо-е.р.с.; зі застосуванням стрілок наведено величину контактного падіння напруги.

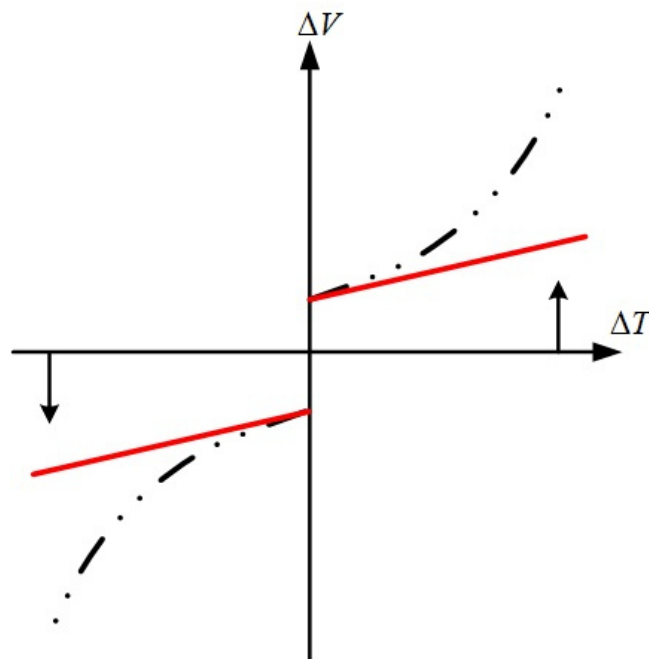


Рисунок 1.10 – Визначення значення коефіцієнта Зеєбека

1.5 Аналіз методів вимірювання величини термо-е.р.с.

Переважає більшість методів вимірювання величини термо-е.р.с. не забезпечує ідеальних умов, тому до складу результатів вимірювання входять істотні похибки. У теперішній час розроблено та застосовуються два методи вимірювання значення термо-е.р.с. (див. рис. 1.11, а та б) [11], зі застосуванням яких можна отримати мінімальну величину похибки результату вимірювання.

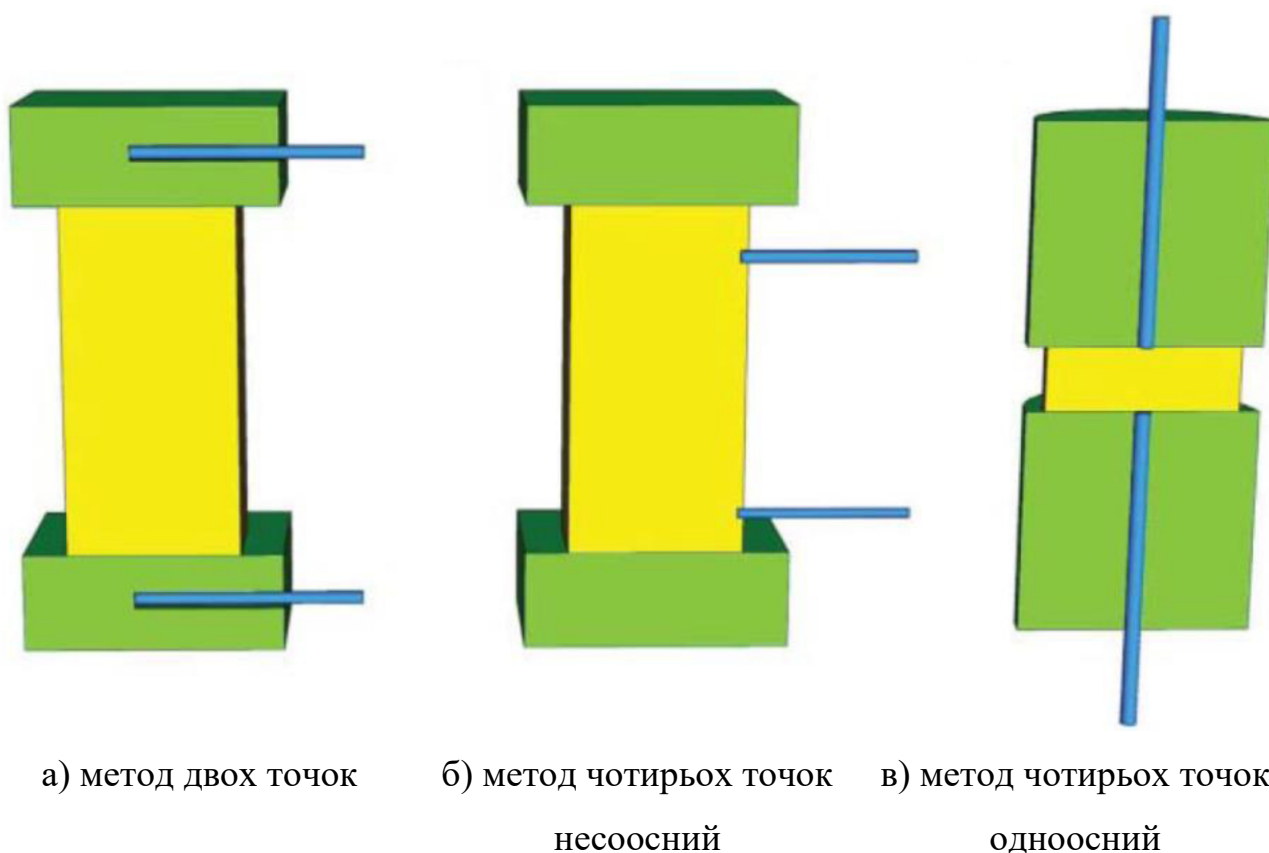


Рисунок 1.11 – Базові методи вимірювання величини термо-е.р.с.

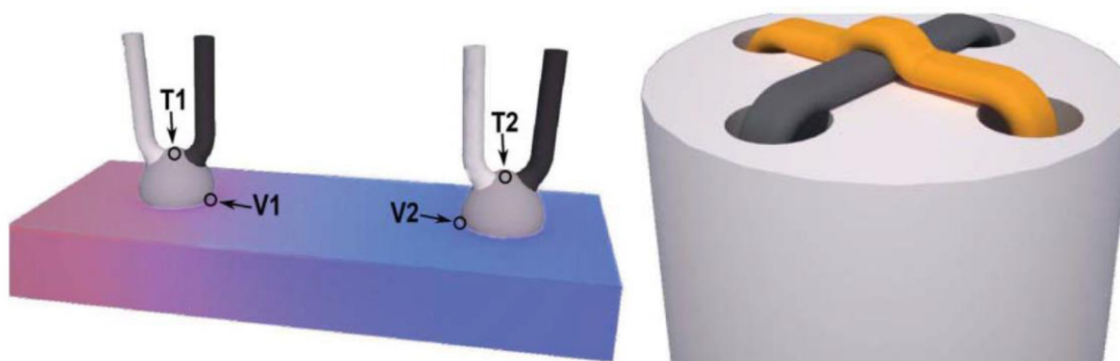
Для реалізації першого методу вимірювання (див. рис. 1.11, а) необхідно розмістити об'єкт дослідження між двома провідниками, які виготовлено з металу. Ці провідники є холодним і гарячим електродами. Нижній та верхній блоки зеленого кольору є тепловідводами та/або нагрівачами. Блок жовтого кольору є об'єкт дослідження, електроди наводяться як вузькі сині провідники. Зі застосуванням такої конструкції протікання хімічної реакції між об'єктом

дослідження та електродом не відбувається. Зазначений метод має наступні недоліки, як утворення термічного та електричного опорів між електродами, а також охолоджувачем і нагрівачем, також ці опору утворюються між нагрівачем та об'єктом дослідження, що є базовою причиною появи похибки в результаті вимірювання.

Конструкція, що наведено на рис. 1.11, б, має більш кращі параметри та характеристики. У ній збільшено кількість точок для контакту до чотирьох, а також виконується процедура вимірювання опору електричного контакту.

Для виконання процедури вимірювання значення термо-е.р.с. сплавів металів, які мають достатньо малий опір використовується метод чотирьох точок, це зменшує величину абсолютної похибки результату вимірювання (див. рис, 1.11, в). Якщо порівнювати з методом на рис. 1.11, а, то електроди розміщено на бічній поверхні об'єкта досліджень, що зменшує вплив зміни теплового опору між об'єктом дослідження та електродами. Також, для підвищення точності вимірювання необхідно:

– якщо має місце високе значення різниці температури між об'єктом дослідження та електродом, що має високі теплопровідні властивості, то знижується температура об'єкта досліджень, що підвищує вимірювальне значення термо-е.р.с. та температури (див. рис. 1.12, а);



а) застосування двох термопар, що мають спай

б) конструкція вимірювального перетворювача зі схрещеними дротами

Рисунок 1.12 – Схемотехнічна реалізація процесу вимірювання значення термо-е.р.с. зі застосуванням двох термопар

– для того, щоб забезпечити доволі якісний тепловий контакт між поверхнями термопар та об'єктом дослідження, потрібно якісно притиснути термопару до поверхні об'єкта. Так, під час нагрівання до значень високої температури об'єкта має місце пластична деформація та руйнування поверхні, що досліджується. Це призводить до істотного погіршення контакту між термопарою та об'єктом дослідження. Якщо сила притискання має невисоке значення, то істотно підвищується величина перехідного опору контакту між термопарою та об'єктом дослідження.

– якщо має місце градієнт температури на поверхні об'єкта дослідження, то точність вимірювання температури зменшується (див. рис. 1,12. а).

Для підвищення точності вимірювання температури та термо-е.р.с. використовують вимірювальний перетворювач, який має на ізотермічній поверхні об'єкта схрещені дроти (див. рис. 1.12, б). Під час виготовлення такої конструкції вимірювального перетворювача виникає труднощі, що обумовлено крихкістю матеріалів, які мають якісні термоелектричні властивості. Зазначені матеріали можна пошкодити, якщо неакуратно виконувати свердління та різання, що суттєво обмежує області застосування зазначеного методу вимірювання. Якщо застосовувати таку конструкцію, неможливо виконувати вимірювання величини теплопровідності матеріалу.

Зменшення значення температури гарячого електрода під час передачі деякої кількості тепла від об'єкта дослідження зразка призводить до зміни величини термо-е.р.с. У місці контакту також присутній градієнт температури.

1.6 Висновки

З проведеного аналізу параметрів і характеристик термоелектричного методу контролю дефектів у сплавах металів визначено, що повторюваність результатів вимірювання зі застосуванням цього методу є доволі низькою. Це обумовлено зміною температури об'єкта досліджень та робочого електрода під

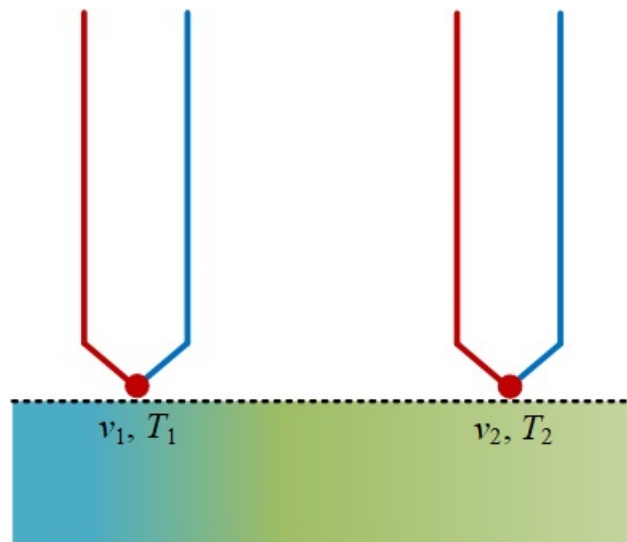
час теплового обміну, а також неоднорідним хімічним і фазовим складом об'єкта дослідження, поверхні об'єкта та електродів також мають різну ступінь шорсткості. Для мінімізації впливу зазначених факторів на результат вимірювання потрібно провести додаткові дослідження, в результаті яких визначити ступінь впливу зміни цих факторів на результат вимірювання, та запропоновувати технічну реалізацію, що дозволить мінімізувати вплив зміни зазначених факторів. Для мінімізації впливу наявності неоднорідності хімічного та фазового складу на результат вимірювання застосовують лінійні або площинні електроди, які не мають одного точкового контакту з об'єктом дослідження. Реально має місце не контакт за площиною, а контакт через велику кількість точок, це обумовлено тим, що об'єкти дослідження та електроди мають шорсткі поверхні.

Якщо контакт здійснюється через велику кількість точок, то для вивчення механізму вимірювання еквівалентної термо-е.р.с. необхідно виконати додаткові дослідження. Це обумовлено тим, що у різних типах термоелектричних перетворювачів мають місце різні параметрами та характеристики. У них відрізняються значення величини е.р.с., внутрішнього опору, потужності та перехідного опору контактів. Один з методів, що використовується під час виконання досліджень зазначеного механізму, є заміщення неоднорідної поверхні різними видами та типами термоелектронних перетворювачів, що підключаються паралельно.

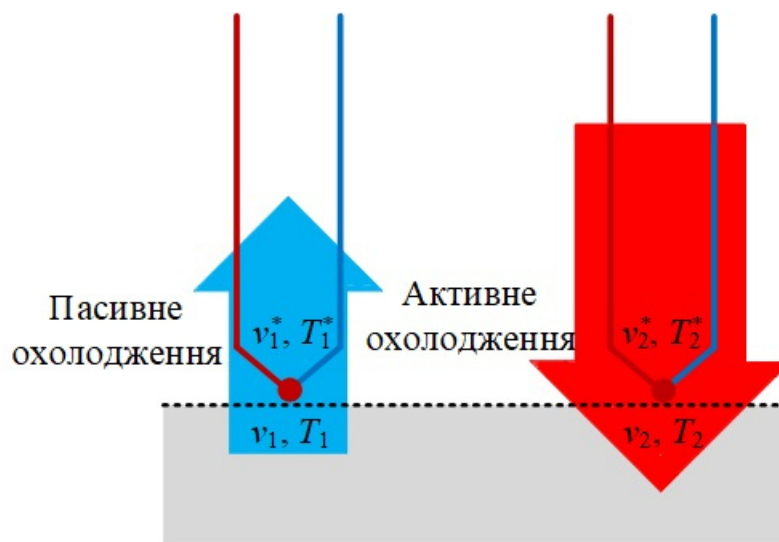
2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИНИ ТЕРМО-Е.Р.С.

У сплавах металів спостерігається істотна просторова зміна значення термо-е.р.с. [13]. Для істотного зменшення величини похибки вимірювання, що обумовлено просторовими змінами, виконується корегування розташування датчика для здійснення вимірювань точно в одній й тій самій точці. Це дозволить виконувати порівняння результатів багатократних вимірювань між собою. Якщо устаткування встановлено постійно, то реалізацію процедури вимірювання здійснюється лише в одному місці об'єкта досліджень, що істотно збільшує значення частоти вимірювання. Показники точності та стабільність результатів вимірювання термо-е.р.с. має найважливіше значення. Ретельно необхідно приділяти увагу стану поверхні об'єкта дослідження, що змінюється під час експлуатації обладнання. Зазначені необхідні дослідження спрямовані на зменшення величини чутливості щодо якісного стану поверхні об'єкта дослідження. Ці дослідження вимагають здійснення локальної довготривалої процедури вимірювання.

Схемотехнічну реалізацію процедури вимірювання величини термо-е.р.с. наведено на рис. 2.1, а. Зазначену схему реалізують під час здійснення вимірювання градієнта температури, а також падіння напруги на двох електродах. Це відбувається, якщо забезпечується контакт з поверхнею об'єкта дослідження. Електроди складаються з термопар, які використовують для здійснення вимірювання значення температури. Також, зі застосуванням дротів відбувається процедура вимірювання різниці потенціалів. У промислових первинних перетворювачах термо-е.р.с. використовується дві точки вимірювання. У цьому випадку градієнт температури має місце під час нагрівання локальної ділянки об'єкта. Зазначений елемент входить до складу одного електрода, що дає змогу одержати гарячий наконечник. Інший електрод є пасивним, на нього впливає зміна температури довкілля (див. рис. 2.1, б).



а) зовнішнє нагрівання об'єкта дослідження



б) нагрівання об'єкта дослідження зі застосуванням електрода,
що має гарячий наконечник

Рисунок 2.1 – Схематехнічна реалізація процесу вимірювання значень
термо-е.р.с., якщо використовуються дві термопари, що мають контакт з
поверхнею об'єкта дослідження

Основні складності мають місце, якщо величина температури електродів або різниці потенціалів не дорівнюють за величиною різниці потенціалів на поверхні об'єкта дослідження. Утворення контакту між фазами призводить до виникнення зміни температури або різниці потенціалів між поверхнею об'єкта

дослідження (v_1, v_2, T_1, T_2) та електродами ($v_1^*, v_2^*, T_1^*, T_2^*$). Під час здійснення розрахунків визначаються значення термо-е.р.с., величина яких має в своєму складі додаткові похибки результату вимірювання.

Виникнення електричного та теплового опору контактів обумовлено недосконалістю міжфазних умов. Якщо має місце електричний контакт, то це призводить до утворення падіння напруги, якщо електричний струм протікає через опір. Величину падіння напруги вимірюють з використанням диференційного (різницевого) підсилювача. Це електронний підсилювач високий вхідний опір, величина якого більше 10 МОм, отже у цього підсилювача є незначний вхідний струм. Під час цього, значення електричного опору контакту практично не впливає на метрологічні характеристики вимірювальної системи. Утворюється тепловий опір контакту, якщо має місце тепловий потік на межі розділу двох середовищ, що є причиною виникнення різниці температур. Як джерело тепла використовується гарячий електрод. Це тепло передається об'єкту дослідження, наявність зазначеного теплового потоку є основою для виконання процедури вимірювання. Величина теплового потоку буде зменшуватися, якщо термопара має істотну теплопровідність. Наведений ефект отримав назву «холодний дотик». Це явище обумовлено наявністю різниці температур, що призводить до виникнення додаткової похибки результатів вимірювання температури під час здійснення процедури визначення величини термо-е.р.с. Також, якщо у матеріалах утворюються власні термо-е.р.с., то виникає додатковий паразитний потенціал, який виникає під час наявності різниці температур. З наведено аналізу можна зробити висновок, що метрологічні характеристики двох точкового вимірювача величини тремо-е.р.с. залежать від величини контактного теплового опору.

Значення теплового опору контактів потрібно попередньо визначити до проектування вимірювальної системи, що істотно сплине на її метрологічні характеристики [12]. Якщо зменшити величину теплового опору контактів, то зменшується величина випадкової похибки під час використання двохточкової схеми вимірювання термо-е.р.с.. Якщо параметри та характеристики

термоелектричних матеріалів можуть деградувати, то для зменшення випадкової складової похибки результату вимірювання необхідно використовувати більш складні методики. Величину температурного градієнту потрібно зменшити, який утворюється між об'єктом дослідження та електродами, що має місце під час нагрівання та охолодження сторін електродів. За допомогою зазначеного способу забезпечується зменшення через контакт величини теплового потоку [14]. Якщо здійснювати нагрівання ділянки на відстані від вимірювальних електродів, то завдяки введенню градієнта температур можна зменшити вплив нагрівання або охолодження через контакти датчиків. Цей підхід застосовується під час використання схеми на базі чотирьох точок. Електричний струм підводиться до місць, що віддалені від вимірювальних електродів, для мінімізації значення додаткової похибки теплового опору контактів. Під час застосування різних схем вимірювання термо-е.р.с. результати залежать від чутливості до зміни теплових опорів.

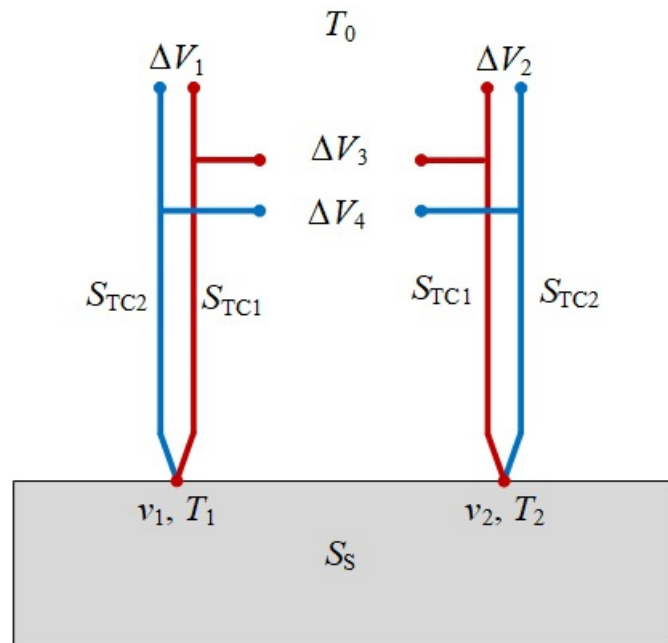
Вимірювання величини контактної термо-е.р.с. здійснюється на базі схеми, яку наведено на рис. 2.2, а. Дві термопари, які виготовлено у вигляді окремих електродів, притуляються об'єкта дослідження. Кожна з цих термопар складається з окремих двох термоелементів. У цих термоелементах коефіцієнти Зеєбека дорівнюють S_{TC1} та S_{TC2} . Якщо має місце різниця температури між об'єктом та електродами $T_1 - T_2$, то утворюється падіння напруги $v_1 - v_2$, величина якої є пропорційною за значення коефіцієнта Зеєбека матеріалу, з якого зроблений об'єкт S_s :

$$v_2 - v_1 = \int_{T_1}^{T_2} S_s dT, \quad (2.1)$$

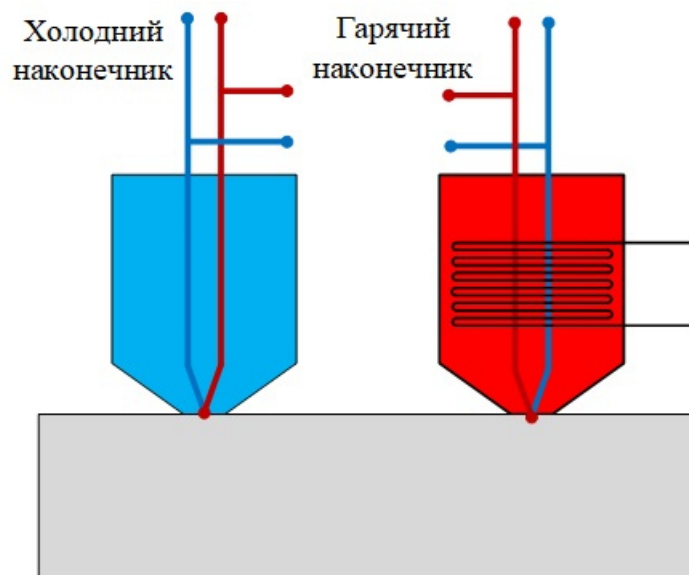
де v_2 та v_1 – потенціали другого та першого термоелемента;

S_{TC2} та S_{TC1} – коефіцієнти Зеєбека другого та першого термоелемента;

T_2 та T_1 – температура другого та першого термоелемента.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Схемотехнічна реалізація процедури вимірювання контактної термо-е.р.с. (а) та вимірювальна двохточкова схема (б) з елементом нагрівання, як один з електродів для утворення градієнта температур

Для реалізації процедури розрахунку величини S_s застосовують виконують чотири падіння напруги $\Delta V_1 - \Delta V_4$, що представлено на рис. 2.2, а. Падіння напруги ΔV_3 та ΔV_4 залежить від зміни коефіцієнта Зеєбека, а також від різниці між значеннями температур об'єкта $T_2 - T_1$. Зміна значення

термоелектричного потенціалу обумовлено зміні величини коефіцієнту Зеебека, а також різниці температур на кожному з термічних елементів схеми:

$$\begin{aligned} v_3 &= \int_{T_0}^{T_1} S_{TC1} dT + \int_{T_2}^{T_0} S_{TC1} dT + \int_{T_1}^{T_2} S_S dT + = \int_{T_1}^{T_2} (S_S - S_{TC1}) dT = \\ &= (T_2 - T_1) \cdot (\overline{S_S} - \overline{S_{TC1}}), \end{aligned} \quad (2.2)$$

Якщо значення термо-е.р.с. не змінюється в температурних межах від T_1 та T_2 , то можна використати для розрахунку таку формулу:

$$\overline{S} = \overline{S_{TC1}} - \frac{\Delta v_3}{T_1 - T_2}, \quad (2.3)$$

де $\overline{S_{TC1}}$ – значення коефіцієнта Зеебека для першого електрода;

$T_1 - T_2$ – різниця між температурою об'єкта та електрода;

Δv_3 – величина різниці потенціалів для одного з електродів.

Лінійний характер залежність (2.3) зберігається навіть, якщо величина термо-е.р.с. змінюється лінійно в межах температури від T_1 та T_2 , а за середнім значенням визначається величина коефіцієнт Зеебека, якщо $(T_1 + T_2) / 2$.

Аналогічно виконується наступне вимірювання падіння напруги Δv_4 та здійснюється розрахунок за співвідношенням:

$$\overline{S_S} = \overline{S_{TC2}} - \frac{\Delta v_4}{T_1 - T_2}. \quad (2.4)$$

Зазначене вимірювання має надмірний характер, його виконують для збільшення показників точності.

Для здійснення розрахунку S_S необхідно спочатку визначити величини

T_1 , T_2 та S_{TC1} . Величина термо-е.р.с. змінюється від значення температури. Для забезпечення компенсації використовується температура, значення якої дорівнює $(T_1 + T_2) / 2$. Визначення значень температур T_1 і T_2 виконується з використанням стандартної термопари. Величина падіння напруги ΔV перераховується до зміни температури зі застосуванням відомої залежності:

$$T = \sum_{m=0}^n (V_0 + \Delta V)^m \cdot c_m, \quad (2.5)$$

де V_0 – падіння напруга, величина якої обумовлена холодним спаєм, значення цього падіння напруги визначається через результати вимірювання температури холодного спаю T_0 ;

c_m – значення коефіцієнтів визначають з [15].

У промислових вимірювальних системах для визначення значення термо-е.р.с. використовують метод, який базується на застосуванні двох потоків. Реалізація зазначеного методу передбачає введення температурного градієнту завдяки використанню елемента нагрівання, який розташовано в одному з електродів. За допомогою цього рішення отримано гарячий електрода, що наведено на рис. 2.2, б.

Різниця температур гарячим електродом та зразком утворюється внаслідок теплового опору контакту, а також завдяки потоку тепла, який є адитивним. Зі застосуванням термопари не має змоги визначати істинне значення температури поверхні зразка, а різниця температур за між матеріалами утворює паразитний потенціал. Якщо має місце різниця температур $T_1^* - T_2$, то співвідношення (2.2) можна перетворити:

$$\Delta V_3 = -\Delta T_i \cdot (\overline{S_{TC1}} - \overline{S_i}) + (T_1 - T_2) \cdot (\overline{S_{TC1}} - \overline{S_s}), \quad (2.6)$$

де S_i – значення коефіцієнта Зеебека, що визначено для міжфазного матеріалу.

Друга складова у співвідношення (2.6) має характер систематичної похибки результату вимірювання. Вона обумовлена недосконалістю теплового опору контакту, а також наявністю теплового потоку між гарячим електродом та зразком. Аналогічна ситуація має місце, коли здійснюється вимірювання опору зі застосування двох точок, якщо електричний струм проходить через електроди та об'єкт дослідження. Величина падіння напруги вимірюється на електродах, а наявність падіння напруги на кабелем та контактами збільшує величину похибки результату вимірювання. Якщо використовувати чотирьохточкову схему вимірювання опору, у якій два електроди використовуються для введення електричного струму, а два інші, у яких підвищене значення вхідного імпедансу, застосовують для вимірювання падіння напруги. Тому, в вимірювальних електродах дії незначна величина електричного струму. Схемотехнічну реалізацію процедури вимірювання падіння напруги представлено на рис. 2.3.

Струм I , який протікає через електричний опір контакту, R_{e-int} , на якому утворюється падіння напруги між поверхнею зразка та електродами:

$$R_{e-int} \cdot I = v - v^*, \quad (2.7)$$

де I – сила електричного струму в замкнутому колі;

R_{e-int} – електричний опір контакту.

Величина термоелектричного потенціалу вимірюється з використання вольтметра з високими вхідним опором. Невелика величина сили електричного струму має місце в контактах опорів, тому утворюється невелике падіння напруги між точками поверхні зразка та електродами.

На величину падіння напруги може практично не впливати електричний опір контактів. Найбільшого розповсюдження отримали сплави металів, у яких величина термо-е.р.с. знаходиться в межах від -20 до $+20$ мкВ/°С. У цих сплавах металів значення падіння напруги на електричних опорах контактів буде становити одиниці мікрівольт.

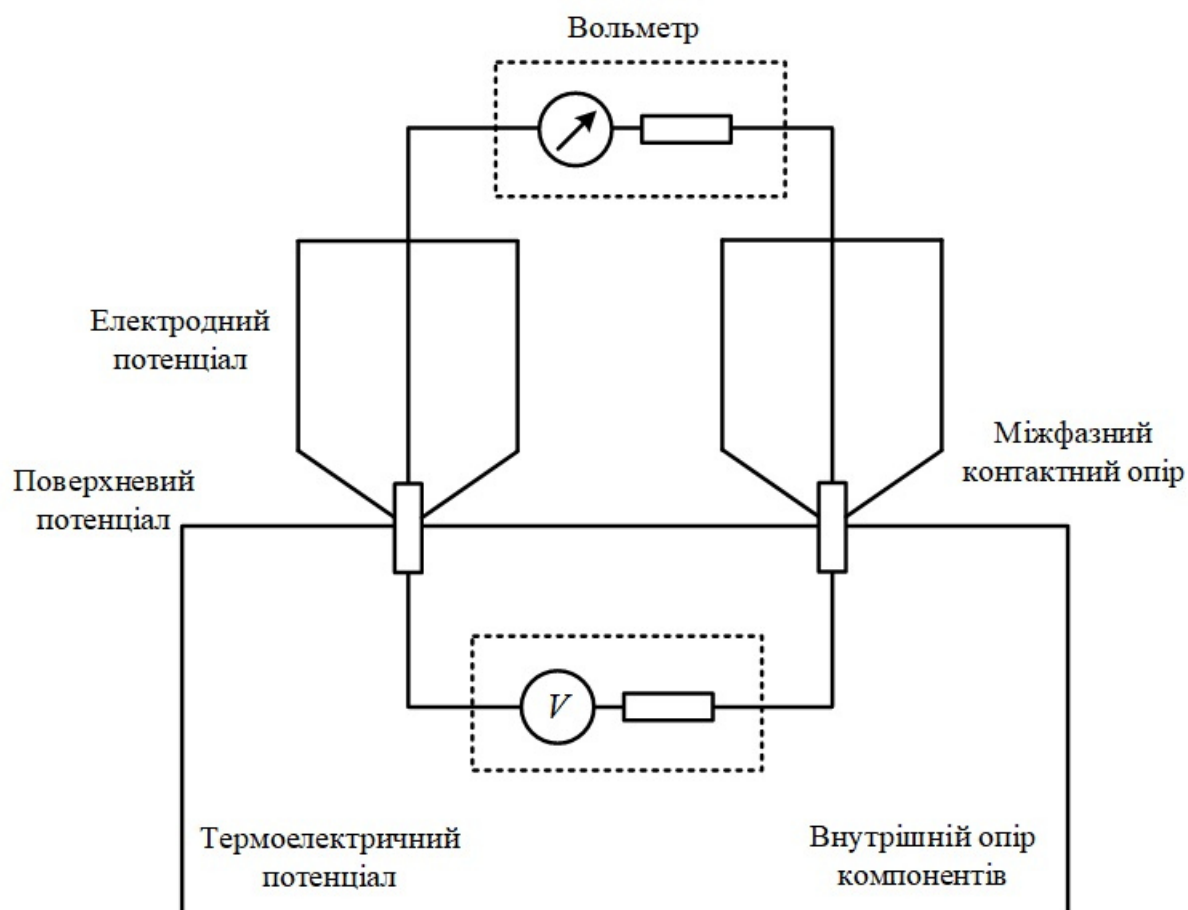


Рисунок 2.3 – Схематехнічна реалізація процедури вимірювання падіння напруги

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Під час аналізу результатів попередніх досліджень виявлено, що необхідно застосовувати електроди, у яких конструктивне виконання забезпечує одержання еквівалентної характеристики термо-е.р.с. від поверхні об'єкта досліджень. Якщо застосувати таке конструктивне виконання електрода, то схема електродного блока буде матиме в своєму складі джерела термо-е.р.с., які підключено паралельно щодо спільного навантаження. Для оцінки характеристик і параметрів еквівалентного джерела потрібно розробити математичну модель та виконати її дослідження.

3.1 Розробка методики розрахунку еквівалентного джерела

Схеми для розрахунку характеристик і параметрів еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного включення двох джерел термо-е.р.с. наведено на рис. 3.1. На рис. 3.1, а наведено еквівалентну схему для двох джерел термо-е.р.с., що підключено паралельно, на рис. 3.1, б та на рис. 3.1, в наведено еквівалентні схеми для визначення сили струму від першого джерела термо-е.р.с. та другого.

Розрахунок сили електричного струму для двох з'єднаних джерел термо-е.р.с., що підключені паралельно, здійснюється методом суперпозиції. Сила електричного струму в замкнутому колі від першого джерела термо-е.р.с. (див. рис. 3.1, б) визначається зі співвідношення:

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_H \cdot R_{BH2}}{R_H + R_{BH2}} + R_{BH1}}, \quad (3.1)$$

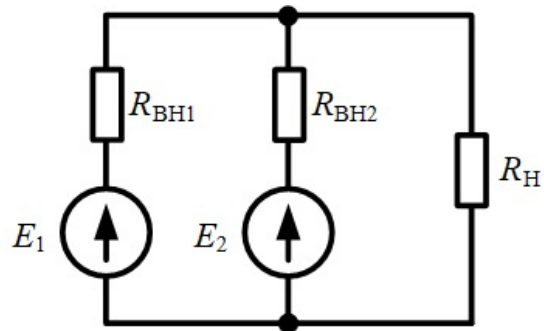
де E_1 – термо-е.р.с. від першого джерела;

I_1 – сила електричного струму від першого джерела термо-е.р.с.;

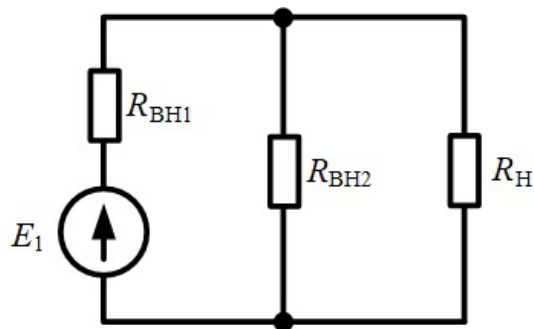
R_H – опір навантаження;

R_{BH1} – внутрішній опір першого джерела термо-е.р.с.;

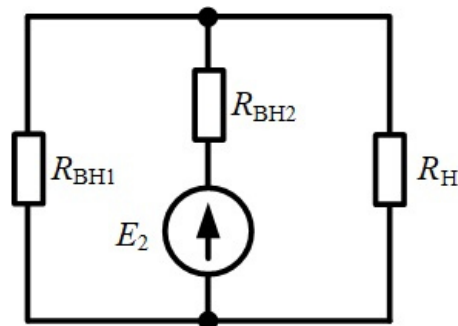
R_{BH2} – внутрішній опір другого джерела термо-е.р.с.



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Схема заміщення джерела термо-е.р.с.: паралельне підключення двох джерел термо-е.р.с. (а); схема для розрахунку сили електричного струму від першого джерела термо-е.р.с. (б); схема для розрахунку сили електричного струму від другого джерела термо-е.р.с. (в)

Величину сили електричного струму в замкнутому колі другого джерела термо-е.р.с. (див. рис. 3.1, в) можна визначити за співвідношенням:

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_H \cdot R_{BH1}}{R_H + R_{BH1}} + R_{BH2}}, \quad (3.2)$$

де E_2 – термо-е.р.с. другого джерела;

I_2 – сила електричного струму від другого джерела термо-е.р.с.

Результуюча сила електричного струму визначається як сума сил електричних струмів від кожного з джерел термо-е.р.с.:

$$I_p = I_1 + I_2. \quad (3.3)$$

Величину падіння напруга еквівалентного джерела термо-е.р.с. можна визначити через силу електричного результуючого струму, який протікає через внутрішній опір цього еквівалентного джерела:

$$E_{ЕКВ} = R_{BH} \cdot I_p, \quad (3.4)$$

де R_{BH} – внутрішній опір еквівалентного джерела термо-е.р.с.;

I_p – сила електричного результуючого струму еквівалентного джерела термо-е.р.с.

Результуючий внутрішній опір еквівалентного джерела термо-е.р.с. визначається як паралельне з'єднання внутрішніх опорів кожного з джерел термо-е.р.с.:

$$R_{BH} = \frac{R_{BH2} \cdot R_{BH1}}{R_{BH2} + R_{BH1}}. \quad (3.5)$$

Якщо застосовувати наведену методику, то можна розрахувати силу електричного струму, а також величину внутрішнього опору еквівалентного джерела термо-е.р.с., що має будь-яку кількість джерел термо-е.р.с., що підключені паралельно.

3.2 Розробка моделі вимірювального термоелектричного перетворювача

Під час розробки математичної моделі як базову схему використано ту, що має в своєму складі декілька джерел термо-е.р.с., які підключено паралельно щодо спільного навантаження (див. рис. 3.2). Ця схема показує контакт, який складається з багатьох точок. Кожна зі зазначених точок контакту утворює джерело термо-е.р.с.. Під час цього, з обліком неоднорідності за фазовим і хімічним складом поверхні об'єкту дослідження, характеристики та параметри джерел термо-е.р.с. можуть бути або однаковими, або різними.

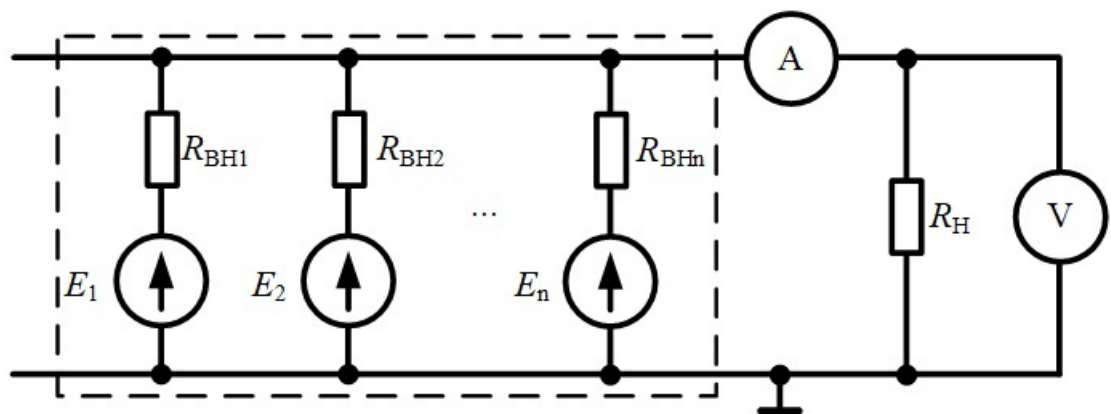


Рисунок 3.2 – Схема заміщення під час дії контакту, що має багату кількість точок об'єкта дослідження з електродом:

$R_{BH1}, R_{BH2}, \dots, R_{BHn}$ – внутрішні опори джерел термо-е.р.с;

$E_1, E_2, \dots, E_n$ – джерела термо-е.р.с.

У математичні моделі здійснюється розрахунок сили електричних струмів від кожного з джерел термо-е.р.с. на базі методу накладання для однотипних

джерел напруги [16]:

$$I = \frac{E}{\frac{1}{(n-1) \cdot \frac{1}{R_{\text{BH}}} + \frac{1}{R_{\text{H}}}} + R_{\text{BH}}}, \quad (3.6)$$

де E – джерело термо-е.р.с.;

n – кількість джерел термо-е.р.с.;

R_{H} – опір навантаження;

R_{BH} – внутрішній опір джерела термо-е.р.с.;

I – сила електричного струму від джерела термо-е.р.с.

Якщо до складу еквівалентної схеми входять різні типи джерел, то потрібно здійснювати облік відмінності їх характеристик:

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{1}{n_2 \cdot \frac{1}{R_{\text{BH2}}} + (n_1 - 1) \cdot \frac{1}{R_{\text{BH1}}} + \frac{1}{R_{\text{H}}}} + R_{\text{BH1}}}; \quad (3.7)$$

$$I_2 = \frac{E_1}{\frac{1}{(n_2 - 1) \cdot \frac{1}{R_{\text{BH2}}} + n_1 \cdot \frac{1}{R_{\text{BH1}}} + \frac{1}{R_{\text{H}}}} + R_{\text{BH2}}}; \quad (3.8)$$

де E_1 та E_2 – перший та другий тип джерел термо-е.р.с.;

n_1 та n_2 – кількість першого та другого типу джерел термо-е.р.с.;

R_{H} – опір навантаження;

R_{BH1} та R_{BH2} – внутрішні опори першого та другого типу джерел термо-е.р.с.;

I_1 та I_2 – сили електричного струму від першого та другого типу джерел термо-е.р.с.

Сила електричних струмів, що протікають через опір навантаження I_{H1} , від першого та другого типів джерел термо-е.р.с.:

$$I_{H1} = \frac{E_1 - R_{BH1} \cdot I_1}{R_H}; \quad (3.9)$$

$$I_{H2} = \frac{E_2 - R_{BH2} \cdot I_2}{R_H}. \quad (3.10)$$

Сила електричного струму, що протікає через опір навантаження, визначається як:

$$I_H = \sum_{i=1}^{n_2} I_{H2_i} + \sum_{i=1}^{n_1} I_{H1_i}. \quad (3.11)$$

Падіння напруги на навантаженні дорівнює:

$$U_H = R_H \cdot I_H. \quad (3.12)$$

3.3 Розробка інтерфейсу програмного забезпечення математичної моделі перетворювача

Під час виконання випускної кваліфікаційної роботи розроблено та створено програмну компоненту, за допомогою якої визначається значення термо-е.р.с. сплавів металів. Програмну компоненту розроблено в пакеті прикладних програм NI LabVIEW. Зі застосуванням програмної компоненти здійснюється розрахунок характеристик і параметрів еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного включення великої кількості різних типів джерел термо-е.р.с., у яких може бути однакові або різні параметри.

Програмна компонента виконує розрахунок та виведення характеристик і параметрів, що застосовуються під час аналізу. До складу інтерфейсу (див. рис. 3.3 – 3.7) входять п'ять вкладок, в яких виконується різні функціонали.

У вкладці Read здійснюється запуску файлу з бази, що наведено на рис. 3.3, а. У базі розміщено результати експериментальних досліджень джерел термо-е.р.с. (сили електричних струмів та внутрішні опори джерел термо-е.р.с. одинадцяти значень опору навантаження під час дії температур: 300°C, 200°C та 100°C.

У полі Temp Database можна вказати тимчасовий файл, який знаходиться в базі, де здійснюється тимчасове зберігання поточних вимірювальних значень. Ці данні застосовуються для розрахунку характеристик і параметрів еквівалентного джерела термо-е.р.с.

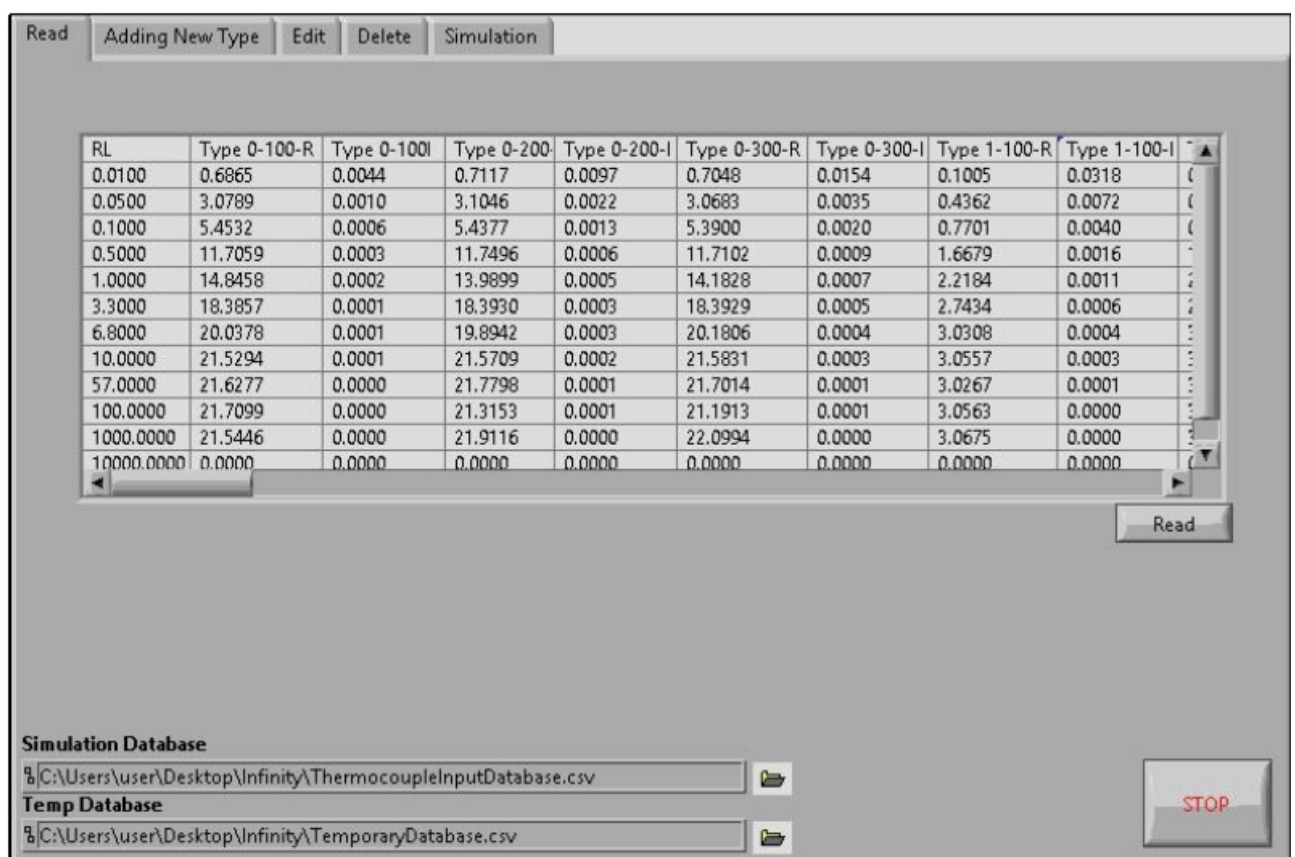


Рисунок 3.3 – Інтерфейс програмної компоненти, зовнішній вигляд вкладки «Read»

Вкладка «Adding New Type» розробленої програмної компоненти застосовується для служить для добавлення нового джерела термо-е.р.с.. Зовнішній вигляд вкладки EPC «Adding New Type» наведено на рис. 3.4.

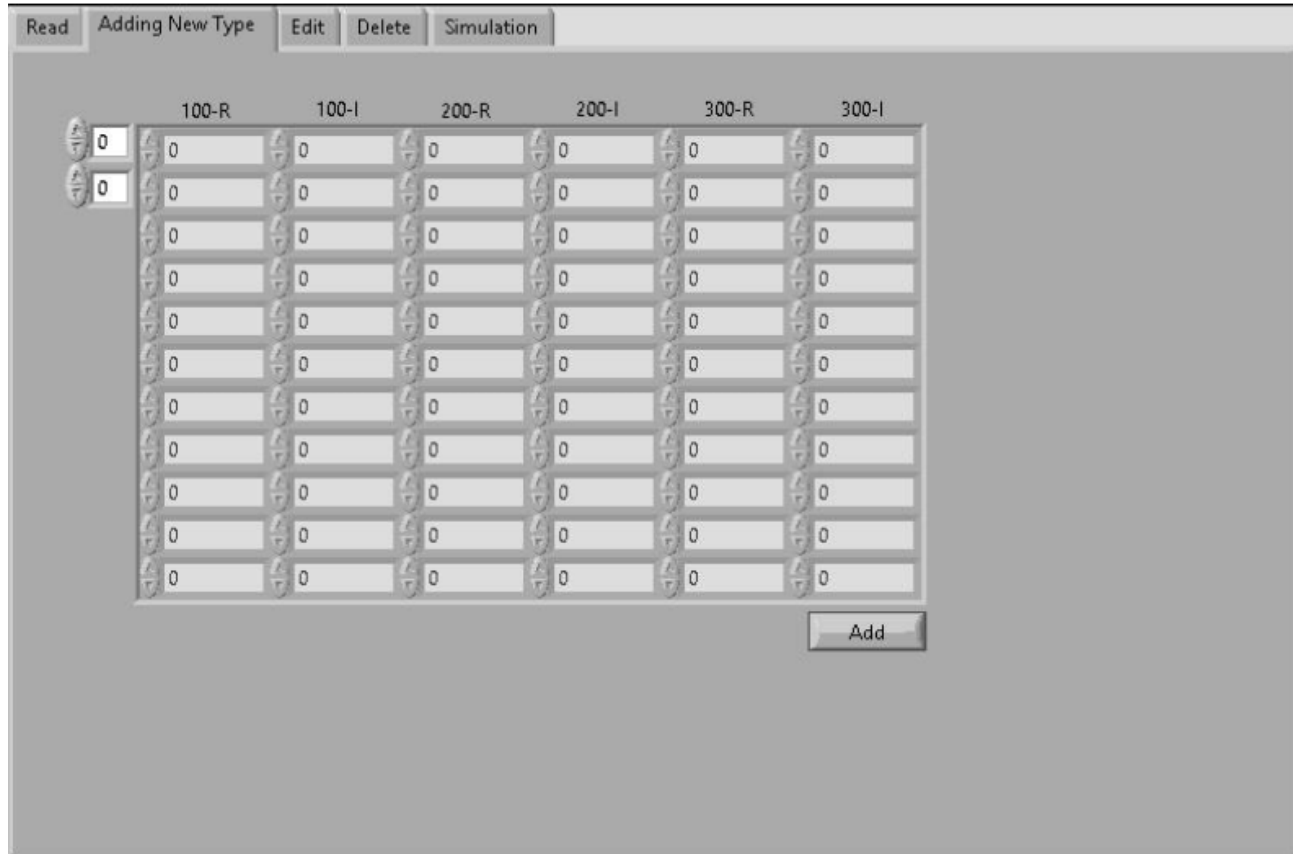


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програмної компоненти, зовнішній вигляд вкладки «Adding New Type»

Вкладка «Edit» розробленої програмної компоненти застосовується для здійснення редагування початкових значень, які знаходяться в базі даних, для виправлення помилок. Зовнішній вигляд вкладки EPC «Edit» наведено на рис. 3.5.

Вкладка «Delete» розробленої програмної компоненти використовується для видалення останніх шести стовбців, що нещодавно додані як вхідні дані джерела термо-е.р.с. Зовнішній вигляд вкладки «Delete» розробленої програмної компоненти представлено на рис. 3.6.

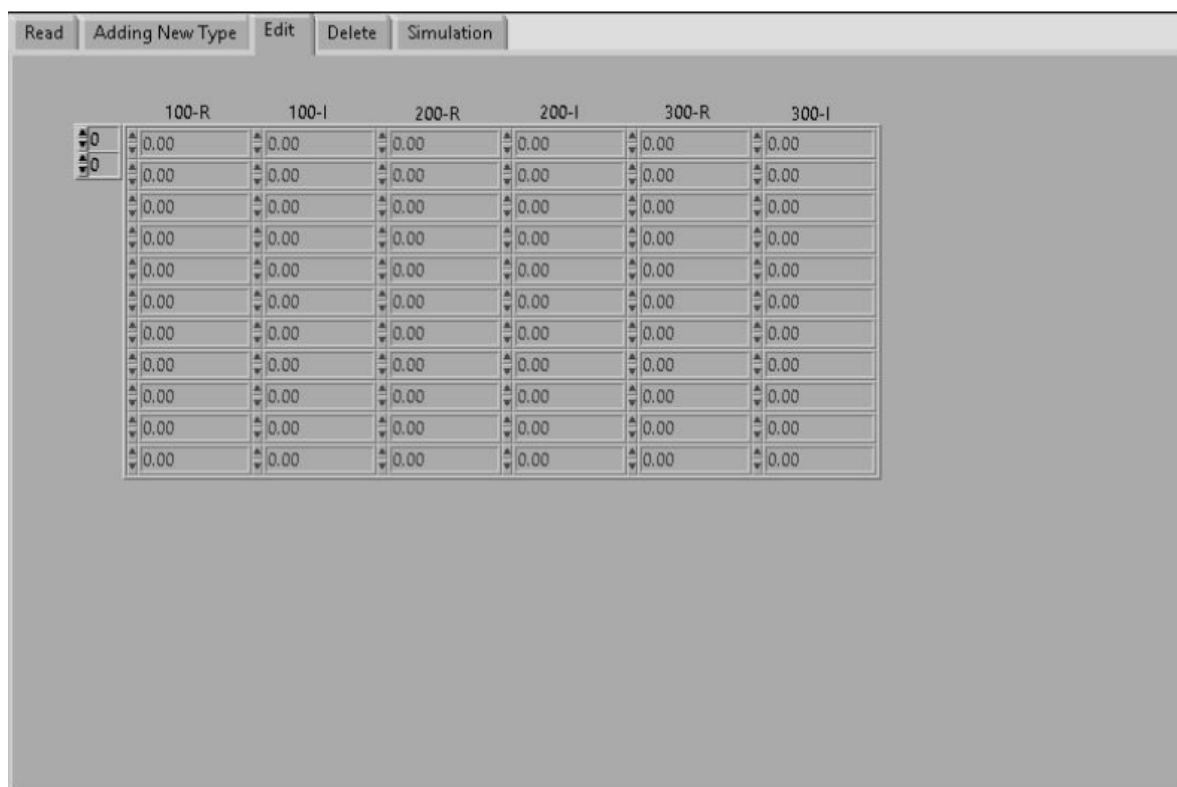


Рисунок 3.5 – Інтерфейс програмної компоненти, зовнішній вигляд вкладки «Edit»

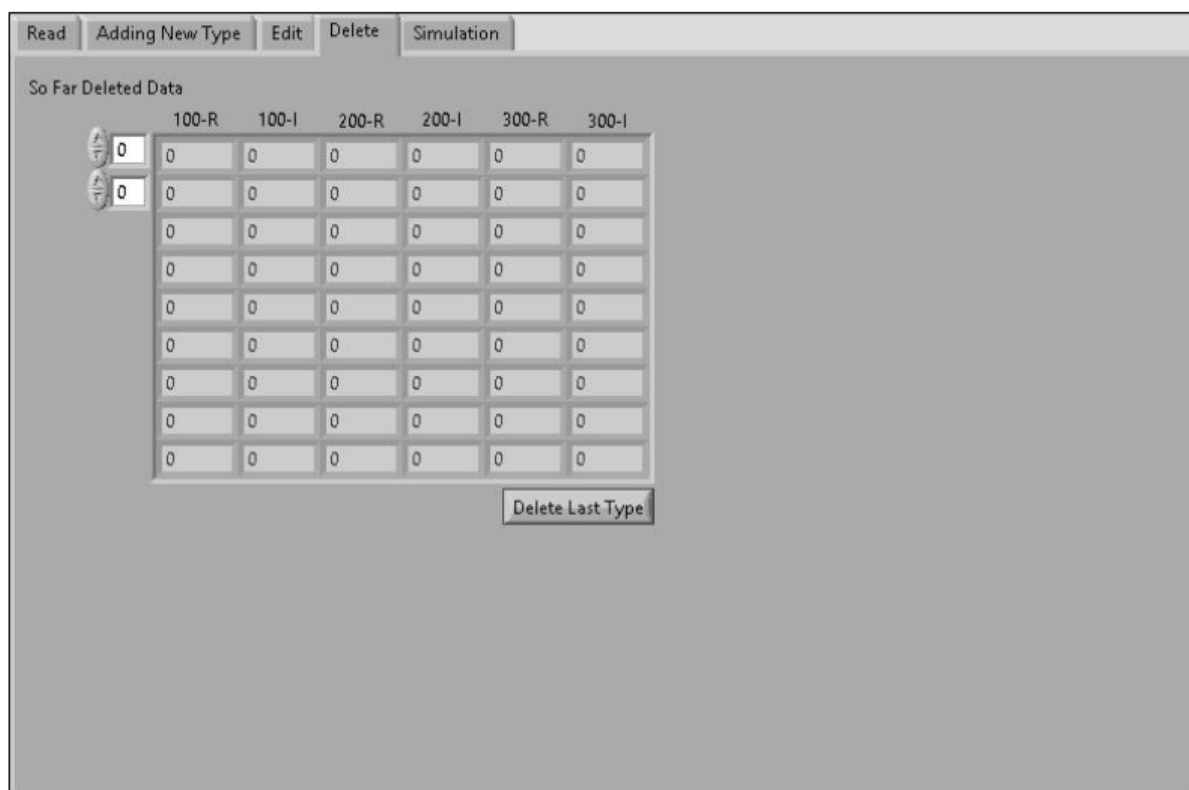


Рисунок 3.6 – Інтерфейс програмної компоненти, зовнішній вигляд вкладки «Delete»

У вкладці Simulate здійснюється розрахунок та виведення результатів. Simulate має наступні функціональні кнопки: «Temperature» для завдання величини температури, «Number of type X» здійснює вибір необхідної кількості джерел термо-е.р.с., дослідження яких необхідно здійснювати.

Після завершення процедури налаштування у відповідності з умовами проведення досліджень програмна компонента виводить розраховані значення вихідних даних: залежність зміни падіння напруги на навантаженні «VL», сили електричного струму, величини внутрішнього опору, а також еквівалентного значення термо-е.р.с. від величини опору навантаження «RL» (див. рис.3.7). Кнопка «Add» застосовується для додавання нових даних до попередньо виконаних розрахунків. Кнопка «Simulate» застосовується для здійснення запуску програми. Результати математичного моделювання можуть зберігатися в тимчасовому файлі, який прописується у вкладці «Read». У полі «Report» виводиться кількість термопар, яку було застосовано в процесі розрахунку.

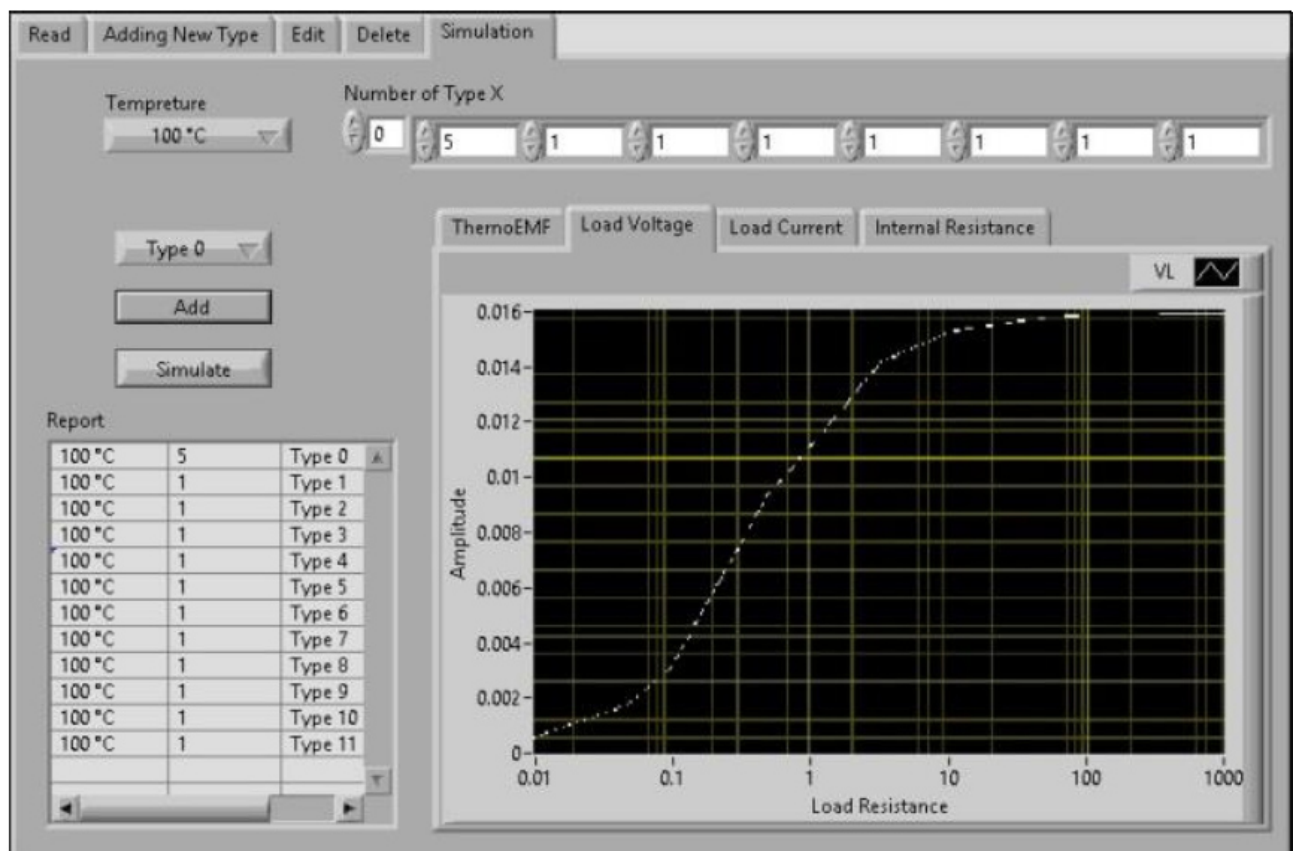
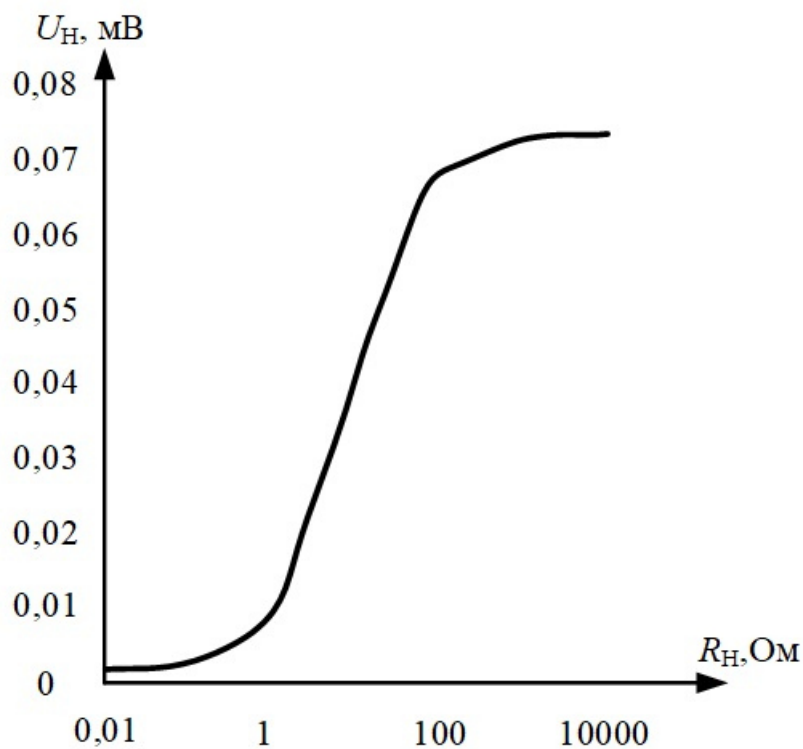


Рисунок 3.7 – Інтерфейс програмної компоненти, зовнішній вигляд вкладки «Simulate»

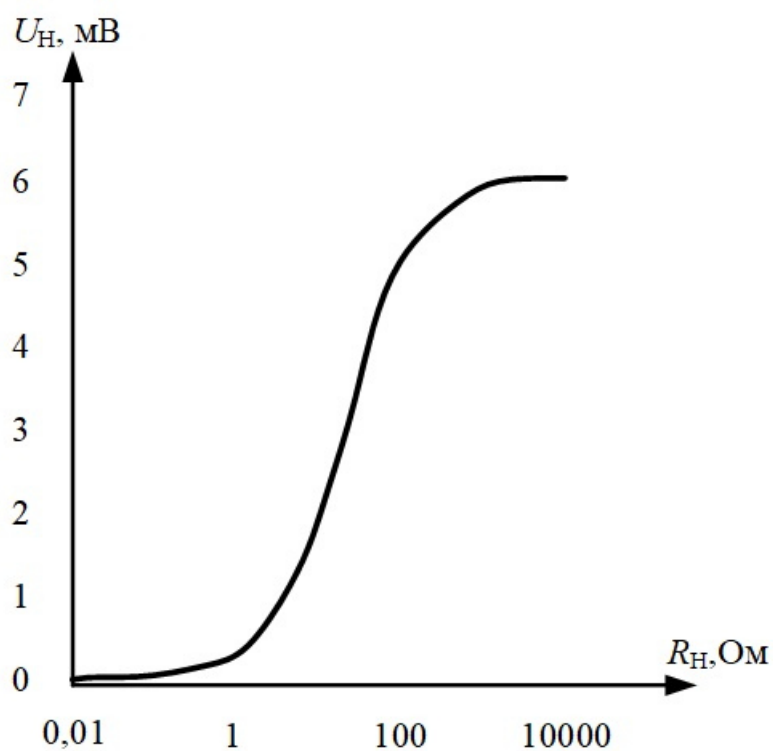
3.4 Результати досліджень еквівалентного джерела під час застосування багатоточкового контакту

Математичне моделювання можливих випадків необхідно здійснювати для вивчення можливих ситуацій, що виникають через різні характеристики та параметри джерел термо-е.р.с. на поверхні об'єкта дослідження під час дії багатоточкового контакту поверхні об'єкта та електродів. Під час виконання випускної кваліфікаційної роботи виконано дослідження: хромель-алюмель, мідь-ніхром і мідь-константан, на основі яких синтезовано 10 нових джерел термо-е.р.с., що мають різні характеристики. Кожне з наступних джерел термо-е.р.с. відрізнявся на 10 % від попереднього. Зазначений розподіл характерний для об'єктів дослідження виробів, які зазнали пластичної деформації.

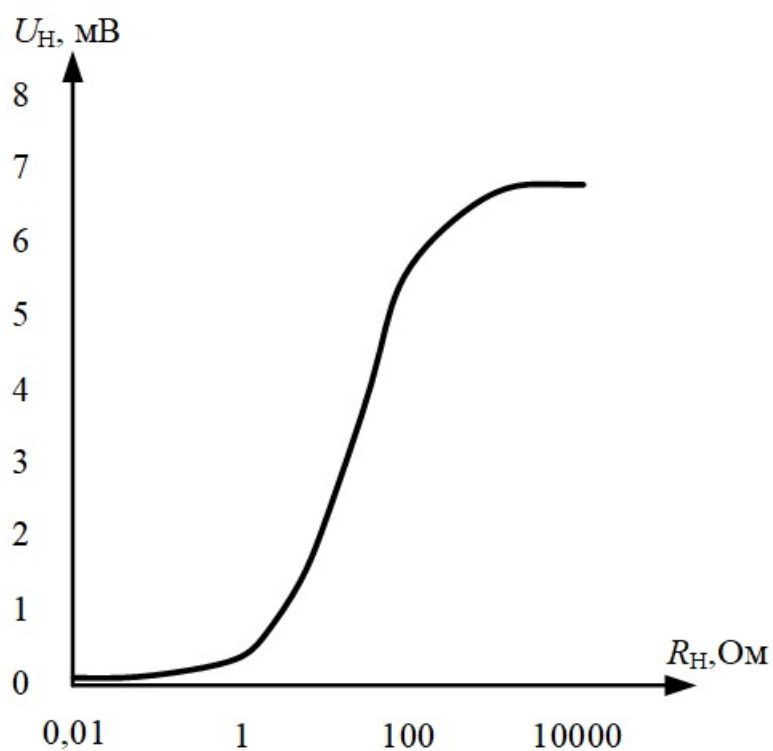
Характеристики окремих джерел термо-е.р.с. наведено на рис. 3.8: мідь-ніхром (див. рис. 3.8, а), хромель-алюмель (див. рис. 3.8, б) та мідь-константан (див. рис. 3.8, в).



а)



б)

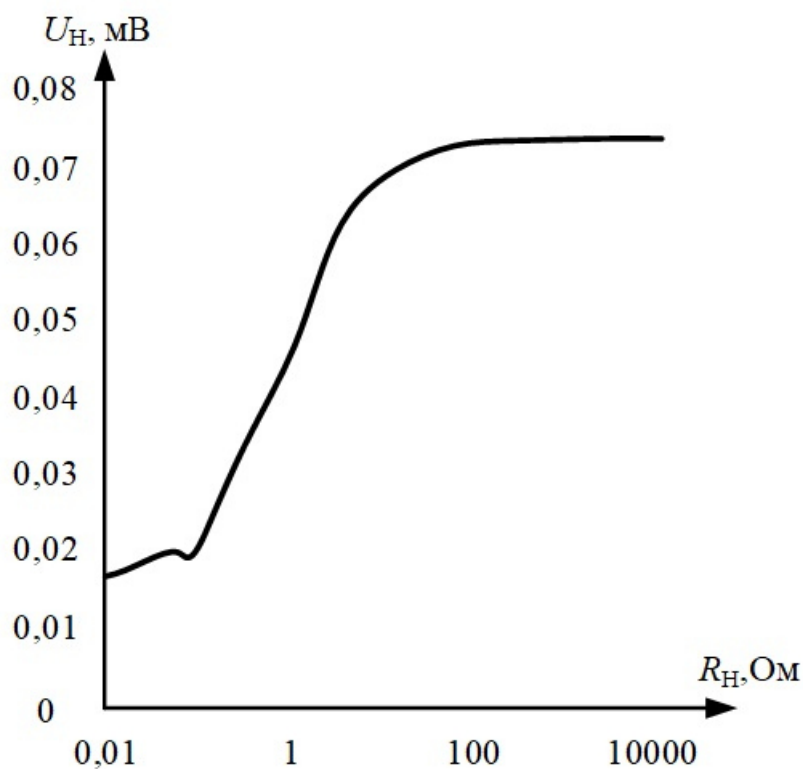


в)

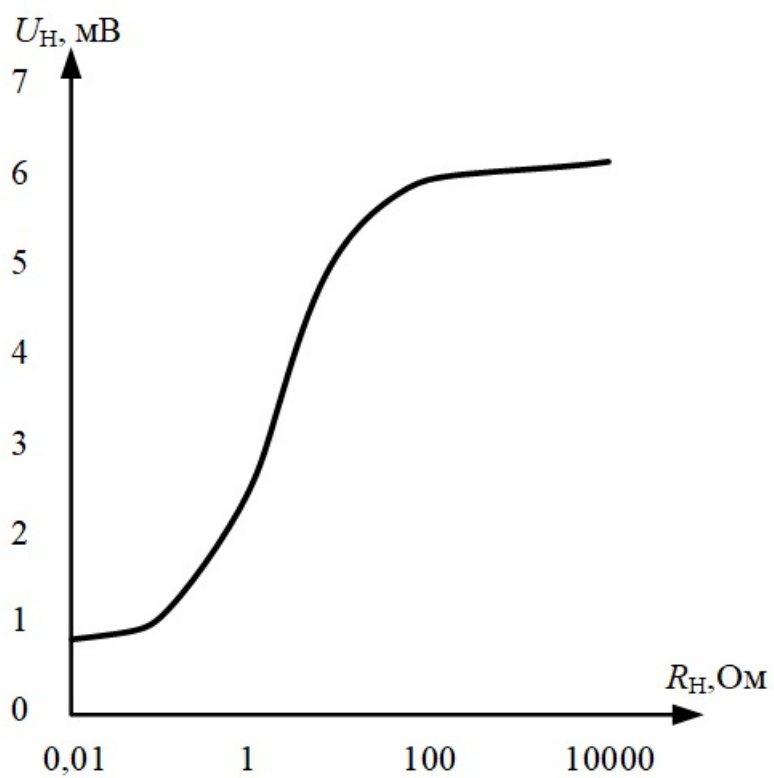
Рисунок 3.8 – Характеристики окремих джерел термо-е.р.с.: мідь-ніхром (а), хромель-алюмель (б) та мідь-константан (в)

Результати математичного моделювання визначення падіння напруги на навантаженні під час паралельного включення одинадцяти однотипних джерел термо-е.р.с.: мідь-ніхром, хромель-алюмель та мідь-константан, представлено на рис. 3.9. Під час аналізу отриманої залежності можна зробити висновок, що залежність змінюється тільки під час дії низького значення опорів навантаження, що має місце зі збільшенням сили електричного струму від еквівалентного джерела термо-е.р.с. та зі зменшенням значення його внутрішнього опору.

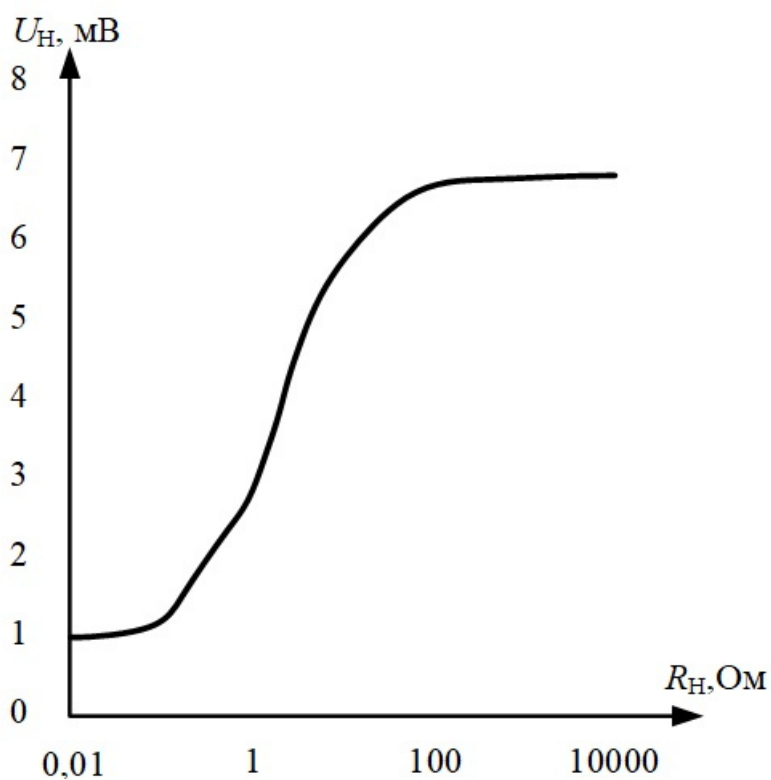
Під час здійснення легування заліза, яке входить до складу сплаву утворюються карбіди (див. рис. 3.10), у яких дещо інші термоелектричні властивості порівняно зі залізом. Отже, під час вимірювання зі застосуванням термоелектричного методу у точках контакту між об'єктом дослідження та електродом, утворюється два різні типи джерел термо-е.р.с., одне обумовлено залізом, а інше – карбідом. Величина еквівалентної термо-е.р.с. визначається як паралельне з'єднання двох різних типів джерел термо-е.р.с.



a)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Результати математичного моделювання характеристики
одинадцяти джерел термо-е.р.с. одного типу:
мідь-ніхром (а), хромель-алюмель (б) та мідь-константан (в)

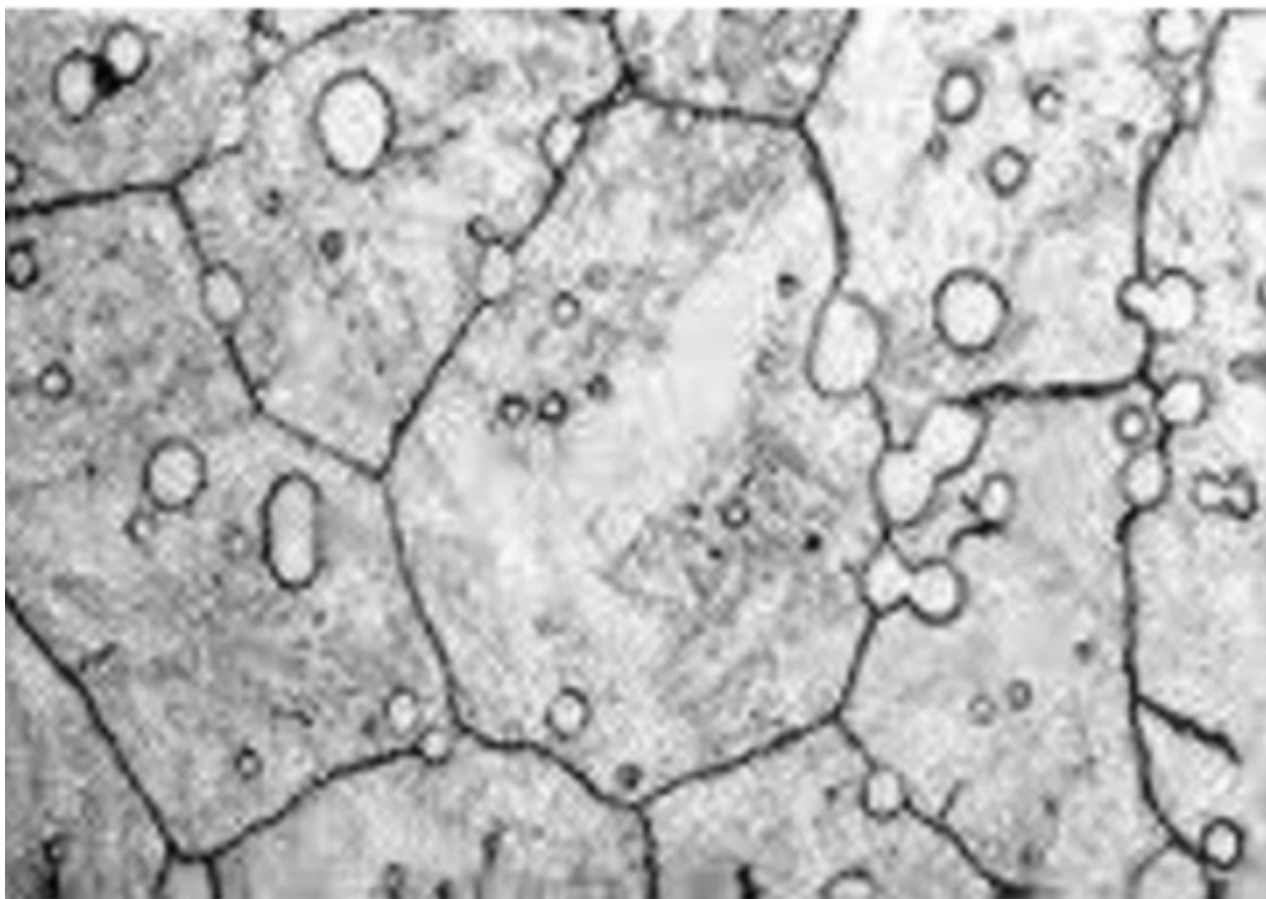


Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд карбідів, які утворюються в легованій сталі

Кількість джерел термо-е.р.с., що використовується під час математичного моделювання, залежить як від геометричних розмірів вимірювальних електродів, так і від шорсткості поверхні електродів та об'єкту дослідження. Значення карбідної фази може суттєво змінюватись в межах від 5 до 30 % від площі поверхні об'єкта дослідження, а також залежить від ступеня легування отриманої сталі.

Тому необхідно виконувати облік термоелектричних параметрів і характеристики різних типів хімічної сполуки, які розташовано на поверхні об'єкта дослідження. Це необхідно здійснювати для досліджень з високої повторюваності результатів вимірювання. Аналіз результатів досліджень вказує на те, що має місце однаковий характер падіння напруги на навантаженні під час дії різних типів джерел термо-е.р.с.

3.5 Висновки

Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик різних типів джерел термо-е.р.с. Під час аналізу результатів досліджень виявлено, що істотно впливає зміна опору навантаження на величину внутрішнього опору та зміну потужності джерела термо-е.р.с.

Розроблено інженерну методику розрахунку характеристик і параметрів еквівалентного джерела під час паралельного включення різних типів джерел термо-е.р.с. зі застосуванням методу накладання.

Запропоновано математичну модель для розрахунку характеристик і параметрів еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного підключення великої кількості різних джерел термо-е.р.с.

Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного підключення великої різної кількості різних типів джерел термо-е.р.с.

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ У СПЛАВАХ МЕТАЛІВ

4.1 Розробка структури системи контролю дефектів

Для виконання експериментальних досліджень термоелектричних характеристик і параметрів сплавів металів потрібно розробити електронну інформаційно-вимірювальну систему. Система повинна мати в своєму складі термокамеру, в якій необхідно підтримувати значення температури в діапазоні від $+25$ до $+400^{\circ}\text{C}$ з величиною похибки $\pm 1^{\circ}\text{C}$; вольтметр, який виконує високоточні вимірювання постійної напруги; магазин опорів, який застосовується для здійснення досліджень під час зміни величини постійної напруги термо-е.р.с. на різні значення опорів; персональний комп'ютер з розробленою програмною компонентною, зі застосуванням якого виконується управління в реальному часі роботою термокамери для вимірювання зміни її параметрів, а також виведення на індикацію величини падіння напруги термо-е.р.с.

Електронна інформаційно-вимірювальна система повинна виконувати дослідження отриманої експериментальної залежності зміни падіння напруги термо-е.р.с. від опору, що має місце під час нагрівання до визначених температур вимірювальних електродів. Результати вимірювання зміни падіння напруги, значення температур опорів навантаження та вимірювальних електродів повинні надходити до комп'ютера, який виводиться на монітор отримані графічні результати, а також зберігання їх числових значень до бази. За результатами виконаних експериментальних вимірювань проводиться розрахунок величин потужності джерела термо-е.р.с. та внутрішнього опору.

Для вибору необхідного хімічного складу електродів, що використовуються в інформаційно-вимірювальній системі термоелектричного контролю, які повинні здійснювати в реальному часі неруйнівний контроль,

потрібно провести додаткові дослідження характеристик і параметрів електродів. Необхідно визначити залежність зміни падіння напруги термо-е.р.с. від температури електродів під час їх нагрівання, а також від зміни опору навантаження. Для проведення цього типу досліджень необхідно використати термокамеру, високоточний вольтметр та магазин опорів.

Під час проведення попередніх досліджень встановлено, що під час випробувань об'єктів, які мають доволі значну величину постійної часу нагрівання, необхідно чекати значний проміжок часу для встановлення в термічній камері необхідної величини температури. Отже, потрібно автоматизувати зазначений процес шляхом передачі базових операцій контролеру або комп'ютеру. Комп'ютер практично синхронно здійснювати зчитувати вимірювальних даних від каналів електронної системи та забезпечує зберігати цих даних до бази з подальшими можливостями їх аналізу.

Електронна інформаційно-вимірювальна система повинна виконувати вимірювання значень падіння напруги на електродах при різних значеннях опорів та зміні температури. Значення опорів навантаження необхідно змінювати для того, щоб визначити величину внутрішнього опору джерела, а також потрібно визначити величину впливу від змін опору контактів електродів зі зразком, що істотно впливає на результати вимірювання. Електронна інформаційно-вимірювальна система складається з термокамери, магазину опорів, високоточного вольтметра, блок управління комп'ютера. За допомогою електронної системи можна виконувати дослідження зміни падіння напруги на електродах від опору навантаження під час дії різної температури в термокамері. Результати вимірювання щодо зміни падіння напруги, опору навантаження й температури надходять до комп'ютера, який формує графічні залежності на моніторі, а також зберігає числові значення результатів експериментів до бази. За результатами експериментальних досліджень виконується визначення величин потужності джерела термо-е.р.с. та внутрішнього опору.

Структурну схему електронної системи вимірювального термоелектричного контролю дефектів у сплавах металів представлено на рис. 4.1, до складу системи входять такі блоки та вузли:

- термокамера;
- блоку управління роботою термокамери;
- високоточний цифровий вольтметр;
- магазину опорів, який має номінальні значення 1 МОм, 100 кОм, 10 кОм, 1 кОм, 100 Ом, 10 Ом, 1 Ом, 0,1 Ом;
- комп'ютер.

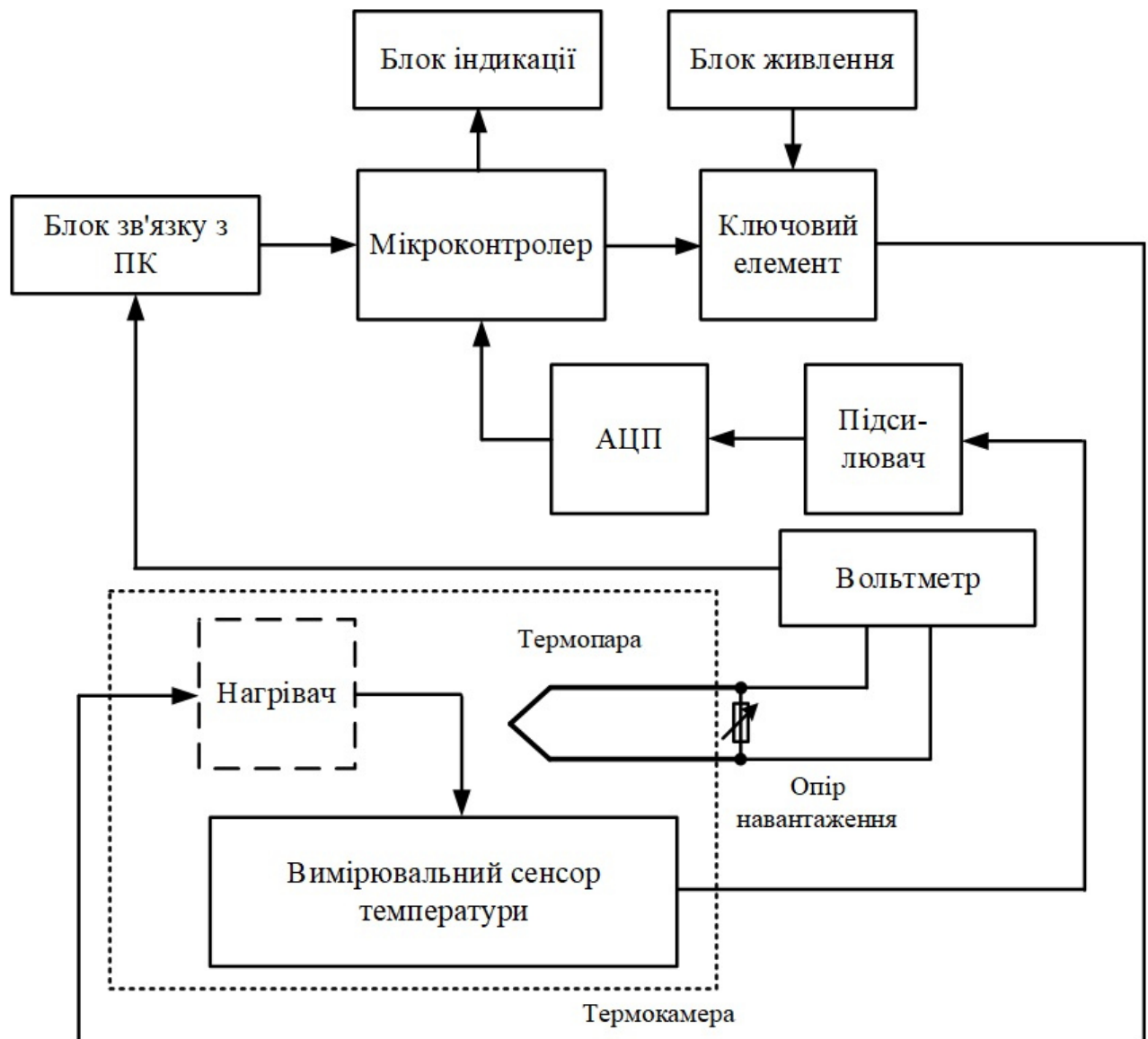


Рисунок 4.1 – Структурна схема електронної системи вимірювального термоелектричного контролю дефектів у сплавах металів

Термо-е.р.с. вимірювальних електродів представлено на структурній схемі у вигляді джерела напруги E , у якого має місце внутрішній опір $R_{\text{вн}}$. Вимірювальний електрод розташовано в термокамері, за допомогою якої виконується зміна температури в межах від $+25^{\circ}\text{C}$ до $+400^{\circ}\text{C}$. Для стабілізації значення температури холодного спаю його розташовують в ємності зі льодом. Лід отримано з дистильованої води, що дозволяє отримати величину температури холодного спаю приблизно 0°C . Від джерела термо-е.р.с. протікає електричний струм у замкнутому колі, в якому присутнє джерело термо-е.р.с., його розподілений внутрішній опір, а також опір навантаження. Зі застосуванням мілівольтметра вимірюється величина падіння напруги на опорі навантаження, ці вимірювальні данні передаються до комп'ютера.

Величину падіння напруги вимірюють зі застосуванням високоточного цифрового вольтметра Rigol типу DM3068 [17]. Зазначений вольтметр забезпечує вимірювання падіння напруги на термо-е.р.с. в реальному часі з високими метрологічними показниками. До однієї з головних переваг цього вольтметра відносять те, що управління його функціоналом можна виконувати зі застосуванням програмної компоненти PC UltraSensor, яку необхідно інсталювати на комп'ютер. Зазначена програмна компонента виводить на екран комп'ютера передню панель цього вольтметра з цифровим дисплеєм. Результати вимірювання падіння напруги зберігаються у вигляді файлу на одному з дисків комп'ютера.

4.2 Розробка системи керування характеристиками та параметрами теплової камери

Блок керування термокамерою складається з датчика температури, електронного підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, контролера, елементів переключення. Знімання вимірювальної інформації від датчика температури, що розташовано в термокамері, виконується з періодом $0,01$ с. За

отриманими результатами контролер здійснює формування сигналів керування ключовим елементом. Контролер з'єднано з комп'ютером, який виконує запис вимірювальної інформації під час експериментальних досліджень. Після генерування сигналу на керування нагрівального елемента від комп'ютера блоку керування термокамерою, контролер формує сигнал на ключовий елемент. Початок утворення зазначеного сигналу керування синхронізований з нулем напруги живлення, а зміна тривалості відбувається з періодом 0,01 с, коли має місце перехід змінної напруги мережі через нульове значення. До складу блоку керування роботою термокамери входить ПІД-регулятор. Закон керування зазначеного регулятора можна описати як суму складових компонентів керуючих впливів:

$$U_{\text{під}} = U_{\text{п}}(t) + U_{\text{і}}(t) + U_{\text{д}}(t), \quad (4.1)$$

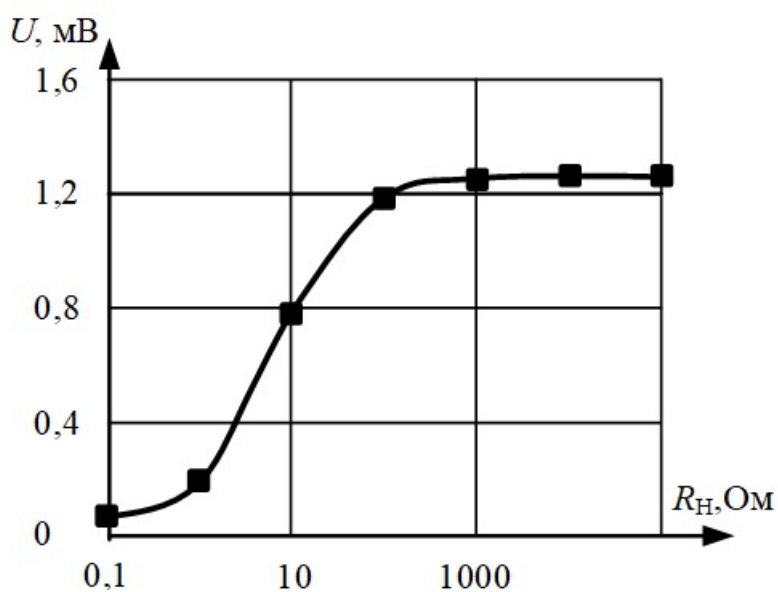
де $U_{\text{д}}(t)$ – диференціальна компонента закону;

$U_{\text{і}}(t)$ – інтегральна компонента закону;

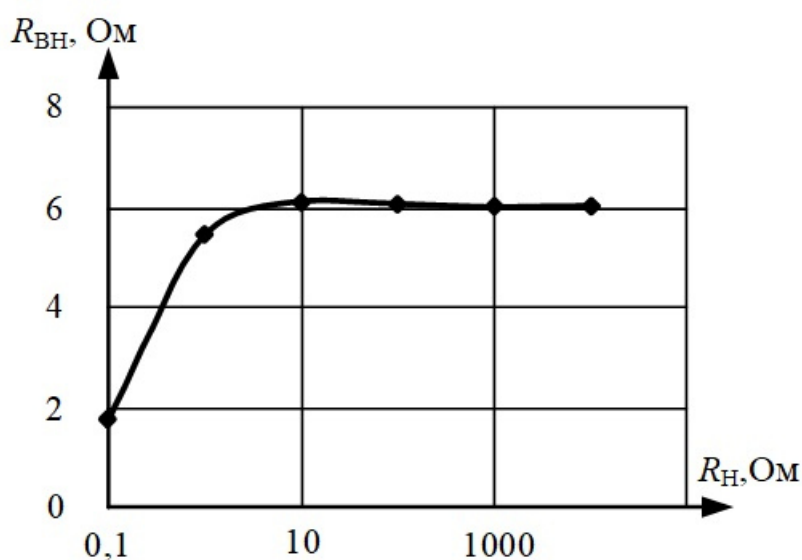
$U_{\text{п}}(t)$ – пропорційна компонента закону.

Для визначення зазначених складових регулятора використовуються вимірювальна інформація від датчика температури. При встановленні потрібного значення температури в регуляторі є незначений процес перерегулювання, який характеризується коливаннями затухаючого типу. Максимальне значення амплітуди зазначеного процесу перерегулювання складає не більше 7 %. Отримання вимірювальних даних від вольтметра має місце, якщо значення перерегулювання складає не більше 0,5%. При передачі вимірювальних даних від високоточного вольтметра виконується їх фіксація, коли в термокамері встановлюється необхідна температура. Під час позитивної величини похідної за температурою в часом, а також при її зменшенні, що відбувається, якщо має місце негативна величина похідної за температурою в часі. Цей процес повторюється декілька циклів та визначається середнє

значення температури, яка й заноситься в базу. Вимірювання величини падіння напруги виконується для різних опорів. Контролер послідовно перемикає реле, що забезпечує підключення різних величин опору. Вимірювальні данні наведено на рис. 4.2, якщо величина температури становить $+200^{\circ}\text{C}$. Під час встановлення різних температури отримують сімейство характеристик для різних джерел термо-е.р.с.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Зміна падіння напруги на опорі (а) та внутрішнього опору джерела (б) від перемикання опору на навантаженні

За результатами вимірювання визначають величину опору джерела термо-е.р.с.:

$$R_{\text{BH}} = \frac{U_{\text{XX}} - U_{\text{RH}}}{U_{\text{RH}}} \cdot R_{\text{H}}, \quad (4.2)$$

де U_{XX} – величина падіння напруги, якщо має місце ненавантажений стан;

U_{RH} – падіння напруги на опорі навантаження, значення якої вимірюється зі застосуванням високоточного вольтметр;

R_{H} – величина опору навантаження, значення якої вибирається магазином опорів.

Зміна величини внутрішнього опору джерела напруги від опору наведено на рис. 4.2, б. На базі отриманих вимірювальних даних визначається залежність зміни внутрішнього опору джерела термо-е.р.с. від сили електричного струму:

$$R_{\text{BH}} = \frac{U_{\text{XX}} - U_{\text{RH}}}{I} \quad (4.3)$$

а також величина розсіяної потужності на опорі навантаження:

$$P = I^2 \cdot R_{\text{H}} = \frac{U_{\text{RH}}^2}{R_{\text{H}}}, \quad (4.4)$$

де I – сила електричного струму в замкненому колі.

Функціональна залежність зміни величини внутрішнього опору від сили електричного струму наведено на рис. 4.3, а функціональна залежність зміни електричної розсіяної потужності на опорі навантаження, від зміни опору представлено на рис. 4.4.

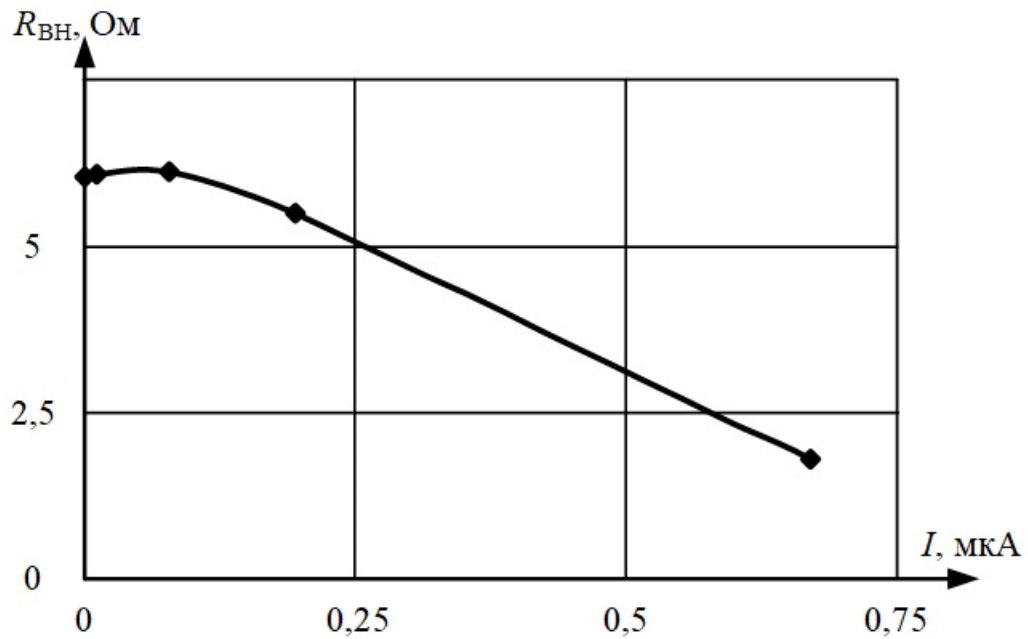


Рисунок 4.3 – Функціональна залежність внутрішнього опору від зміни сили електричного струму в замкненому колі

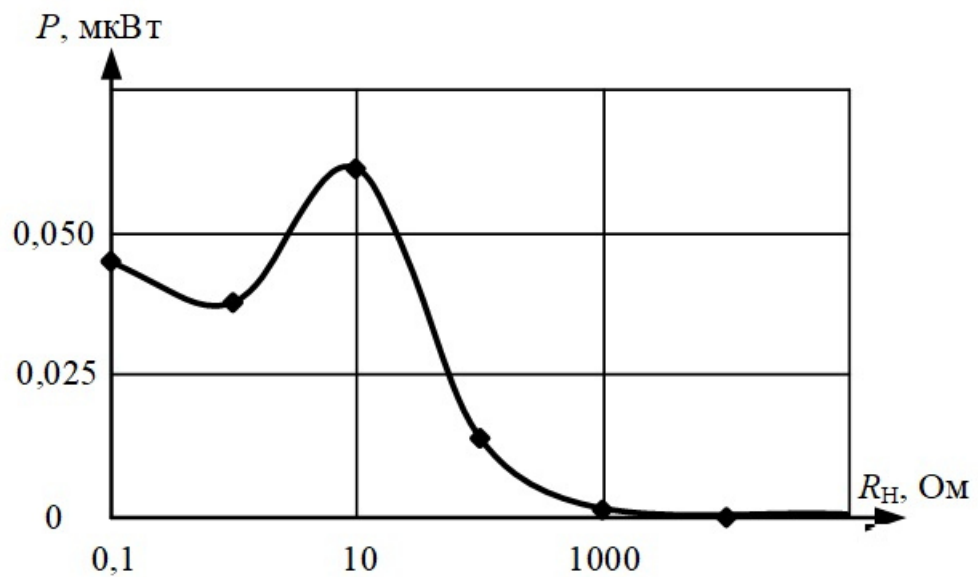


Рисунок 4.4 – Функціональна залежність зміни електричної розсіяної потужності навантаженні від зміни опору навантаження

Вимірювальна данні зберігаються у вигляді файлу на вибраний диск комп'ютера в форматі «*.txt», а також їх можна перетворити зі застосуванням пакету програм, який може працювати як з текстовими даними, так і у вигляді електронних таблиць – Microsoft Excel.

Зі застосуванням багатопозиційного перемикача ($S_1 - S_8$) можна вибирати значення опору навантаження, що здійснюється в діапазоні від 0,1 Ом до 10^6 Ом (див. рис.4.5). Багатопозиційний перемикач ($S_1 - S_8$) зроблено на основі реле EDR101A0500, яке отримує сигнали керування від контролера.

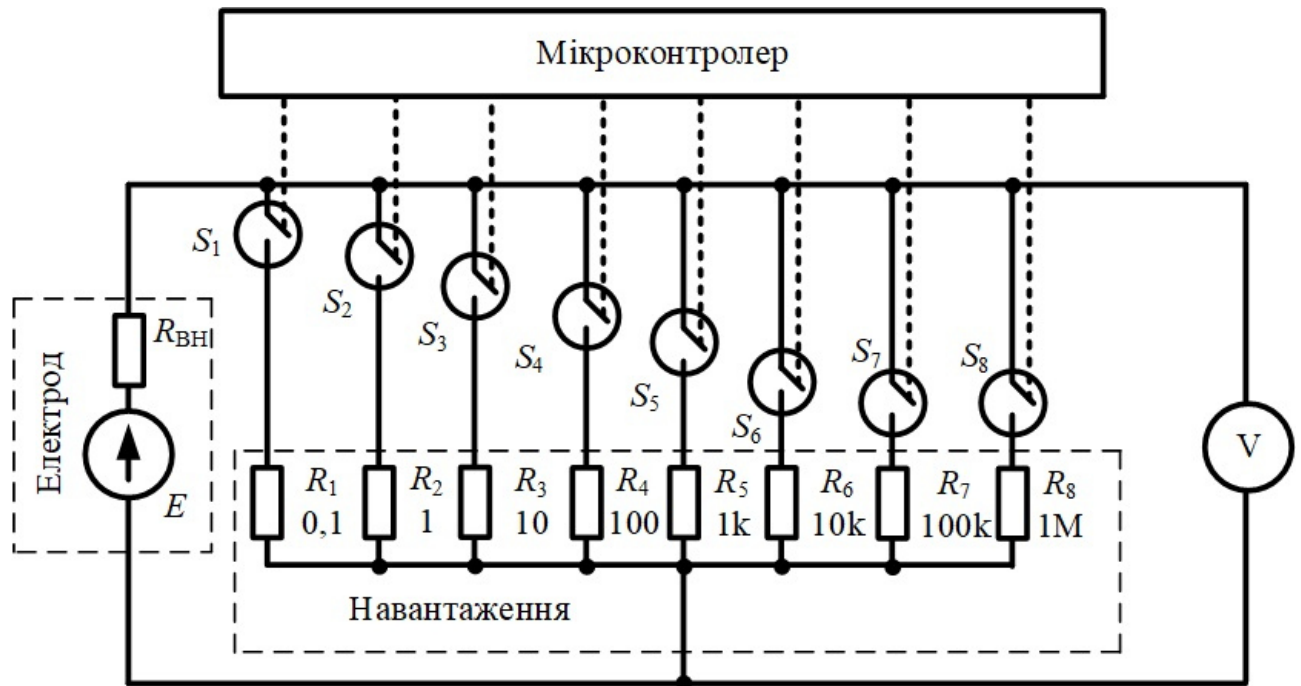


Рисунок 4.5 – Схема блоку вимірювання падіння напруги розробленої електронної інформаційно-вимірювальної системи

Реле EDR101A0500 має наступні параметри:

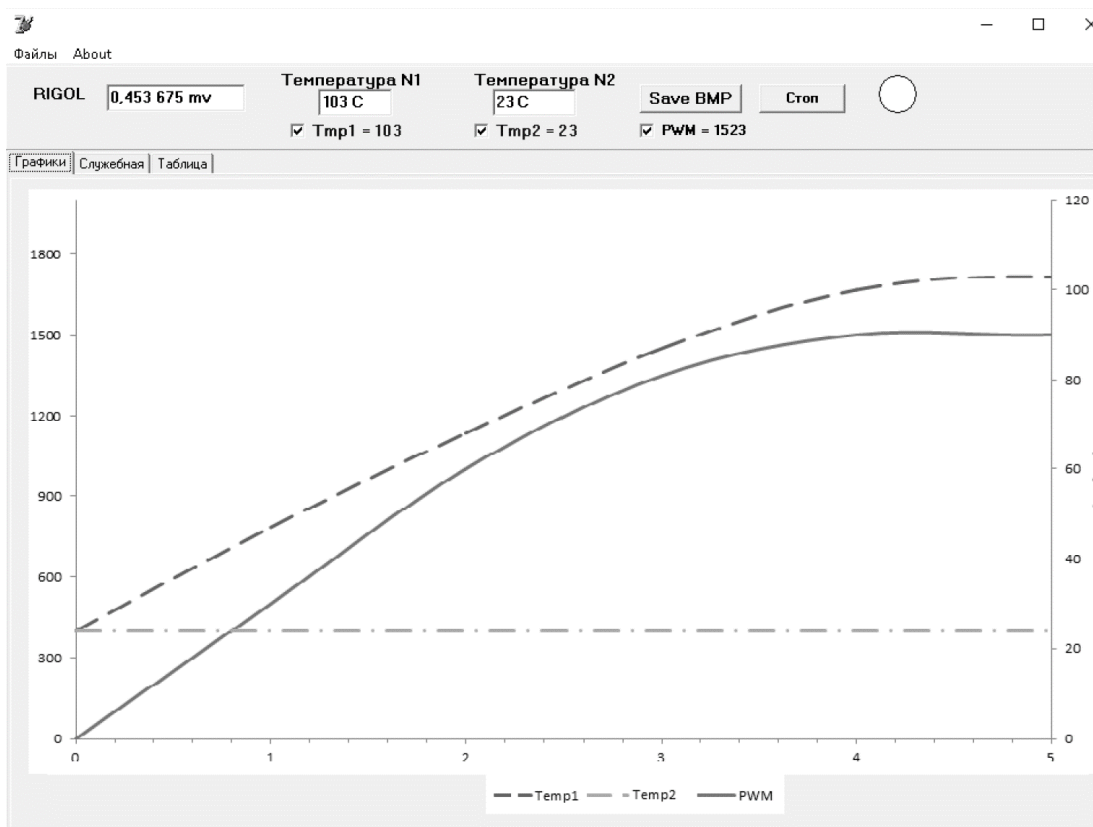
- максимальна постійна напруга під час комутації, В 100;
- максимальна величина робочої напруга, В 16;
- номінальна величина робоча напруга, В 5;
- величина напруги під час переключення, В не більше 3,75;
- максимальна величина сили електричного струму під час комутації, А 1;
- номінальне значення часу спрацювання, мс 1;
- номінальне значення часу відпускання, мс 0,5.

Інтерфейс програмної компоненти термокамери наведено на рис. 4.6, він має декілька закладок. Зовнішній вигляд першої функціональної закладки

наведено на рис. 4.6, а. Перша закладка використовується для візуалізації зміни та підтримки температури в камері. Також до першої закладки виводиться значення зміни температури навколишнього середовища та сигнали керування від контролера, що передаються до елементів керування термокамерою. Зазначені залежності розміщено в центральній частині першої закладки. За віссю абсцис представлено час, величина якого вимірюється в секундах, а за віссю ординат справа – значення температури, що визначається в градусах Цельсія, а зліва – час імпульсу керування роботою нагрівача термокамери.

У закладці «RIGOL» представлено поточне значення падіння напруги, що визначається зі застосуванням високоточного вольтметра на опорі навантаженні. У вікні «Температура № 1» представлено зміна поточної величини температури в реальному часі в термокамері. У вікні «Температура № 2» представлено зміна поточної величини температури, що визначається в навколишньому середовищі.

Програмна компонента вмикає та вимикає побудову графічної залежності у часі. Якщо значок «v» встановлено, то у вкладі виводяться графічна залежність зміни «Температура №1», «Температура №2» або «PWM» у часі. Запис вимірювальних значень до файлу здійснюється постійно та не залежить від того виводяться графіки чи ні. На рис. 4.6, б представлено зовнішній виклад закладки «Службова». Зазначену закладку використовують для забезпечення зв'язку між блоком керування термокамерою та контролером. У полі «Передача» виводиться код команди, що відправляються зі застосуванням інтерфейсу USB від контролеру до блоку керування камерою. У полі «Прийом» виводиться результат відповіді, що формується контролером. У полі «OkSbr», яке розташовано справа від «Edit2», здійснюється перетворення текстових повідомлень, що передаються інтерфейсом USB від контролера. Зазначені команди інтерфейсу USB поділяють на наступні: текстові, команди керування та інформаційні. Інформаційні команди використовуються для здійснення передачі вимірювальних даних, вони записуються до постійної пам'яті контролера.



а)

The screenshot shows the "Служебная" (Service) tab of the software. It contains various control fields and status indicators. At the top, "РІГОЛ" shows "0,623 675 mv". Below this, "Температура N1" is 115,0 C and "Температура N2" is 35 C. Checkboxes for "Tmp1 = 115,0 C", "Tmp2 = 35 C", and "PWM = 2787" are present. A "Save BMP" button and a "Cron" button are also visible. The main panel has tabs for "Графики", "Служебная", and "Таблица". The "Служебная" tab contains several sections: "Передача" (Edt2), "Принем" (83 00 73 F3 02 00 A3 0A E3 40 06 07 5A), "Reset", "Версия", "GetAdc", "Edt7", "ШИМ = 0", "Hi", "Ok", "Ошибка", "Норма", "Брак", "Нагрев", "OutRich", "Напряжение" (40,8), "U batr" (2,0), "Data = 1543", "U входа = 58176", "TEDS = 0", "T N2 = 253,8c", "SRAWN = 64", "Uimp = 2,0", "TEds = 40,8", "Сумма = 0", "Количество = 0", and "Среднее = 0".

б)

Рисунок 4.6 – Інтерфейс програмної компоненти термокамери: візуалізація контролю температури (а); службові команди (б)

Текстові команди використовуються для передачі інформаційних повідомлень з мінімальною обробкою. Команди керування застосовуються для здійснення передачі кодів до пристроїв. Величина коефіцієнта «K Ubatr» змінюється під час виконання процедури калібрування блоку керування. Зі застосуванням цього коефіцієнта виконується зміна величини напруги живлення камери. Значення коефіцієнта «K Temp1» змінюється під час калібрування вимірювального блоку електронної системи, що вносить поправку до вимірювальних значень температури в термокамері. Значення коефіцієнта «K Temp2» використовується під час калібрування вимірювального блоку температури навколишнього середовища. Вікно «Температура» використовується для завдання величини температури для забезпечення температурної стабілізації в термокамері. Вкладка «Службова» використовується для генерування окремих команд, які можуть передаватися за послідовним інтерфейсом USB.

ВИСНОВКИ

З проведеного аналізу параметрів і характеристик термоелектричного методу контролю дефектів у сплавах металів визначено, що повторюваність результатів вимірювання зі застосуванням цього методу є доволі низькою. Це обумовлено зміною температури об'єкта досліджень та робочого електрода під час теплового обміну, а також неоднорідним хімічним і фазовим складом об'єкта дослідження, поверхні об'єкта та електродів також мають різну ступінь шорсткості. Для мінімізації впливу зазначених факторів на результат вимірювання потрібно провести додаткові дослідження, в результаті яких визначити ступінь впливу зміни цих факторів на результат вимірювання, та запропонувати технічну реалізацію, що дозволить мінімізувати вплив зміни зазначених факторів. Для мінімізації впливу наявності неоднорідності хімічного та фазового складу на результат вимірювання застосовують лінійні або площинні електроди, які не мають одного точкового контакту з об'єктом дослідження. Реально має місце не контакт за площиною, а контакт через велику кількість точок, це обумовлено тим, що об'єкти дослідження та електроди мають шорсткі поверхні.

Якщо контакт здійснюється через велику кількість точок, то для вивчення механізму вимірювання еквівалентної термо-е.р.с. необхідно виконати додаткові дослідження. Це обумовлено тим, що у різних типах термоелектричних перетворювачів мають місце різні параметрами та характеристики. У них відрізняються значення величини е.р.с., внутрішнього опору, потужності та перехідного опору контактів. Одним з методів, що використовується під час виконання досліджень зазначеного механізму, є заміщення неоднорідної поверхні різними видами та типами термоелектронними перетворювачами, що підключаються паралельно.

Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик різних типів джерел термо-е.р.с. Під час аналізу результатів досліджень виявлено, що

істотно впливає зміна опору навантаження на величину внутрішнього опору та зміну потужності джерела термо-е.р.с.

Розроблено інженерну методику розрахунку характеристик і параметрів еквівалентного джерела під час паралельного включення різних типів джерел термо-е.р.с. зі застосуванням методу накладання.

Запропоновано математичну модель для розрахунку характеристик і параметрів еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного підключення великої кількості різних джерел термо-е.р.с.

Виконані дослідження електричних параметрів і характеристик еквівалентного джерела термо-е.р.с. під час паралельного підключення великої різної кількості різних типів джерел термо-е.р.с.

Розроблено електронну інформаційно-вимірювальну систему контролю дефектів у сплавах металів, яку можна використовувати для контролю якості сплавів під час їх пластичної деформації та термічної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liske, O. Radiowave methods of non-destructive testing / O. Liske, R. Yakymiv, A. Melnychuk / Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012 Dedicated to the 60th anniversary of the Radio Department at the Lviv Polytechnic National University, Lviv – Slavske, Ukraine February 21–24, 2012. – Lviv: House of Lviv Polytechnic, 2012. – PP. 184.
2. Geoffrey, H. (1992). Novel applications of X-rays in non-destructive testing / H. Geoffrey // NDT and E International, 1992. – Vol. 28, Issue. 5/1. – PP. 303 – 308.
3. Mix, P. Ultrasonic Testing / P. Mix / Introduction to Nondestructive Testing, 2005, John Wiley & Sons, Inc. – <https://doi.org/10.1002/0471719145.ch11>
4. Smathers, M. Dual gate ultrasonic backscatter technique compared to x-ray microtomography parameters / M. Smathers, J. A. McPherson, M. Sellers etc // The Journal of the Acoustical Society of America, 2013. – Vol. 134, Issue. 4120. – <https://doi.org/10.1121/1.4831136>.
5. Han, L. Technology on ultrasonic testing of barrel / L. Han, W. Song, L. Yang // Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014. – Vol. 36, Issue.2 . – PP. 317 – 320.
6. Gorgun, E. Ultrasonic testing to measure the stress state of steel parts / E. Gorgun, K. Mehmet // Journal of Mechanical Science and Technology, 2019. – Vol. 33. – PP. 3231 – 3236.
7. Vavilov, V. Thermal/infrared nondestructive testing, NDT handbook series / V. Vavilov // Spektrum, 2009. – Vol. 5. – PP. 1 – 467.
8. Carreon, H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing / H. Carreon // Journal of Applied Physics, 2000. – Vol. 88 (11). – PP. 64 – 95.
9. Faraji, A. Design of a Compact, Portable Test System for Thermoelectric Power Generator Modules / A. Faraji, A. Akbarzaden // Journal of Electronic Materials, 2013 – Vol. 42. – Issue. 7 – PP. 14 – 23.

10. Hu, J. On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization / J. Hu, P.B. Nagy // Appl. Phys. Lett, 1998 – Vol. 73. – pp. 467 – 469.
11. Jacquot, A. Proc. 25th Int. Conf. Thermoelectrics ed P Rogl / A. Jacquot, J. König, H. Böttner // Piscataway, NJ: IEEE, Catalog Nr. 06TH8931, 2006. – 184 p.
12. Martin, J. High temperature Seebeck coefficient metrology / J. Martin, T. Tritt, C. Uher, 2010. – Phys. – 108 p.
13. Simonet, L. Effet des heterogeneites sur le Pouvoir Thermoelectrique de l'acier de cuve / L. Simonet // National Institute of Applied Sciences of Lyon, 2006. – Vol. 3. – PP. 86 – 92.
14. Iwanaga, S. A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient / S. Iwanaga etc // Rev Sci Instrum, 2011. – 82 p.
15. Powell, R.L. Thermocouple reference tables based on the IPTS-68 / R.L. Powell, W.J. Hall, C.H. Hyink et al. // NBS monograph 125. – National Bureau of Standards, 1974. – 186 p.
16. Сенько, В.Ф. Теорія електричних кіл: навч. посіб. / В.Ф. Сенько, О.В. Вовна, І.С. Лактіонов. – Покровськ: ДВНЗ «ДОННТУ», 2017. – 254 с.
17. Rigol User's guide for Model DM3068 Digital Multimeter, DMM Series // Beijing, China: Rigol Technologies Inc..
http://www.batronix.com/pdf/Rigol/UserGuide/DM3068_UserGuide_EN.pdf
18. Солдатов, А.А. Неразрушающий экспресс контроль металлов и сплавов методом дифференциальной термо-эдс / А.А. Солдатов, Е.А. Кривенко // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск, 18-22 Апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – Т.1 – С. 208 – 209.
19. Soldatov, A.I. An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples / A.I. Soldatov etc // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 2017. – PP. 1 – 4.
20. Жидецький, В.Ц. Практикум із охорони праці / В.Ц. Жидецький та ін. – Л.: Афіша, 2000 – 349 с.

ДОДАТОК А

Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу та організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце з персональним комп'ютером, повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світових прорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світових прорізів. Віконні прорізи в приміщенні з персональним комп'ютером повинні мати регульовані жалюзі чи занавіски або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць з персональним комп'ютером у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з персональними комп'ютерами рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з персональним комп'ютером повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування персонального комп'ютера, під час якого працюючий звернений обличчям або спиною до вікон чи кімнати задньої частини персонального комп'ютера, де монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень з персональними комп'ютерами полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери, що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені до «Переліку дозволених, МЗ» 1977-1985 р.

У лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з персональними комп'ютерами розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами 3 м. Екрани моніторів знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 м від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів, відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотним пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння та спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрати повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаються за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_{\text{В}} - t_{\text{Н}})}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – об'ємна вага повітря (1,226 кг/м³);

$t_{\text{В}}$ – температура витяжного повітря (30°C);

$t_{\text{Н}}$ – температура приточного повітря (20°C).

Розраховується надлишкове надходження тепла за формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{уст}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{пер}}$ – виділення тепла від персоналу;

$Q_{\text{осв}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{ср}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначається виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{уст}} = P \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_6 – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{\text{уст}} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначається виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{\text{пер}} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.4})$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначається надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{\text{осв}} = E_m \cdot g_l \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.5})$$

де E_M – нормована освітленість для зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питоме тепловиділення на 1 м² підлоги під час освітленості в 1 лк (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Визначається надходження тепла від сонячної радіації через вікна за формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{OCL} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3 x 2,5=7,5 м²);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

K_{OCL} – коефіцієнт ослаблення, приймається 0,4.

Визначається кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{OCB} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначаються витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 м³/год., що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати

(22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та (40 – 60) %, відповідно. Під час збереження всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, швидкість руху повітря (0,1 – 0,2) метрів в секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія під час збереження всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($H=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{\text{стелі}} = 70$ %, $P_{\text{стін}} = 50$ %. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, що розташовано на стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначається висота підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути в межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. Освітлення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідного відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначається висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,7 = 2,4 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається під час відповідного співвідношення відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначається рекомендована відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,4 = 1,68 \text{ м.}$$

4) Розраховується необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{1,68^2} = 7,4.$$

Приймається 8 світильників, з обліком розмірів приміщення вони розташовуються у два ряди по 4 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк;

K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15);

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світового потоку, що визначається за

світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та коефіцієнтів відбиття стін і стелі.

6) Визначається показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 ($i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обирається лампа Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої дорівнює 2000 лм. Хоча це значення на 19,2 % більше розрахованого, проте не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт.}$$