

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Шмагайло Роман Вадимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 536.5
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення пристрою контролю температури твердих об'єктів

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 – Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

Р.В.Шмагайло

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

Чуйко Мирослава Михайлівна, к.т.н, доц.

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

В.С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ, 2025 р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 175- Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

« » 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Шмагайлу Роману Вадимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення пристрою контролю температури твердих об'єктів

керівник роботи Чуйко Мирослава Михайлівна, к.т.н, доц.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “05” 12.2025 року № 752/7

2. Строк подання студентом роботи 24.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Вихідними даними для виконання магістерської роботи є фізичні закони теплового випромінювання, технічні характеристики елементів пірометричної системи та результати експериментальних вимірювань температури твердих тіл.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1.Аналіз методів безконтактного вимірювання температури та фізичних основ пірометрії.

2. Розробку структурної, функціональної та принципової схем пірометричної системи.

3. Обґрунтування вибору елементної юази та розробку програмного забезпечення пірометра.

4. Проведення експерементальних досліджень і визначення коефіцієнта випромінювання матеріалів.

5. Аналіз результатів вимірювань та оцінку ефективності розробленої інформаційно-вимірювальної системи.

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

1.Класифікація пірометрів

2.Структурна схема безконтактного пірометра

3.Електрична принципова схема приладу

4.Схема установки нагрівання об'єкта

5.Результати вимірювання безконтактних пірометрів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
нормоконтроль	Чуйко М.М., доцент каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз методів безконтактного вимірювання температури та фізичних основ пірометрії	08.12.2024	
2.	Розробку структурної, функціональної та принципової схем пірометричної системи.	11.12.2024	
3.	Аналіз результатів вимірювань та оцінку ефективності розробленої інформаційно-вимірювальної системи.	16.12.2024	
4.	<i>Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи</i>	18.12.2024	
5	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу магістерської роботи</i>	23.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Шмагайло Р.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Чуйко М.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота: 69 с., 34 табл., 28 рис., 29 джерел.

Об'єкт дослідження — процес безконтактного вимірювання та контролю температури твердих тіл.

Предмет дослідження — методи та засоби безконтактного вимірювання температури твердих тіл на основі інфрачервоної пірометрії з урахуванням коефіцієнта випромінювання поверхні.

Мета роботи — розроблення та експериментальне дослідження інформаційно-вимірювальної системи безконтактного контролю температури твердих тіл із можливістю налаштування коефіцієнта випромінювання для підвищення точності вимірювань.

Методи дослідження — теорія вимірювань, теорія теплового випромінювання тіл, фізичні основи пірометрії, математичне моделювання процесів теплового випромінювання, експериментальні методи дослідження, аналіз та обробка експериментальних даних.

У роботі розглянуто фізичні основи інфрачервоного випромінювання та принципи роботи безконтактних пірометрів. Проаналізовано існуючі методи та засоби вимірювання температури, наведено класифікацію пірометрів і визначено їхні переваги та обмеження. Особливу увагу приділено впливу коефіцієнта випромінювання матеріалів на точність безконтактних вимірювань температури.

Розроблено структурну, функціональну та принципову схеми інформаційно-вимірювальної системи на основі інфрачервоного датчика MLX90614, мікроконтролера Arduino Nano та OLED-дисплея. Обґрунтовано вибір елементної бази з урахуванням вимог до точності, енергоефективності та зручності експлуатації.

Здійснено експериментальні дослідження температури металевого об'єкта при різних режимах нагрівання з використанням безконтактного пірометра та контактного електронного термометра. На основі отриманих результатів визначено коефіцієнт випромінювання досліджуваного матеріалу та проведено корекцію показів пірометра. Порівняльний аналіз експериментальних даних показав суттєве зменшення похибки вимірювання після врахування коефіцієнта випромінювання.

На підставі результатів досліджень підтверджено ефективність розробленої системи безконтактного вимірювання температури та доцільність її використання для контролю температури твердих тіл у промисловості, енергетиці, будівництві та екологічному моніторингу. Запропонована система характеризується високою точністю, швидкодією, безпечністю та можливістю адаптації до різних типів поверхонь.

ABSTRACT

Master's Thesis: 69 pages, 34 tables, 28 figures, 29 references.

Object of research — the process of non-contact temperature measurement and monitoring of solid bodies.

Subject of research — methods and instruments for non-contact temperature measurement of solid bodies based on infrared pyrometry, taking into account the emissivity coefficient of the surface.

Purpose of the thesis — to develop and experimentally investigate an information-measuring system for non-contact temperature control of solid bodies with adjustable emissivity coefficient in order to improve measurement accuracy.

Research methods — measurement theory, theory of thermal radiation, physical principles of pyrometry, mathematical modeling of thermal radiation processes, experimental research methods, analysis and processing of experimental data.

The thesis considers the physical principles of infrared radiation and the operating principles of non-contact pyrometers. Existing methods and instruments for temperature measurement are analyzed, pyrometer classification is presented, and their advantages and limitations are identified. Special attention is paid to the influence of material emissivity on the accuracy of non-contact temperature measurements.

Structural, functional, and electrical schematic diagrams of an information-measuring system based on the MLX90614 infrared sensor, Arduino Nano microcontroller, and OLED display are developed. The selection of the component base is substantiated with regard to accuracy requirements, energy efficiency, and ease of operation.

Experimental studies of the temperature of a metal object under different heating modes were carried out using a non-contact pyrometer and a contact electronic thermometer. Based on the obtained results, the emissivity coefficient of the investigated material was determined and used to correct the pyrometer readings. Comparative

analysis of experimental data showed a significant reduction in measurement error after accounting for the emissivity coefficient.

The results confirm the effectiveness of the developed non-contact temperature measurement system and the feasibility of its application for temperature monitoring of solid bodies in industry, energy sector, construction, and environmental monitoring. The proposed system is characterized by high accuracy, fast response, operational safety, and the ability to adapt to different surface types.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ І КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ	13
1.1 Класифікація методів і технічних засобів вимірювання та контролю температури	13
1.2 Способи та принципи безконтактного визначення температури	15
1.3 Фізика процесів пірометричного контролю	17
1.4 Практичні сфери використання пірометричних приладів.....	21
1.5 Систематизація та різновиди пірометрів	23
1.5.1. Радіаційні методи пірометричного вимірювання температури.....	24
1.5.2. Оптичні пірометри яскравісного типу	25
1.5.3. Пірометри, що працюють за методом спектрального співвідношення	27
1.5.4 Інфрачервоний безконтактний пірометр Wintact WT320 як приклад сучасного вимірювання засобу	28
1.5.5. Fluke 62 MAX.....	30
1.6 Постановка задачі на магістерську роботу	32
2 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ	34
2.1 Опис принципу функціонування пірометричного вимірювального приладу.....	34
2.2 Блокова організація пірометра	34
2.3 Електрична принципова схема пірометричної системи	35
2.4 Проектування та обґрунтування функціональної схеми пристрою.....	38
2.5.1 Arduino Nano	40
2.5.2 MLX90614	43
2.5.3 Рідкокристалічний дисплей	46
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИПРОМІНЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ	49
3.1 Теоретичні засади пірометричного вимірювання температури	49
3.3 Коефіцієнт випромінювання.....	52
3.4 Розрахунок і встановлення скоригованого коефіцієнта випромінювання.....	53
4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ.....	55
4.1 Опис умов вимірювання температур твердих об'єктів.....	55
4.2 Обробка результатів вимірювання безконтактних пірометрів.....	57
4.3. Обробка результатів вимірювань з урахуванням скоригованого коефіцієнта випромінювання.....	61
4.4 Розрахунок похибки пристрою контролю температури твердих об'єктів	64
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – пристрій, що забезпечує перетворення аналогового сигналу у цифрову форму;

EEPROM – тип енергонезалежної пам'яті з можливістю багаторазового електричного стирання та програмування;

ОС – сукупність оптичних елементів, призначених для формування та спрямування випромінювання;

ШИМ – метод керування сигналом шляхом зміни тривалості імпульсів;

USART – універсальний асинхронний інтерфейс для приймання та передавання даних;

ІЧ – інфрачервона частина електромагнітного спектра;

I2C – послідовна двопровідна шина для обміну даними між інтегральними схемами;

OLED – дисплейна технологія на основі органічних світлодіодів;

LCD – індикатор, принцип дії якого ґрунтується на використанні рідких кристалів;

SPI – високошвидкісний послідовний інтерфейс для взаємодії периферійних пристроїв;

ЧТ – модель тіла, що випромінює теплову енергію не повністю;

АЧТ – ідеалізоване тіло з максимальною випромінювальною здатністю;

SRAM – енергозалежна статична пам'ять з довільним доступом;

HVAC – системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря;

РК – рідкокристалічний елемент або пристрій;

SDA – лінія передавання даних у послідовному інтерфейсі;

SCL – тактова лінія синхронізації обміну даними;

GND – загальний електричний провід (земля).

ВСТУП

Актуальність теми. Контроль температури твердих тіл є однією з ключових задач у сучасній промисловості, енергетиці, будівництві, екологічному моніторингу та наукових дослідженнях. Температура істотно впливає на фізико-механічні властивості матеріалів, стабільність технологічних процесів, енергетичну ефективність обладнання та рівень безпеки експлуатації об'єктів. Тому забезпечення точного, швидкого та безпечного вимірювання температури є важливою умовою ефективного функціонування багатьох технічних систем.

У багатьох практичних випадках застосування контактних методів вимірювання температури є ускладненим або взагалі неможливим. Це стосується вимірювань температури високонагрітих, рухомих, електрично небезпечних або важкодоступних об'єктів, а також об'єктів з агресивними або крихкими поверхнями. У таких умовах традиційні контактні термометри не забезпечують необхідної точності, швидкодії або безпеки вимірювань.

Альтернативою контактним методам є безконтактні методи вимірювання температури, які ґрунтуються на реєстрації теплового інфрачервоного випромінювання об'єктів. Одним із найбільш поширених і перспективних засобів реалізації таких методів є пірометри. Безконтактні пірометри дозволяють здійснювати вимірювання температури на відстані, не впливаючи на об'єкт контролю та не порушуючи технологічний процес. Вони характеризуються високою швидкістю вимірювання, зручністю експлуатації та підвищеним рівнем безпеки для оператора.

Разом з тим, точність пірометричних вимірювань суттєво залежить від правильного врахування випромінювальних властивостей поверхні об'єкта. Основним параметром, що визначає інтенсивність інфрачервоного випромінювання реальних тіл, є коефіцієнт випромінювання. Його значення залежить від матеріалу, стану поверхні, температури, наявності покриттів, окислення або забруднень. Неправильне задання коефіцієнта випромінювання може призводити до значних похибок вимірювання, які у деяких випадках досягають десятків градусів.

У промисловій практиці часто використовуються пірометри з фіксованим або типовим значенням коефіцієнта випромінювання, що не забезпечує достатньої

точності для різних типів матеріалів і поверхонь. Це зумовлює необхідність розроблення та дослідження інформаційно-вимірювальних систем безконтактного контролю температури з можливістю корекції або індивідуального налаштування коефіцієнта випромінювання.

Таким чином, актуальним є завдання створення та експериментального дослідження безконтактної системи вимірювання температури твердих тіл, яка поєднує сучасні апаратні засоби, цифрову обробку сигналів і алгоритми компенсації впливу випромінювальних властивостей матеріалів. Реалізація такої системи дозволяє підвищити точність вимірювань, розширити сферу застосування пірометрії та забезпечити її ефективне використання в сучасних технологічних процесах.

Мета та завдання дослідження

Метою магістерської роботи є розроблення та експериментальне дослідження інформаційно-вимірювальної системи безконтактного контролю температури твердих тіл на основі пірометрії з урахуванням коефіцієнта випромінювання поверхні.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз існуючих методів і засобів вимірювання температури твердих тіл, зокрема контактних і безконтактних.
2. Дослідити фізичні основи теплового інфрачервоного випромінювання та принципи роботи пірометрів.
3. Розглянути вплив коефіцієнта випромінювання матеріалів на точність безконтактних температурних вимірювань.
4. Розробити структурну, функціональну та принципову схеми безконтактної системи вимірювання температури.
5. Обґрунтувати вибір елементної бази інформаційно-вимірювальної системи.
6. Реалізувати програмне забезпечення для обробки даних та корекції результатів вимірювання.
7. Провести експериментальні дослідження та визначити коефіцієнт випромінювання досліджуваного матеріалу.

8. Оцінити точність і ефективність розробленої системи шляхом порівняння з контактним методом вимірювання.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження — процес безконтактного вимірювання температури твердих тіл.

Предмет дослідження — методи та засоби пірометричного вимірювання температури з урахуванням коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта.

Методи дослідження

У роботі використано методи теорії вимірювань, фізики теплового випромінювання, теорії пірометрії, математичного моделювання, цифрової обробки сигналів, а також експериментальні методи дослідження та статистичний аналіз результатів вимірювань.

Наукова новизна

1. Запропоновано інформаційно-вимірювальну систему безконтактного контролю температури з урахуванням індивідуального коефіцієнта випромінювання матеріалу.

2. Експериментально визначено вплив коефіцієнта випромінювання на точність пірометричних вимірювань.

3. Реалізовано метод корекції результатів вимірювання температури шляхом програмного врахування випромінювальних властивостей поверхні.

Практичне значення роботи

Розроблена система безконтактного вимірювання температури може бути використана в промисловості, енергетиці, будівництві, екологічному моніторингу та наукових дослідженнях. Отримані результати дозволяють підвищити точність температурного контролю, забезпечити безпечні умови вимірювання та розширити можливості практичного застосування пірометрів.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ І КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Класифікація методів і технічних засобів вимірювання та контролю температури

На промислових підприємствах контроль температурних параметрів є невід'ємною складовою технологічних процесів і має вирішальне значення для забезпечення їхньої стабільності та безпеки. Для реалізації цього контролю застосовують спеціалізовані вимірювальні засоби — термометри, які, залежно від принципу дії, поділяються на дві основні групи: контактні та безконтактні, що схематично представлено на рис. 1.1.



Рисунок. 1.1 – Класифікація термометрів

Контактні термометри передбачають безпосередній фізичний контакт вимірювального елемента з об'єктом, температура якого визначається. Такі прилади широко використовуються в промислових умовах за наявності прямого доступу до контролюваного об'єкта. До найпоширеніших різновидів контактних термометрів належать ртутні термометри, термоелементи, термопари та інші спеціалізовані вимірювальні пристрої.

Безконтактні термометри, на відміну від контактних, забезпечують визначення температури без необхідності фізичного дотику до об'єкта. Принцип їх роботи ґрунтується на використанні оптичних методів або аналізі інфрачервоного випромінювання, яке випромінює об'єкт. Вимірювання здійснюється виключно на основі енергетичних характеристик цього випромінювання. Завдяки таким

особливостям безконтактні термометри набули широкого застосування в промисловості, медицині, енергетиці та інших галузях, де першочерговими є вимоги до точності, швидкодії та безпеки температурних вимірювань.

Загалом контроль температури може здійснюватися як контактними, так і безконтактними методами. Контактні методи вимірювання передбачають прямий тепловий контакт між первинним перетворювачем та об'єктом вимірювання. До цієї групи належать такі основні типи термометрів:

1. **Термометри розширення**, принцип дії яких базується на реєстрації зміни об'єму або лінійних розмірів речовини під впливом температури.

2. **Термометри опору**, що використовують залежність електричного опору матеріалу від температури, що дає змогу визначати її значення з високою точністю.

3. **Манометричні термометри**, у яких вимірювання температури здійснюється шляхом контролю тиску робочої речовини, чутливої до температурних змін.

4. **Термоелектричні термометри (термопари)**, робота яких ґрунтується на виникненні термоелектрорушійної сили в місці з'єднання різнорідних металів при їх нагріванні.

Безконтактні вимірювальні засоби, що забезпечують визначення температури поверхні об'єкта без прямої взаємодії між ним і температурним сенсором, дозволяють отримувати необхідну інформацію за допомогою двох основних типів приладів — тепловізорів та пірометрів [1].

Тепловізійні системи функціонують на основі реєстрації температурних відмінностей і подальшого перетворення цих даних у візуальне зображення. Сформована теплова карта відображає просторовий розподіл інфрачервоного випромінювання від досліджуваного об'єкта. При цьому контрастність і чіткість тепловізійного зображення зростають зі збільшенням різниці між інфрачервоним випромінюванням об'єкта та фоновим випромінюванням навколишнього середовища.

Пірометри, своєю чергою, здійснюють вимірювання температури шляхом реєстрації теплового випромінювання, що випромінюється поверхнею об'єкта. За принципом дії вони є фотодетекторами, які базуються на процесі поглинання

енергії та визначенні інтенсивності електромагнітних хвиль у певних спектральних діапазонах. Пірометричні прилади випускаються для роботи в різних діапазонах довжин хвиль, що дає змогу застосовувати їх як для вимірювання температури металевих об'єктів, характерних короткохвильовим інфрачервоним випромінюванням, так і для неметалевих матеріалів, які випромінюють переважно в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні. Завдяки високоякісним оптичним системам такі прилади здатні з високою точністю визначати температуру навіть малогабаритних об'єктів на значній відстані.

Пірометри знайшли широке застосування у промисловому виробництві, науково-дослідній діяльності та побутовому використанні. Їх поширення обумовлене низкою суттєвих переваг порівняно з контактними методами температурних вимірювань, зокрема:

можливістю вимірювання температури рухомих об'єктів або об'єктів, що знаходяться у важкодоступних місцях;

здатністю ефективно працювати в складних експлуатаційних умовах, таких як наявність високої напруги, сильних електромагнітних полів, вібрацій або екстремально високих температур, за яких застосування контактних термометрів є небезпечним або технічно неможливим;

забезпеченням високої швидкодії та оперативності отримання результатів вимірювань.

Завдяки зазначеним характеристикам пірометри є оптимальним засобом для контролю температури, оскільки дозволяють здійснювати вимірювання без зупинки технологічних процесів, гарантують безпечну дистанцію між оператором і нагрітими об'єктами, а також відзначаються простотою експлуатації, надійністю та високою точністю вимірювань [2].

1.2 Способи та принципи безконтактного визначення температури

Розглянемо основні методи безконтактного визначення температури, які набули поширення в сучасних вимірювальних системах.

Інфрачервона термометрія. Даний метод застосовується для вимірювання температури поверхонь, доступ до яких є ускладненим або повністю неможливим для контактних засобів контролю. Інфрачервоні термометри можуть бути однопроменевими, що забезпечують вимірювання температури в окремій точці, а також багатопроменевими, які дозволяють одночасно визначати температурні значення в декількох точках. Такі вимірювальні пристрої знайшли широке застосування як у сфері охорони здоров'я для дистанційного контролю температури людського тіла, так і в промислових умовах для оперативного моніторингу температури поверхонь виробничого та технологічного устаткування.

Термографічні камери. Принцип дії термографічних систем ґрунтується на реєстрації інфрачервоного випромінювання, що випромінюється поверхнями об'єктів. Камера фіксує теплову енергію та формує зображення, у якому різні кольорові відтінки відповідають певним температурним рівням. Термографічні камери можуть виконуватися як у стаціонарному, так і в портативному виконанні та широко застосовуються в промисловості для моніторингу технологічних процесів, а також у будівельній галузі для виявлення теплових втрат, дефектів ізоляції та інших температурних аномалій.

Оптичні пірометри. Цей метод базується на фундаментальних законах термодинаміки та передбачає використання оптичних сенсорів для збору теплового випромінювання від об'єкта. Зареєстроване випромінювання перетворюється на електричний сигнал, який використовується для визначення температури. Оптичні пірометри широко застосовуються в промисловості для безконтактного вимірювання температури різних об'єктів. Конструкція таких вимірювальних засобів зазвичай включає оптичний вузол для збирання випромінювання, чутливий сенсорний елемент, що реєструє тепловий потік, а також блок індикації або візуалізації отриманих даних.

Радіаційні пірометри, у яких як чутливий елемент застосовуються термопари, переважно призначені для контролю температур у високотемпературних промислових процесах та виробничих середовищах.

Їх робота ґрунтується на термоелектричному ефекті, відповідно до якого при нагріванні спаю двох різнорідних металів виникає електрична напруга. Один кінець

термопарі піддається нагріванню, тоді як інший підтримується за сталої температури, що дає змогу визначити температурну різницю та, відповідно, температуру об'єкта.

Лазерні термометри. Пристрої цього типу реалізують безконтактне вимірювання температури за рахунок поєднання оптичних і лазерних методів. Лазерний промінь використовується для точного наведення на контрольовану поверхню, тоді як температурна інформація визначається на основі аналізу інфрачервоного випромінювання, що випромінюється об'єктом. Зареєстрований тепловий потік перетворюється електронною системою приладу у числове значення температури.

Акустичні термометри. Робота акустичних термометрів ґрунтується на фізичному зв'язку між температурою середовища та швидкістю поширення в ньому звукових коливань. Зміна температури викликає відповідну зміну швидкості звуку, що дозволяє визначати температурні параметри об'єкта. У процесі вимірювання акустичний сигнал надсилається до контрольованої області, а температура обчислюється за часовими характеристиками проходження та відбиття ехо-хвилі.

Принцип дії радіаційних пірометрів. Функціонування радіаційних пірометрів базується на реєстрації теплового інфрачервоного випромінювання, яке надходить від локальної ділянки поверхні об'єкта. Такий спосіб вимірювання дає змогу визначати температуру вибраної зони з високою просторовою точністю, не впливаючи на навколишні області та не порушуючи тепловий баланс об'єкта.

1.3 Фізика процесів пірометричного контролю

Будь-які матеріальні тіла, температура яких є вищою за абсолютний нуль ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), випромінюють теплову енергію у вигляді інфрачервоного випромінювання. Це випромінювання належить до електромагнітних хвиль і займає проміжне положення між видимим світлом, яке сприймається органами зору людини, та радіохвильовим діапазоном. У загальному електромагнітному спектрі

інфрачервона область охоплює діапазон довжин хвиль приблизно від 0,7 до 1000 мкм, що схематично показано на рис. 1.2.

Водночас у прикладних задачах температурних вимірювань переважно застосовуються інфрачервоні хвилі з довжинами у межах 0,7–20 мкм. Це обумовлено технічними можливостями сучасних приймачів випромінювання, оскільки їх чутливість різко зменшується на більших довжинах хвиль. Як наслідок, реєстрація та точна оцінка енергії випромінювання за межами зазначеного інтервалу стає значно складнішою [3].

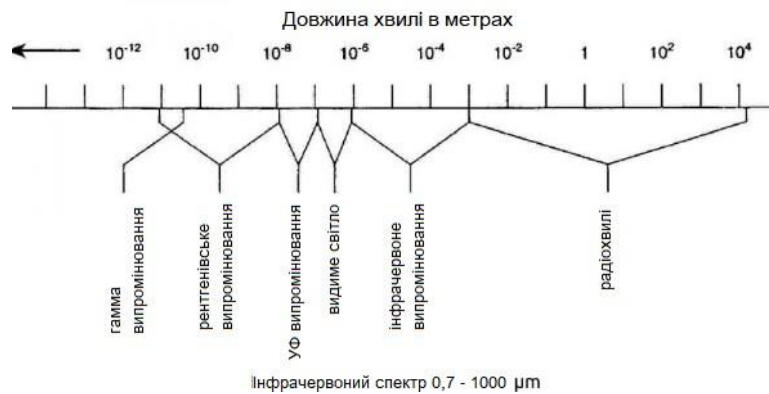


Рисунок 1.2 – Діапазони електромагнітного випромінювання

На рис. 1.3 наведено графічну залежність інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла від температури. Аналіз отриманої графічної залежності показує, що переважна частка енергетичного випромінювання зосереджена в спектральних ділянках, які знаходяться поза межами видимої для людського ока області оптичного спектра [4].

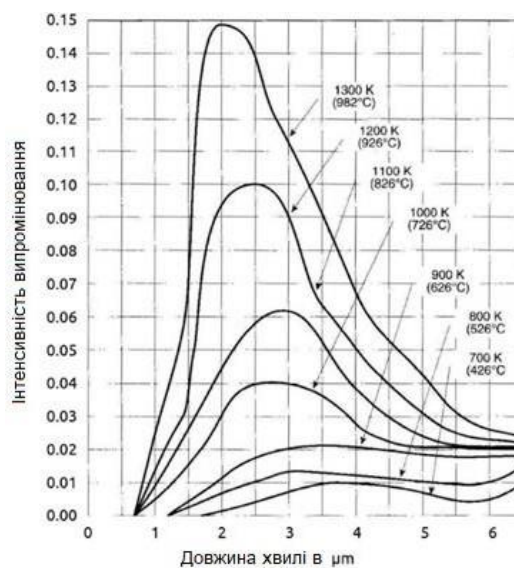


Рисунок 1.3 – Залежність інтенсивності випромінювання від температури та довжини хвилі

Інфрачервоне випромінювання за своїми фізичними властивостями часто подібне на видиме світло яке поширюється від джерела переважно прямолінійно та може піддаватися поглинанню або відбиттю залежно від наявних перешкод. Об'єкти, які є непрозорими для людського зору, зазвичай частково поглинають і частково відбивають інфрачервоне випромінювання. Співвідношення між поглинутою та відбитою енергією визначається фізико-хімічними властивостями та станом поверхні об'єкта.

Абсолютно чорне тіло є теоретичною моделлю ідеалізованого об'єкта, здатного повністю поглинати будь-яке падаюче на нього випромінювання незалежно від довжини хвилі. У реальних умовах такі об'єкти не існують, проте для цілей теоретичного аналізу та порівняння його коефіцієнт випромінювання умовно приймається рівним одиниці.

Коефіцієнт випромінювання характеризує відношення інтенсивності теплового випромінювання реального, так званого сірого тіла, до випромінювання абсолютно чорного тіла за однакової температури. Сіре тіло має сталу випромінювальну здатність у всьому спектральному діапазоні, проте рівень випромінюваної ним інфрачервоної енергії є меншим в порівнянні з повністю темним об'єктом.



Рисунок 1.4 – Порівняння спектральних властивостей випромінювання чорного, сірого та селективного тіл

Об'єкти, для яких випромінювальні характеристики змінюються залежно від довжини хвилі, відносять до несірих або селективних тіл; типовими

представниками цієї групи є метали. Порівняльні характеристики таких об'єктів наведено на рис. 1.4.

У загальному випадку різні матеріали характеризуються різними значеннями коефіцієнта випромінювання, що зумовлює відмінності в інтенсивності інфрачервоного випромінювання навіть за однакової температури. Як правило, колір поверхні не має визначального впливу на коефіцієнт випромінювання за умови, що фарбове покриття володіє таким самим значенням коефіцієнта випромінювання, як і матеріал самого об'єкта.

Процес вимірювання температури за допомогою пірометрів ґрунтується на низці фундаментальних фізичних законів.

Закон теплового випромінювання Кірхгофа. Згідно з цим законом, за однакових умов температури T та довжини хвилі λ випромінювальна здатність матеріалу є чисельно відповідає його здатності поглинати випромінювання α .

$$\varepsilon = \alpha, \quad (1.1)$$

Це означає, що потік випромінювання реального тіла (Φ_r) за тієї ж температури, що й у абсолютно чорного тіла (Φ_s), дорівнює потоку чорного тіла, помноженому на коефіцієнт випромінювання:

$$\Phi_r = \varepsilon \cdot \Phi_s, \quad (1.2)$$

Закон Планка. Згідно з цим законом випромінювання та поглинання енергії відбуваються дискретними порціями — квантами, енергія яких визначається частотою коливань:

$$E = h\nu, \quad (1.3)$$

де $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — стала Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — швидкість світла, λ — довжина хвилі.

Закон зміщення Віна. Цей закон описує обернену залежність між довжиною хвилі, на яку припадає максимум випромінювання абсолютно чорного тіла, та його температурою [5]. Для об'єктів з високою температурою максимум енергії випромінювання зміщується у бік коротших хвиль:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (1.4)$$

де $\lambda_{\max}$ — довжина хвилі з максимальною інтенсивністю випромінювання,
 $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ — стала Віна.

Закон Стефана–Больцмана. Згідно з даним законом, сумарна щільність теплового випромінювання q , що випромінюється абсолютно чорним тілом, зростає пропорційно четвертому ступеню його абсолютної температури.

$$q = \sigma \cdot T^4, \quad (1.5)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (\text{Вт}/\text{м}^2)/\text{К}^4$ — стала Стефана–Больцмана.

Оскільки рівняння Планка та закон Стефана–Больцмана отримані для ідеалізованого випадку абсолютно чорного тіла, температура, виміряна пірометричним методом (T_m), зазвичай є дещо нижчою за реальну температуру об'єкта (T). Для компенсації цієї різниці вводять відповідний коефіцієнт, який враховує відмінності в поглинанні та випромінюванні між реальним об'єктом і абсолютно чорним тілом.

1.4 Практичні сфери використання пірометричних приладів

На сучасному етапі розвитку вимірювальної техніки існує значна кількість різновидів пірометрів, які широко застосовуються в різних галузях діяльності. Завдяки універсальності та функціональності ці безконтактні сенсори контролю температури поверхонь набули значної популярності. Пірометри забезпечують вимірювання температур у надзвичайно широкому діапазоні — від приблизно -50 °C до $+6000$ °C — і вирізняються високою швидкістю та простотою експлуатації. Для отримання результату вимірювання достатньо спрямувати прилад на досліджуваний об'єкт і активувати вимірювальний режим, після чого миттєво відображається значення температури поверхні. Такі пристрої характеризуються високою точністю, безпечністю для оператора, а також компактними габаритами й малою масою, що забезпечує зручність їх використання.

Пірометричні прилади широко застосовуються в будівельній галузі, зокрема для виявлення теплових втрат через огорожувальні конструкції будівель, такі як

стіни, двері та вікна. Окрім цього, вони використовуються для діагностики пошкоджень покрівель і виявлення інших дефектів, що сприяє зменшенню енергоспоживання та економії матеріальних ресурсів. Пірометри також є ефективним інструментом для оцінювання працездатності систем кондиціонування й вентиляції, а у випадку аварій на теплових мережах — для оперативного визначення місць порушення теплоізоляції.

В електротехнічній сфері пірометри застосовуються для контролю температури електричного обладнання, контактних з'єднань і струмопровідних елементів. Оскільки такі об'єкти часто перебувають під напругою або в русі, безконтактний спосіб вимірювання є найбільш безпечним і доцільним. За допомогою пірометрів можна своєчасно виявляти локальні перегріви, спричинені поганими контактами, що є індикатором необхідності технічного обслуговування або ремонту.

У галузі автомобільного обслуговування пірометри використовуються для вимірювання температури різних вузлів і агрегатів, зокрема радіаторів, акумуляторних батарей та двигунів внутрішнього згоряння. Наприклад, для перевірки справності каталізатора вимірюється температура газів до та після нього, що дозволяє діагностувати можливі несправності. Крім того, контроль температури акумуляторів дає змогу оцінити їх технічний стан і працездатність.

У науково-дослідній діяльності, особливо під час експериментів з агресивними середовищами або крихкими об'єктами, пірометри забезпечують можливість виконання точних вимірювань без фізичного впливу на досліджуваний об'єкт. Це дозволяє отримувати достовірні результати, не порушуючи умов проведення експерименту.

Виробничі галузі, зокрема металургія, також широко використовують пірометри, оскільки постійний контроль температури матеріалів є критично важливим для забезпечення якості готової продукції. Застосування таких приладів сприяє зниженню енергетичних витрат та оптимізації технологічних процесів, зокрема під час термічної обробки металів.

Вони забезпечують моніторинг температурних параметрів рухомих об'єктів у режимі реального часу та дозволяють виявляти найбільш нагріті або, навпаки, охолоджені ділянки поверхонь. Таким чином, пірометри є універсальними та

надзвичайно корисними засобами контролю температури в широкому спектрі практичних застосувань [1].

1.5 Систематизація та різновиди пірометрів

Як зазначалося раніше, пірометри належать до вимірювальних приладів, призначених для безконтактного визначення температури поверхонь. Вони реєструють як видиму, так і невидиму складові електромагнітного випромінювання, що випромінюється об'єктами, на основі чого здійснюється визначення температури без безпосереднього фізичного контакту. Такі прилади застосовуються для вимірювання температури як сильно нагрітих, так і віддалених об'єктів. Далі наведено класифікацію пірометрів залежно від принципу їх функціонування.

За принципом дії пірометри поділяються на три основні групи:

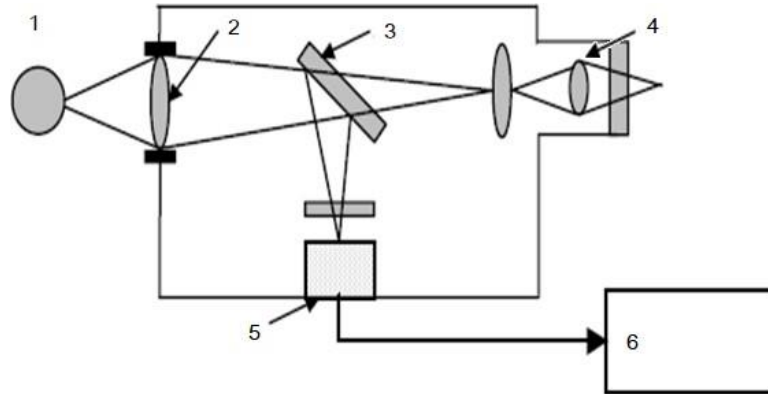
Радіаційні пірометри (або пірометри повного випромінювання) здійснюють вимірювання температури шляхом реєстрації теплового випромінювання об'єкта та визначення температури за величиною його інтенсивності. Дані прилади здатні працювати в широкому температурному діапазоні — приблизно від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$, що робить їх придатними для контролю різноманітних температурних режимів.

Яскравісні пірометри базуються на порівнянні яскравості випромінювання досліджуваного об'єкта з яскравістю нитки розжарювання, розміщеної всередині приладу. Температура визначається шляхом приведення яскравостей до однакового рівня. Такі пірометри застосовуються для вимірювання дуже високих температур у діапазоні від $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Колірні пірометри, які також називають пірометрами спектрального відношення, мультиспектральними або, відповідно до зарубіжної термінології, логометричними, здійснюють визначення температури шляхом порівняння інтенсивностей випромінювання на двох різних довжинах хвиль або в різних спектральних діапазонах. Ці прилади забезпечують вимірювання температур у межах від $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє ефективно застосовувати їх для широкого кола практичних задач [6].

1.5.1. Радіаційні методи пірометричного вимірювання температури

Пірометри даного типу є безконтактними вимірювальними пристроями, принцип роботи яких ґрунтується на реєстрації власного теплового випромінювання, що випромінюється поверхнею об'єкта.



1 – об'єкт із підвищеною температурою; 2 – оптична лінза; 3 – відбивне дзеркало; 4 – окуляр із можливістю регулювання; 5 – приймальний елемент (детектор); 6 – пристрій індикації температурних значень.

Рисунок. 1.5 – Структурна схема радіаційного пірометра

Оптична система радіаційного пірометра здійснює приймання інфрачервоного випромінювання, яке надходить від досліджуваного об'єкта (1). Далі випромінювання проходить через об'єктив (2), відбивається від дзеркала (3) та фокусується на чутливому елементі — детекторі (5). Детектор перетворює зібрану теплову енергію на електричний сигнал, який може безпосередньо відображатися на індикаторі (6) або передаватися на подальше оброблення в електронні блоки системи. Для візуального контролю та наведення на об'єкт у конструкції приладу передбачено окуляр із можливістю регулювання (4). У певних моделях вимірювальний і візуальний канали об'єднуються в єдину оптичну систему (див. рис. 1.5).

У радіаційних пірометрах застосовуються два основні типи детекторів: теплові приймачі (термобатареї) та фотонні детектори, зокрема фотоелектронні помножувачі. Слід зазначити, що фотонні детектори характеризуються значно вищою швидкістю порівняно з тепловими, що робить їх придатними для швидкісних вимірювань температури невеликих об'єктів, у тому числі тих, що перебувають у русі.

Водночас під час вимірювання температури за допомогою радіаційного

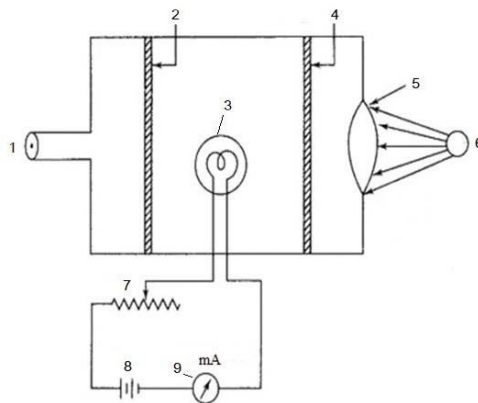
пірометра існує низка чинників, здатних впливати на точність результатів. До них належить фізичний стан поверхні об'єкта, який визначає його випромінювальні характеристики. Зниження точності вимірювань може бути спричинене особливостями поверхневої структури, наявністю захисних покриттів, іржі, накипу або інших природних утворень. Додатково на результати вимірювань негативно впливають пил, дим чи інші перешкоди в оптичному каналі між пірометром і досліджуванним об'єктом, що може призводити до виникнення додаткових похибок.

1.5.2. Оптичні пірометри яскравісного типу

Пірометри даного типу призначені для контролю температури печей, розплавлених металів, а також інших сильно нагрітих рідин і матеріалів. Узагальнену конструктивну схему такого приладу наведено на рис. 1.6. До складу пірометра входить лінза (5), яка фокусує випромінювану теплову енергію від нагрітого об'єкта (6) на електричну нитку розжарювання (3). Яскравість світіння нитки визначається величиною електричного струму, що протікає через неї.

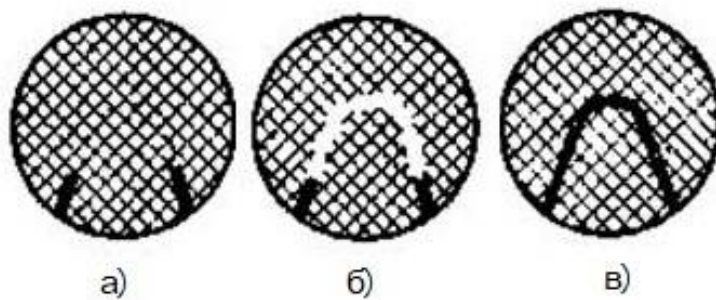
Живлення лампи розжарювання забезпечується батареєю (8), тоді як регулювання сили струму здійснюється за допомогою реостата (7), що дозволяє встановити яскравість нитки на рівні, відповідному яскравості контрольованого об'єкта. З метою збільшення робочого температурного інтервалу між об'єктивом (5) і еталонною лампою розжарювання (3) передбачено встановлення спеціального поглинального екрана (4), який зменшує інтенсивність випромінювання. Крім того, між лінзою (1) та еталонним джерелом світла розміщується червоний світлофільтр (2), який обмежує спектральний діапазон випромінювання, що підвищує точність вимірювань.

У момент, коли яскравість світіння нитки розжарювання зрівнюється з яскравістю випромінювання контрольованого об'єкта, нитка стає практично непомітною для спостерігача (рис. 1.7, а). У разі, якщо температура нитки розжарювання перевищує температуру об'єкта, вона сприймається як яскравіша (рис. 1.7, б). Якщо ж температура нитки є нижчою за необхідну для досягнення однакової яскравості, її світіння виглядає темнішим порівняно з об'єктом (рис. 1.7, в).



1 – візуальний окуляр; 2 – інфрачервоний світлофільтр; 3 – еталонне джерело світла (лампа розжарювання); 4 – світлопоглинальний екран; 5 – оптичний об’єктив; 6 – досліджуваний об’єкт; 7 – регулювальний резистор (реостат); 8 – блок живлення; 9 – вимірювач сили струму (амперметр).

Рисунок 1.6 – Функціонально-структурна схема яскравісного пірометра.



- а) температура еталонної нитки відповідає температурі досліджуваного об’єкта;
- б) температура нитки перевищує температуру об’єкта;
- в) температура нитки є нижчою за температуру об’єкта.

Рисунок 1.7 – Стан світіння нитки в яскравісному пірометрі за різних температурних співвідношень.

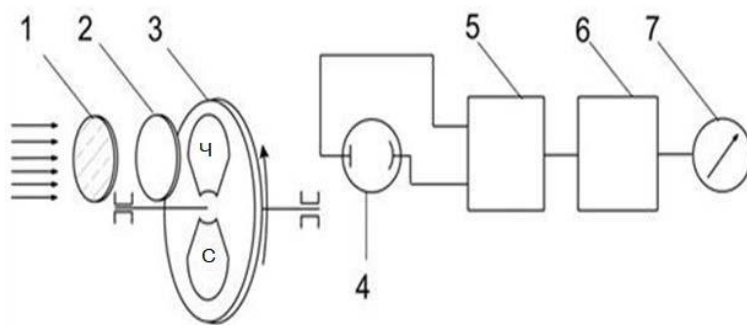
Пірометри даного типу не придатні для здійснення безперервного контролю температури протягом коротких часових інтервалів. Оскільки принцип їх роботи ґрунтується на реєстрації інтенсивності видимого випромінювання, яке випромінює об’єкт, ефективне застосування таких приладів можливе лише в області високих температур, що, відповідно до класифікації, перевищують 700 °С. Крім того, точність вимірювань яскравісними пірометрами значною мірою визначається суб’єктивним чинником, пов’язаним з особливостями зорового сприйняття оператора.

1.5.3. Пірометри, що працюють за методом спектрального співвідношення

Колірні пірометри набули широкого застосування в різних галузях промисловості, зокрема в металургії, а також у науково-дослідній діяльності для точного визначення температури об'єктів. Такі прилади оснащуються кількома приймачами випромінювання, які функціонують у різних спектральних діапазонах, забезпечуючи роботу двох або більшої кількості вимірювальних каналів. Значення температури досліджуваного об'єкта визначається шляхом оброблення сигналів, отриманих із кожного з цих каналів.

Оптичний тракт кольорового пірометра працює таким чином: інфрачервоне випромінювання, що генерується поверхнею об'єкта вимірювання, спочатку проходить крізь захисне вікно (1) та фокусувальну оптику приладу (2), після чого надходить до фоточутливого елемента (4) через обертовий обтюратор (3). У складі обтюратора розміщені світлофільтри різних спектральних діапазонів (червоний і синій), які по черзі вводяться в оптичний шлях завдяки роботі синхронного приводу, забезпечуючи почергову селекцію випромінювання за довжиною хвилі.

Змінний електричний сигнал, сформований фотоелементом, підсилюється за допомогою підсилювача (5) та надалі перетворюється в постійний струм за допомогою логарифмічного перетворювача (6). Отриманий постійний струм є пропорційним інтенсивності зареєстрованого випромінювання. Вимірювання значення струму на виході логарифмічного пристрою здійснюється за допомогою вольтметра (7). Загальну структурну схему роботи спектрального пірометра наведено на рис. 1.8.



1 – захисне скло; 2 – об'єктив; 3 – обтюратор; 4 – фотоелемент;

5 – електронний підсилювач; 6 – логарифмічний пристрій; 7 – вольтметр

Рисунок. 1.8– Структурна схема спектрального пірометра

Спектральні пірометри знайшли широке застосування в різних галузях промислового виробництва, зокрема в ливарно-прокатних процесах, де вони виконують одну з ключових функцій — контроль температурних режимів. Так, перед проведенням операцій гарячої прокатки необхідно з високою точністю регулювати температуру нагрівання металевих заготовок з метою забезпечення їх достатньої пластичності без загрози структурних пошкоджень.

Окрім забезпечення заданого температурного режиму, необхідною умовою є однорідний прогрів усього об'єму заготовки та недопущення утворення зон локального перегріву. Надмірна концентрація тепла в окремих ділянках може спричинити зниження міцнісних характеристик матеріалу та появу тріщин. Заготовки, які не досягають потрібного рівня нагрівання або, навпаки, зазнають перегріву, визнаються непридатними та виключаються з подальшого технологічного процесу.

1.5.4 Інфрачервоний безконтактний пірометр Wintact WT320 як приклад сучасного вимірювання засобу

Інфрачервоний пірометр **Wintact WT320** (рис. 1.10) являє собою компактний переносний пристрій для безконтактного визначення температури поверхонь, який забезпечує оперативні та безпечні вимірювання в діапазоні від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+380\text{ }^{\circ}\text{C}$. Даний прилад ефективно використовується для вимірювання температури об'єктів, доступ до яких є ускладненим або потенційно небезпечним, зокрема рухомих механізмів, електротехнічних компонентів, що перебувають під напругою, а також поверхонь із підвищеною температурою.

Пірометр Wintact WT320 знайшов широке застосування у промисловості, будівельній галузі, автомобільній сфері, а також у побутових умовах. Основні технічні характеристики та функціональні можливості приладу наведено в табл. 1.1 [8]. До характерних особливостей даного пірометра належать:

- **Безконтактний принцип вимірювання**, який забезпечує визначення температури на відстані, підвищуючи безпеку та зручність експлуатації.

- **Наявність лазерного вказівника**, що полегшує точне наведення приладу на контрольовану ділянку поверхні.
- **Висока швидкодія**, оскільки час відгуку становить близько 500 мс, що дозволяє практично миттєво отримувати результати вимірювань.
- **Підсвічування дисплея**, яке забезпечує можливість роботи за умов недостатнього освітлення.
- **Функція автоматичного вимкнення**, що сприяє економному використанню енергоресурсу батареї у періоди простою.



Рисунок 1.10 – Wintact WT320 зовнішній вигляд.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики Wintact WT320

Інтервал вимірюваних температур	від -50 °C до 380 °C
Гранична похибка вимірювання	не більше $\pm 1.5\%$ або ± 1 °C
Крок індикації температури	0.1 °C
Оптичне співвідношення (відстань/пляма)	12:1
Швидкодія приладу	0,5с
Діапазон сприйняття випромінювання	8–14 <u>мкм</u>
Коефіцієнт випромінювання	Встановлено фіксовано на рівні 0.95
Лазерне наведення	передбачене конструкцією
Підсвітка індикатора	присутня
Тип живлення	дві батареї формату AAA
Допустима температура експлуатації	Від 0 °C до 50 °C
<u>абаритні розміри</u>	153 × 101 × 43 мм
Маса пристрою	150 г

1.5.5. Fluke 62 MAX

Fluke 62 MAX — це компактний інфрачервоний термометр, розрахований на роботу в жорстких умовах і призначений для дистанційного контролю температури поверхонь. Пристрій оснащений лазерним покажчиком, який полегшує точне позиціонування зони вимірювання, а міцний ударостійкий корпус із захистом від пилу та вологи забезпечує надійну експлуатацію навіть у складному виробничому середовищі. Fluke 62 MAX зарекомендував себе як ефективний засіб для оперативного та безпечного контролю температури в різних сферах застосування, зокрема в промисловості, будівництві та системах опалення, вентиляції й кондиціонування повітря (HVAC). Завдяки поєднанню надійної конструкції та високих експлуатаційних характеристик прилад придатний для використання в складних і жорстких умовах експлуатації.

Зовнішній вигляд інфрачервоного термометра Fluke 62 MAX наведено на рис. 1.11.



Рисунок 1.11 – Fluke 62 MAX

Прилад забезпечує вимірювання температури в широкому інтервалі від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Похибка вимірювань становить $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 1,5\%$ від показів у діапазоні температур навколишнього середовища від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. За нижчих ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) або вищих ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур умов експлуатації похибка зростає відповідно до $\pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Оптична система приладу характеризується співвідношенням відстані до діаметра вимірювальної плями 10:1, що забезпечує достатню точність наведення. Коефіцієнт випромінювання може регулюватися в межах від 0,10 до 1,00, що дозволяє адаптувати прилад до різних типів поверхонь.

Час реакції термометра не перевищує 500 мс, а робочий спектральний діапазон інфрачервоного випромінювання становить 8–14 мкм. Для точного прицілювання використовується одинарний лазерний промінь. Результати вимірювань відображаються на підсвічуваному рідкокристалічному дисплеї.

Живлення здійснюється від однієї батареї типу AA. Прилад розрахований на роботу в температурному діапазоні від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносній вологості повітря від 10 % до 90 % без утворення конденсату. Корпус відповідає класу захисту IP54, що забезпечує стійкість до пилу й бризок води, а також витримує падіння з висоти до 3 м.

Габаритні розміри пристрою складають $175 \times 85 \times 75$ мм, маса разом із елементом живлення — 255 г.

1.6 Постановка задачі на магістерську роботу

Подальший аналіз доцільно зосередити на пірометрах спектрального відношення, які широко застосовуються у промислових системах контролю та в науково-дослідних роботах. Їх популярність зумовлена сукупністю важливих переваг, що забезпечують надійність і точність вимірювань у складних умовах експлуатації.

Разом із тим зазначені прилади мають певні недоліки, серед яких однією з ключових є їхня відносно висока вартість. Крім того, випромінювальні властивості багатьох матеріалів суттєво змінюються зі зростанням температури, що проілюстровано на рис. 1.9.

Для отримання достовірних результатів вимірювання температури таких об'єктів необхідно виконати детальний аналіз стану їх поверхні та встановити залежності між коефіцієнтом випромінювання, температурою, спектральною довжиною хвилі та фізичними параметрами матеріалу. Реалізація цього підходу ґрунтується на використанні спеціалізованих алгоритмів обробки вимірювальної інформації, які забезпечують коректне співставлення інтенсивностей теплового випромінювання на різних довжинах хвиль із температурними характеристиками об'єкта дослідження [7].

Крім того, точність температурних вимірювань може погіршуватися у випадках, коли в полі зору спектрального пірометра присутнє середовище, частинки якого мають розміри, порівнянні з довжиною хвилі реєстрованого випромінювання, що призводить до додаткового розсіювання та спотворення сигналу.

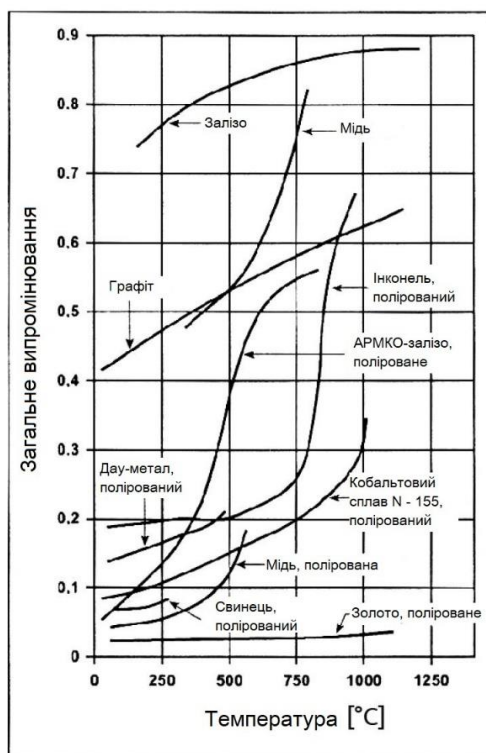


Рисунок 1.9 – Зміна значення коефіцієнта випромінювання залежно від температурного режиму об’єкта

Незважаючи на наявні обмеження, пірометри, що працюють за методом спектрального відношення, характеризуються високою ефективністю в умовах багатьох виробничих процесів і забезпечують отримання достовірних результатів вимірювання температури. У низці практичних ситуацій саме цей метод виявляється найбільш доцільним, а інколи й єдино можливим способом забезпечення точної температурної оцінки об’єктів.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Опис принципу функціонування пірометричного вимірювального приладу

На початковому етапі розглянемо принцип функціонування пірометра. Принцип роботи даного пірометричного пристрою базується на взаємодії двох основних складових — оптичної системи та спектрального аналізатора. Суть методу полягає у визначенні температури об'єкта шляхом аналізу спектральних характеристик випромінювання, яке він випромінює.

Процес функціонування пірометра включає такі основні етапи:

Приймання оптичного сигналу — оптична система приладу збирає та фокусує випромінювання, що надходить від поверхні об'єкта, і спрямовує його на чутливий елемент датчика.

Оброблення інформації — отриманий сигнал підлягає аналізу за допомогою мікроконтролера, який виконує попередню обробку та перетворення даних.

Обчислення температури — на основі спектрального аналізу випромінювання температура об'єкта визначається з використанням відповідних математичних розрахунків.

2.2 Блокова організація пірометра

На рис. 2.1 наведено структурну схему неконтактного пірометра, яка відображає основні функціональні вузли типової сканувальної системи теплового контролю. Подана схема ілюструє ключові елементи, що забезпечують виконання основних вимірювальних і обчислювальних операцій. Залежно від конструктивних особливостей конкретної системи окремі функції можуть бути поєднані в одному модулі або, навпаки, реалізовані окремо, оскільки існує значна кількість варіантів їх практичного виконання.

До складу структурної схеми входять такі основні елементи:

1. **Дисплей** — призначений для відображення результатів вимірювання та супутньої інформації в режимі реального часу.

2. **Мікроконтролер** — виконує функції керування роботою пірометра, оброблення вимірювальних даних і реалізації алгоритмів розрахунку температури.

3. **Датчик температури** — здійснює реєстрацію теплового випромінювання об'єкта та перетворення його в електричний сигнал.

4. **Об'єкт вимірювання** — поверхня або тіло, температура якого підлягає контролю.

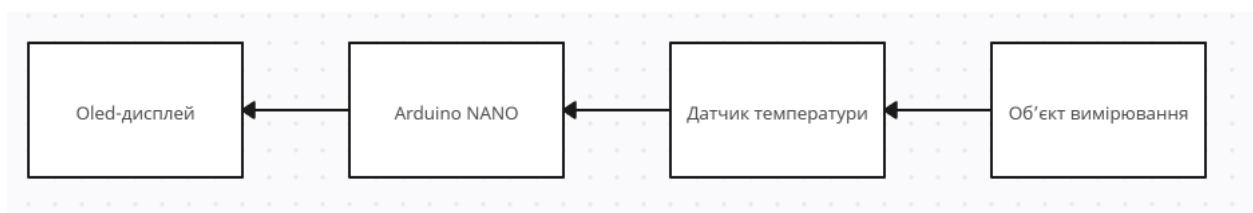


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна модель пірометра

2.3 Електрична принципова схема пірометричної системи

На рис. 2.2 наведено фізичну модель утворення вимірювального сигналу в системах тепловізійного контролю, зокрема в інфрачервоному пірометрі [10]. Дана модель ілюструє основні фізичні процеси, що лежать в основі перетворення теплового випромінювання об'єкта на вимірювальний сигнал.

Фізична модель ґрунтується на явищі теплового випромінювання тіл. Відомо, що всі об'єкти, температура яких перевищує абсолютний нуль, є джерелами електромагнітного випромінювання, значна частина якого припадає на інфрачервоний діапазон. Інтенсивність інфрачервоного випромінювання безпосередньо пов'язана з температурою тіла, що дозволяє реєструвати його за допомогою засобів теплового бачення.

Ключовим теоретичним положенням, яке лежить в основі фізичної моделі вимірювання температури в тепловізійних системах, є закон Стефана–Больцмана. Згідно з цим законом інтенсивність теплового випромінювання тіла в інфрачервоному спектральному діапазоні є пропорційною четвертому степеню його абсолютної температури. Таким чином, зі зростанням температури

випромінювальна здатність тіла збільшується за нелінійним, різко зростаючим характером.

У тепловізійних камерах чутливість до інфрачервоного випромінювання забезпечується застосуванням спеціальних матеріалів, здатних ефективно поглинати ІЧ-випромінювання та змінювати свої фізичні або оптичні властивості залежно від температури. Такі матеріали, які зазвичай називають термочутливими або матеріалами зі змінною оптичною щільністю, розміщуються на матричному приймачі. Це дозволяє формувати зображення, яке відображає просторовий розподіл температури на поверхні досліджуваного об'єкта.

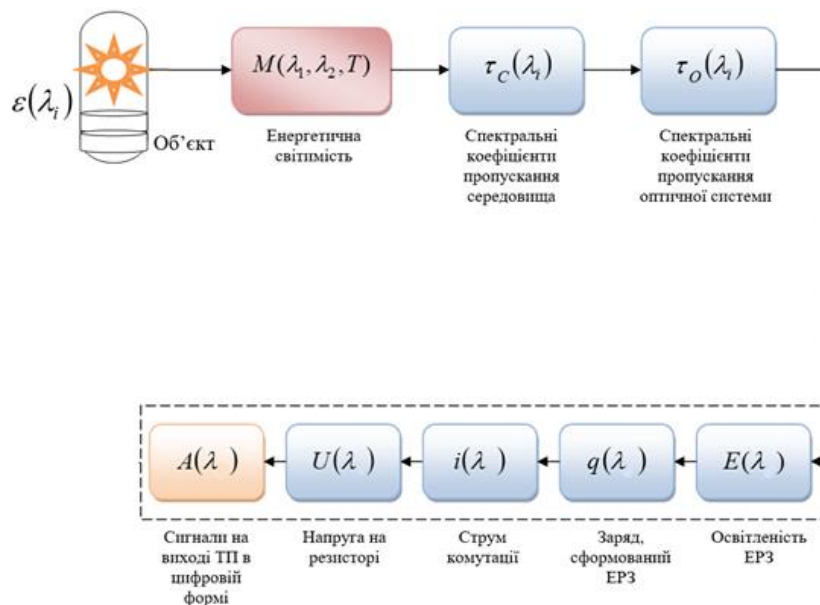


Рисунок 2.2 – Фізична схема формування вимірювального сигналу в безконтактному інфрачервоному пірометрі

На рис. 2.3 представлено електричну принципову схему розробленого приладу, яка відображає склад і взаємозв'язок основних апаратних компонентів системи. До її складу входять такі елементи:

1. **Мікроконтролер Arduino Nano (U1)** виконує функцію центрального керувального елемента системи та забезпечує координацію роботи всіх підключених пристроїв. До Arduino Nano під'єднані:

- **Графічний дисплей LCD 128×64**, який підключається за допомогою ліній SDA та SCL для обміну даними й синхронізації. Живлення дисплея здійснюється через виводи Vcc (+5 V) та GND.

- **Датчик температури (E1)**, який також використовує лінії SDA та SCL для передавання вимірювальної інформації. Електроживлення датчика подається з виходів Vcc (+5 V) і GND.

2. **Датчик температури (E1)** працює за протоколом I²C та передає дані безпосередньо до Arduino Nano через відповідні контакти SDA і SCL. Живлення датчика здійснюється від стабілізованої напруги +5 V.

3. **Дисплей LCD 128×64** використовується для відображення поточних значень температури та допоміжної інформації. Передавання даних на дисплей здійснюється через інтерфейс I²C, а живлення подається безпосередньо з Arduino Nano через лінії Vcc (+5 V) та GND.

4. **Світлодіодний індикатор (H1)** з обмежувальним резистором (R2) застосовується для індикації стану роботи системи, зокрема сигналізації активності або виникнення помилок. Світлодіод підключений до цифрового виводу Arduino Nano через резистор R2, який обмежує струм і запобігає пошкодженню елемента.

5. **Кнопка керування (S1)** призначена для ручного введення команд користувачем, наприклад для перемикання режимів роботи або перезапуску системи. Кнопка під'єднана до відповідного цифрового входу мікроконтролера.

6. **Конектор Type-C (X1)** забезпечує живлення всієї системи від зовнішнього джерела через лінії Vbus (+5 V) та GND.

7. **Батарейний модуль (GB1)** використовується як додаткове джерело автономного живлення системи та підключається до загальних ліній живлення Vcc і GND.

Подана електрична схема є базою для реалізації системи безконтактного вимірювання температури. Інфрачервоний датчик здійснює збирання температурних даних, які обробляються мікроконтролером Arduino Nano. Результати вимірювань виводяться на дисплей, а поточний стан роботи системи індикуюється світлодіодом. Кнопка керування дозволяє змінювати режими роботи

або виконувати основні дії, тоді як живлення системи може здійснюватися як через порт Type-C, так і від автономного батарейного модуля.

Розглянута апаратна реалізація характеризується такими особливостями:

- **компактністю конструкції**, що досягається завдяки використанню мікроконтролера Arduino Nano;
- **можливістю автономної роботи**, забезпеченою наявністю батарейного модуля.

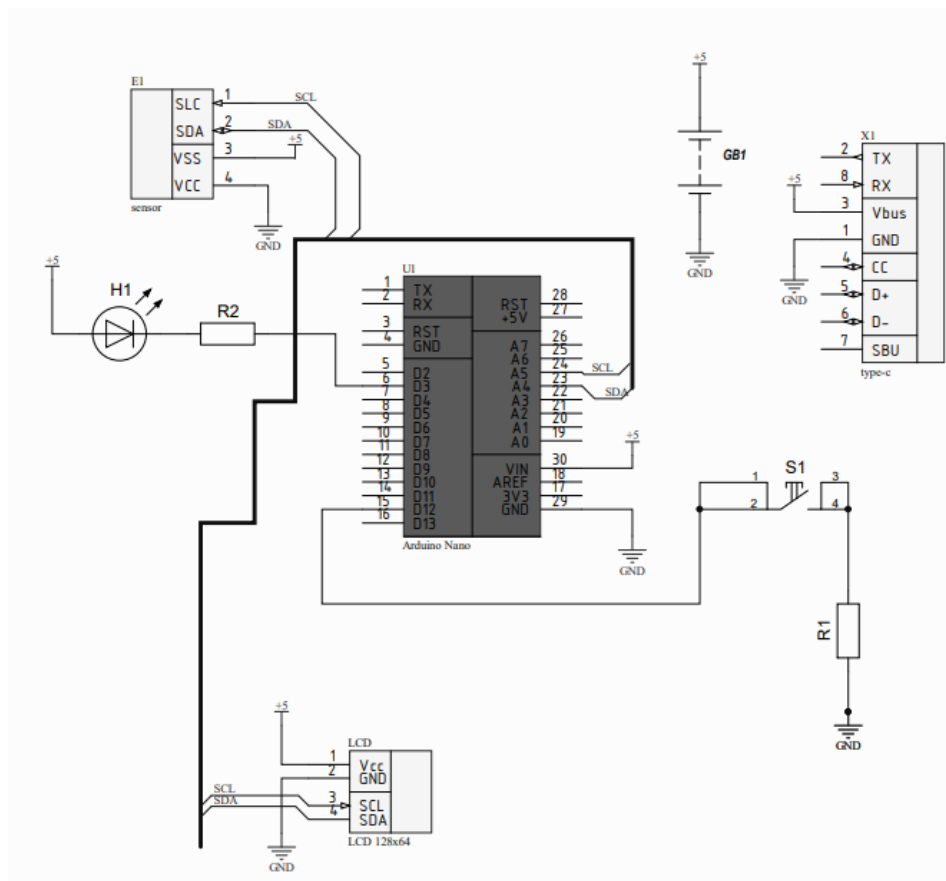


Рисунок 2.3 – Принципова електрична схема розробленого вимірювального пристрою

2.4 Проектування та обґрунтування функціональної схеми пристрою

У попередньому розділі було представлено базову структурну схему спектрального пірометра (рис. 1.8), робота якого ґрунтується на послідовній зміні

світлофільтрів для виділення окремих спектральних діапазонів випромінювання. Такий підхід передбачає використання механічних рухомих компонентів, що негативно впливає на надійність пристрою та обмежує тривалість його безперебійної експлуатації. Окрім цього, функціональні можливості розглянутої схеми є недостатніми та не повністю відповідають сучасному рівню розвитку безконтактних вимірювальних технологій.

З огляду на зазначені недоліки було запропоновано та розроблено нову функціональну схему пірометра, яка позбавлена рухомих елементів і характеризується розширеним функціоналом. Запропоноване рішення забезпечує впровадження додаткових можливостей та відповідає актуальним вимогам до сучасних систем безконтактного вимірювання температури (рис. 2.4).

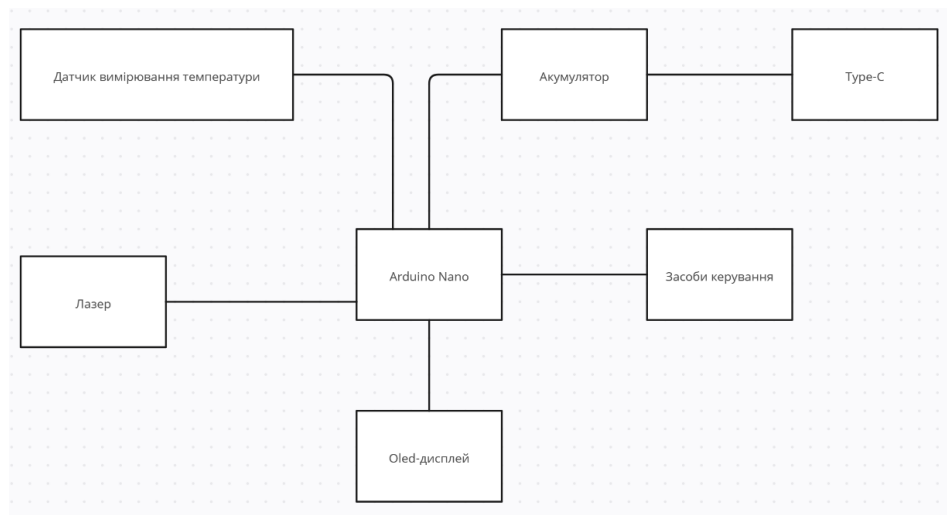


Рисунок 2.4 – Функціональна схема пірометра

2.5 Підбір компонентів

Проектування пірометра є складним і багатокомпонентним процесом, який передбачає ретельний добір та узгоджену інтеграцію основних елементів з метою забезпечення надійної, стабільної та точної роботи вимірювального пристрою. Оскільки пірометри призначені для безконтактного визначення температури об'єктів у широкому діапазоні умов експлуатації, до їх складових висуваються підвищені вимоги щодо точності, надійності та функціональності.

Етап вибору компонентів є одним із ключових у процесі розроблення, оскільки він безпосередньо впливає на продуктивність системи, стабільність її роботи, довговічність пристрою та достовірність результатів вимірювань. Основою

для такого вибору є аналіз технічних вимог до пірометра, зокрема необхідного температурного діапазону, чутливості, роздільної здатності, швидкодії, а також умов експлуатації, серед яких можуть бути запиленість, підвищена вологість або вплив агресивних середовищ.

Особливу увагу приділяють підбору оптичних компонентів, що забезпечують формування та фокусування інфрачервоного випромінювання, сенсорів, які виконують перетворення теплової енергії в електричний сигнал, електронних модулів для оброблення вимірювальної інформації, а також засобів передавання та відображення результатів вимірювань.

Крім того, важливим аспектом є забезпечення сумісності обраних елементів між собою, їх надійності, енергоефективності та простоти інтеграції в загальну конструкцію пірометра. Такий підхід дозволяє гарантувати стабільність і точність вимірювань у реальних умовах експлуатації, незалежно від температурних коливань, наявності зовнішніх перешкод або специфічних характеристик об'єкта вимірювання.

Основною метою добору компонентів є створення вимірювального пристрою, який відповідає сучасним вимогам щодо точності та функціональних можливостей, забезпечує зручність користування й тривалий термін служби, а також має оптимальні експлуатаційні характеристики для застосування в заданих умовах. У цьому розділі розглядаються основні принципи та підходи до вибору ключових елементів пірометра.

2.5.1 Arduino Nano

Як основний керувальний елемент пірометра було обрано мікроконтролер **Arduino Nano**, що зумовлено його малими габаритами, достатнім рівнем обчислювальних ресурсів та широкими можливостями інтеграції з іншими апаратними модулями. Сукупність його технічних і експлуатаційних характеристик робить даний контролер доцільним рішенням для розроблення вимірювальних пристроїв такого типу.

До основних переваг Arduino Nano належать:

1. **Малі розміри та простота інтеграції.** Компактне виконання плати дозволяє створювати портативні та малогабаритні пірометри, що є особливо важливим для застосувань у польових умовах або при монтажі в обмеженому просторі.

2. **Достатня обчислювальна продуктивність.** Контролер побудований на базі мікроконтролера ATmega328P з тактовою частотою 16 МГц та обсягом флеш-пам'яті 32 КБ, що забезпечує реалізацію алгоритмів обробки сигналів від температурних датчиків, а також керування іншими функціональними модулями пірометра.

3. **Гнучкі можливості підключення.** Arduino Nano оснащений 22 цифровими та аналоговими входами/виходами, що спрощує підключення температурних сенсорів, оптичних модулів, дисплеїв для відображення результатів вимірювань, а також модулів бездротового зв'язку, зокрема Bluetooth або Wi-Fi.

4. **Низьке енергоспоживання.** Завдяки енергоефективній архітектурі контролер придатний для використання в автономних пристроях, що живляться від батарей або акумуляторів, забезпечуючи тривалий час роботи без необхідності частого заряджання.

5. **Доступність і широка підтримка.** Arduino Nano є одним із найбільш поширених мікроконтролерних модулів, для якого доступна велика кількість програмних бібліотек, технічної документації та прикладів програмного коду, що суттєво спрощує процес розроблення програмного забезпечення.

6. **Сумісність із температурними датчиками.** Контролер підтримує безпосередню роботу як з цифровими, так і з аналоговими датчиками температури, зокрема з інфрачервоними сенсорами типу MLX90614, а також з термopарами при використанні спеціалізованих підсилювачів і перетворювачів, таких як MAX6675, що є важливою умовою для реалізації пірометричних вимірювань.

7. **Можливість розширення функціональних можливостей.** Модульна архітектура Arduino Nano дозволяє без суттєвих змін апаратної частини інтегрувати додаткові функції, зокрема збереження даних на SD-карті, передавання інформації

за допомогою модулів LoRa або організацію керування пристроєм через мобільні застосунки.

Основні технічні характеристики Arduino Nano наведено в табл. 2.1 [11], а його зовнішній вигляд подано на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд Arduino nano

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики Arduino Nano

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Тактова частота	16 МГц
Пам'ять <u>Flash</u>	32 КБ (2 КБ зайнято завантажувачем)
Оперативна пам'ять (SRAM)	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Кількість цифрових <u>пінів</u> вводу/виводу	14 (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи)
Кількість аналогових входів	8
Напруга живлення	5 В (через USB) або 7-12 В (через роз'єм <u>Vin</u>)
Робоча напруга	5 В
Струм через один цифровий <u>пін</u>	Максимум 40 <u>мА</u>
Максимальний струм для 3.3 В	50 <u>мА</u>
Підключення USB	<u>Mini-USB</u>
Розміри	18 мм × 45 мм
Вага	~7 г
Кількість апаратних UART/USART	1

Продовження таблиці 2.1

Кількість апаратних I ² C	1
Кварцовий резонатор	16 МГц
Сумісність з напругою на входах	5 В
Середовище програмування	<u>Arduino IDE</u>
Тип роз'ємів вводу/виводу	Під пайку або макетну плату

2.5.2 MLX90614

Для реалізації безконтактного вимірювання температури в розроблюваному пірометрі було обрано інфрачервоний термометр **MLX90614**, який є високоточним цифровим температурним сенсором. Доцільність такого вибору обумовлена

сукупністю його технічних та експлуатаційних характеристик, що забезпечують ефективне застосування в пірометричних системах.

Основні переваги використання датчика MLX90614 полягають у наступному:

1. **Безконтактний принцип вимірювання температури.** MLX90614 здійснює визначення температури об'єктів на основі аналізу їх інфрачервоного теплового випромінювання, що дозволяє виконувати вимірювання на відстані. Такий підхід є особливо важливим у випадках, коли прямий контакт з об'єктом неможливий або небезпечний, наприклад, при роботі з нагрітими поверхнями чи рухомими елементами.

2. **Широкий температурний діапазон.** Датчик підтримує вимірювання температури об'єктів у межах від $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+380\text{ }^{\circ}\text{C}$, що робить його універсальним рішенням для використання в промислових, медичних та побутових застосуваннях.

3. **Висока точність вимірювань.** У температурному інтервалі від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ MLX90614 забезпечує точність до $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є важливою вимогою для створення надійного та точного пірометра.

4. **Низька енерговитрата.** Завдяки енергоефективній архітектурі MLX90614 добре підходить для автономних систем із батарейним живленням. Середнє споживання струму становить близько $1,5\text{ мА}$, що забезпечує тривалий час безперервної роботи пірометра.

5. **Автоматична температурна компенсація.** Сенсор оснащений вбудованою системою корекції впливу температури довкілля, що забезпечує сталість і високу достовірність результатів вимірювань незалежно від змін зовнішніх умов.

6. **Стійкість до зовнішніх завад.** Датчик забезпечує надійну та стабільну роботу навіть у складних експлуатаційних умовах, зокрема за наявності пилу, вологи або електромагнітних перешкод.

7. **Поширеність і доступність.** Завдяки широкому використанню MLX90614 є легко доступним на ринку, а також добре підтримується у вигляді документації, прикладів коду та бібліотек.

Основні технічні характеристики інфрачервоного датчика MLX90614 наведено в табл. 2.2 [12], а його зовнішній вигляд подано на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд MLX9061

Таблиця 2.2 – Характеристики MLX9061

Принцип роботи	Інфрачервоний термометр (теплове випромінювання)
Діапазон вимірюваних температур об'єктів	-70 °C до +380 °C
Діапазон вимірюваних температур навколишнього середовища	-40 °C до +125 °C
Точність вимірювання	±0,5 °C (в діапазоні 0 °C – +50 °C)
Роздільна здатність	0,02 °C
Тип виходу	PWM (цифровий вихід, період 10 мс – 1 с) I ² C (стандартний протокол, до 100 кГц)
Робоча напруга	3,3 В – 5 В
Струм споживання	~1,5 мА (активний режим)
Форма випромінювального поля (FOV)	35° (стандартна версія)
Час відгуку	100 мс
Інтегрована термокомпенсація	Так
Калібрування	Здійснюється на заводі-виробнику, забезпечує високу точність і стабільність вимірювань
Матеріал лінзи	Германій або кремній (для пропускання інфрачервоного випромінювання)
Інтегрований аналого-цифровий перетворювач (АЦП)	Так
Розміри	~8 мм × 8 мм × 5 мм (залежно від моделі)
Тип корпусу	ТО-39 (металевий корпус для забезпечення стабільної роботи і захисту від перешкод)
Діапазон робочих частот для I ² C	10 – 100 кГц
Температурна стабільність	±0,02 °C/°C

2.5.3 Рідкокристалічний дисплей

Для відображення результатів вимірювань і службової інформації в розроблюваному пристрої було обрано **OLED-дисплей** діагоналлю **0,96 дюйма з роздільною здатністю 128 × 64 пікселі**. Підключення та обмін даними з даним модулем здійснюються за допомогою інтерфейсу I²C, що спрощує інтеграцію дисплея з мікроконтролером та зменшує кількість задіяних з'єднувальних ліній.

На відміну від рідкокристалічних дисплеїв (LCD), OLED-екран не потребує окремої системи підсвічування, оскільки кожен світлодіод випромінює світло самостійно. Це сприяє зниженню енергоспоживання пристрою та підвищенню його

енергоефективності, що є особливо важливим для автономних систем із батарейним живленням.

Зовнішній вигляд обраного OLED-дисплея наведено на рис. 2.7.

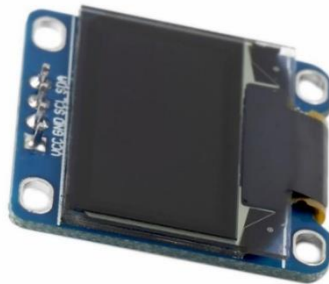


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд OLED-дисплея

Обраний OLED-дисплей характеризується високою контрастністю зображення, що забезпечує зручне зчитування відображуваної інформації навіть за умов інтенсивного зовнішнього освітлення. Завдяки малим габаритним розмірам його доцільно використовувати в компактних вимірювальних пристроях з обмеженим внутрішнім простором.

Дисплей здатний стабільно функціонувати за температур навколишнього середовища до 70 °С, а широкий кут огляду, який становить близько 160°, забезпечує хорошу видимість зображення під різними кутами. Керування роботою дисплея здійснюється за допомогою вбудованого контролера **SSD1306**, який широко застосовується в подібних графічних модулях.

Основні технічні характеристики OLED-дисплея наведено в табл. 2.3 [13].

Таблиця 2.3 – Характеристики дисплея

Характеристики	Параметри
Формат відображення	128 x 64 пікселів
Інтерфейс	I2C
Кут огляду	>160°
Розмір діагоналі	0.96 дюйма
Колір	монохромний
Розмір пікселя	0,154 * 0,154 мм
Шаг <u>пікселів</u>	0,17 * 0,17 мм

Продовження таблиці 2.3

Яскравість	120 кд /м ²
Коефіцієнт контрастності	2000:1
Напруга живлення	3 ... 5 В
Драйвер	SSD1306
Енергоспоживання	0,08 Вт
Габаритні розміри	ширина: 25 мм висота: 25 мм товщина: 11 мм
Вага	4 г
Робоча температура	-30°C ... +80°C

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИПРОМІНЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Теоретичні засади пірометричного вимірювання температури

У системах безконтактного контролю температури одним із ключових параметрів, що визначає точність вимірювань, є правильний вибір та задання коефіцієнта випромінювання досліджуваного матеріалу. Цей параметр відображає здатність поверхні об'єкта випромінювати теплову енергію відносно абсолютно чорного тіла. Оскільки коефіцієнт випромінювання змінюється залежно від фізичних властивостей матеріалу, температури та стану поверхні, його коректне визначення є необхідною умовою для отримання достовірних результатів безконтактного вимірювання температури [14].

Метою даного розділу є виконання експериментальних досліджень, спрямованих на визначення коефіцієнтів випромінювання матеріалів із різними типами поверхонь у широкому діапазоні температур. Для проведення експериментів використовується система безконтактного вимірювання температури, розроблена в попередніх розділах роботи, яка базується на сучасних пірометричних методах. У роботі [15] наведено результати досліджень, що підтверджують суттєвий вплив випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійних методів вимірювання температури.

У межах цього розділу розглянуто такі основні аспекти:

Методика виконання вимірювань. У цьому підрозділі викладено теоретичні засади визначення коефіцієнта випромінювання, що ґрунтуються на фундаментальних законах теплового випромінювання. Окрему увагу приділено аналізу залежності цього параметра від природи матеріалу, технології обробки його поверхні та її фактичного стану. Описуються експериментальні умови, що забезпечують підвищену точність вимірювань.

Вибір та характеристика матеріалів. Для досліджень обрано декілька груп матеріалів із різними фізичними властивостями, зокрема метали, полімери та кераміку. Наведено їхні основні характеристики, включаючи структуру, тип поверхні (гладка, шорстка, полірована тощо) та можливий вплив зовнішніх чинників.

Процес експериментальних вимірювань. Детально викладено послідовність проведення дослідів із використанням розробленої системи безконтактного вимірювання температури. Окрему увагу приділено калібруванню вимірювального приладу, встановленню необхідних параметрів і збору експериментальних даних.

Оцінка впливу коефіцієнта випромінювання на точність вимірювань. Проаналізовано, як правильний і помилковий вибір коефіцієнта випромінювання відбивається на точності безконтактного визначення температури. На основі отриманих результатів наведено практичні поради щодо коректного врахування цього параметра під час реального використання пірометричних вимірювальних систем.

Згідно з фундаментальними положеннями теплового випромінювання, сформульованими у законі Стефана–Больцмана [16], кожен фізичний об'єкт, що має температуру вище абсолютного нуля, є джерелом теплової енергії. Інтенсивність цього випромінювання R визначається абсолютною температурою поверхні тіла T і зростає пропорційно четвертому степеню цієї температури. Кількісний зв'язок між випромінюваною енергією та температурою задається сталою величиною σ , відомою як стала Стефана–Больцмана. Для ідеалізованого випадку абсолютно чорного тіла залежність випромінювальної здатності описується відповідним математичним співвідношенням:

$$R = \sigma \cdot T^4, \quad (3.1)$$

де $\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — стала Стефана–Больцмана.

Закон Стефана–Больцмана сформульовано для ідеалізованої моделі абсолютно чорного тіла, яке є досконалим поглиначем випромінювання з коефіцієнтом поглинання, що дорівнює одиниці. Проте в реальних умовах досягти властивостей абсолютно чорного тіла практично неможливо. Для реальних матеріалів коефіцієнт поглинання завжди є меншим за одиницю, що означає меншу кількість поглинутої та, відповідно, випромінюваної енергії порівняно з чорним тілом.

З метою спрощення практичного застосування закону Стефана–Больцмана вводиться поняття сірого тіла. Сіре тіло є узагальненою моделлю реальних об'єктів, яка дозволяє більш точно описати процеси поглинання та випромінювання теплової енергії. Для цього в рівняння Стефана–Больцмана вводять додатковий

коефіцієнт[17]. У випадку сірого тіла рівняння набуває вигляду:

$$R_e = k \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (3.2)$$

де k — параметр, що характеризує випромінювальні властивості матеріалу та відображає частку теплової енергії, яку поверхня здатна поглинати й, відповідно, випромінювати. Цей коефіцієнт також відомий як коефіцієнт емісії або монохроматична поглинальна здатність матеріалу.

3.2 Фізичні принципи вимірювання температури пірометричними методами

Формування вимірювального сигналу в пірометричних системах базується на сприйнятті теплового випромінювання, яке генерується поверхнею об'єкта вимірювання. За допомогою оптичних елементів це випромінювання збирається, просторово обмежується та спрямовується на чутливий інфрачервоний сенсор, де відбувається його перетворення в електричний сигнал, придатний для подальшої обробки та аналізу.

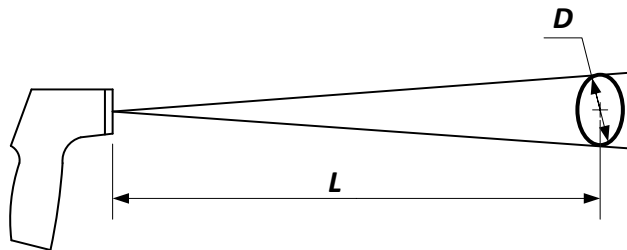


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення оптичної роздільної здатності пірометра

Одним із визначальних чинників стабільної та точної роботи пірометра є його оптична роздільна здатність. Цей параметр характеризується співвідношенням між відстанню L від приладу до об'єкта вимірювання та діаметром D ділянки поверхні, з якої здійснюється реєстрація теплового випромінювання (рис. 3.1). Відповідно, чим більшим є значення оптичної роздільної здатності, тим на більшій дистанції пірометр може забезпечувати коректні та точні температурні вимірювання.

Збільшення значення цього параметра досягається шляхом удосконалення оптичної системи пірометра, зокрема за рахунок застосування якісніших об'єктивів та оптимізації фокусувальних елементів [18].

За допомогою оптичної системи приладу енергія теплового випромінювання, що надходить від об'єкта вимірювання, фокусується та спрямовується на інфрачервоний сенсор пірометра, як показано на рис. 3.2.

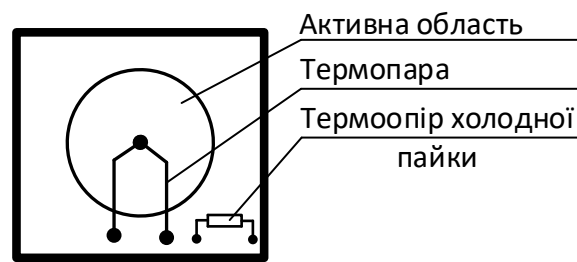


Рисунок 3.2 ІЧ давач пірометра

Сучасні пірометричні сенсори зазвичай реалізуються у вигляді мініатюрної термопари, на чутливу область якої спрямовується теплове випромінювання від досліджуваного об'єкта. Окрім елемента, що безпосередньо реєструє інфрачервоне випромінювання, у складі пірометричного датчика передбачено додатковий температурний сенсор, призначений для вимірювання температури навколишнього середовища. Це дозволяє здійснювати компенсацію впливу зовнішніх температурних чинників і підвищувати точність вимірювань. Крім того, пірометричний давач оснащується оптичним фільтром, який обмежує проходження випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах спектра [19].

Якби всі об'єкти випромінювали теплову енергію однаковою мірою, похибка пірометра визначалася б виключно точністю його калібрування. Проте в реальних умовах різні матеріали характеризуються різними випромінювальними властивостями. У зв'язку з цим для забезпечення точного визначення температури поверхні об'єкта необхідно достовірно знати значення його коефіцієнта випромінювання.

3.3 Коефіцієнт випромінювання

Оскільки різні матеріали характеризуються різними значеннями коефіцієнта випромінювання, цей параметр необхідно обов'язково враховувати під час

виконання температурних вимірювань за допомогою пірометра. У більшості випадків калібрування пірометрів здійснюється на етапі виробництва або в метрологічних лабораторіях із використанням абсолютно чорного тіла (АЧТ) з коефіцієнтом випромінювання, що наближається до 99,9 %, який для практичних розрахунків приймають рівним одиниці. Після цього в пам'ять приладу задають значення коефіцієнта випромінювання реального об'єкта, яке, як правило, є меншим за одиницю і часто приймається на рівні 0,95. Слід зазначити, що існують моделі пірометрів, у яких передбачена можливість ручного встановлення значення коефіцієнта випромінювання [20].

Водночас коефіцієнт випромінювання істотно залежить не лише від типу матеріалу поверхні об'єкта, але й від її стану, зокрема шорсткості, наявності забруднень, оксидних плівок, іржі тощо. У разі некоректного визначення або задання цього параметра похибка вимірювання температури може досягати десятків градусів.

Таким чином, правильне визначення та врахування коефіцієнта випромінювання є важливою умовою підвищення достовірності та точності безконтактних температурних вимірювань.

3.4 Розрахунок і встановлення скоригованого коефіцієнта випромінювання

Загалом коригування значення коефіцієнта випромінювання є необхідним лише у випадках, коли інтенсивність інфрачервоного випромінювання від поверхні об'єкта зменшується або спотворюється певним чином [21]. До таких ситуацій, зокрема, належать:

- **невідповідність коефіцієнта випромінювання матеріалу об'єкта значенню, яке задане в налаштуваннях пірометра;**
- **наявність між датчиком і об'єктом ІЧ-прозорого матеріалу, коефіцієнт пропускання якого завжди є меншим за одиницю, що призводить до зменшення енергії випромінювання, яка потрапляє на сенсор.**

Для визначення скоригованого значення коефіцієнта випромінювання необхідно виконати відповідну процедуру, попередньо переконавшись, що в налаштуваннях пірометра встановлено початкове значення коефіцієнта випромінювання, яке дорівнює одиниці.

4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ

4.1 Опис умов вимірювання температур твердих об'єктів

Для дослідження функціонування розробленого пірометра було використано експериментальну установку, основним елементом якої є металевий зразок, що підлягає нагріванню. Як джерело теплової енергії в установці застосовується полум'я, утворене внаслідок згоряння природного газу. Схематичне зображення експериментальної установки наведено на рис. 4.1.

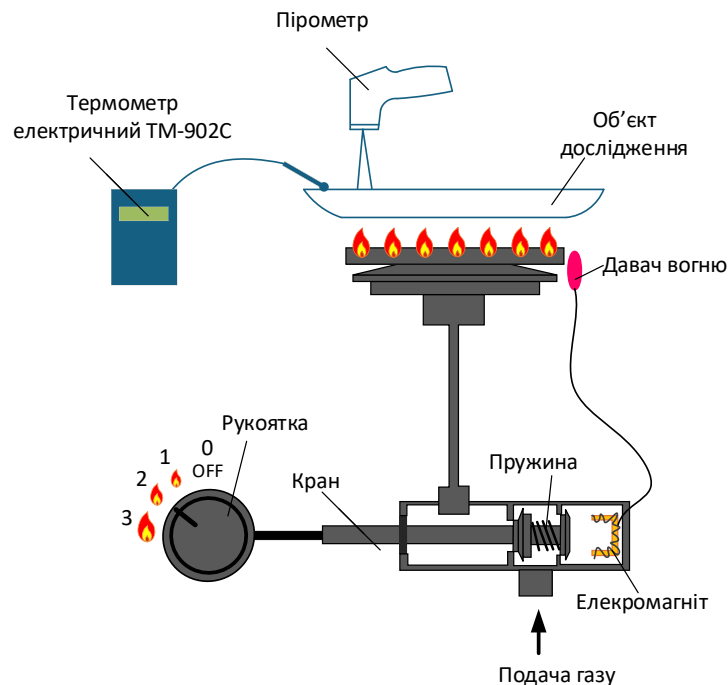


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення експериментальної установки для нагрівання досліджуваного об'єкта

Для контролю правильності показів створеного пірометра як опорний вимірювальний засіб було використано контактний термометр TM-902C. Робота цього приладу ґрунтується на контактному принципі вимірювання температури із застосуванням термопари типу К, яка безпосередньо взаємодіє з поверхнею або середовищем, температура яких підлягає визначенню. Широкий діапазон вимірювань — від -50 до $+1300$ $^{\circ}\text{C}$ — дозволяє використовувати термометр як надійний еталон для зіставлення результатів, отриманих контактним способом, із

даними безконтактного температурного контролю.

Під час проведення експериментальних досліджень здійснювався контроль температури навколишнього середовища за допомогою кімнатного спиртового термометра TFA 123005. Температура в приміщенні підтримувалася в межах $+26,5 \pm 1$ °C.

Випробування виконувалися у трьох режимах теплового навантаження об'єкта, які відповідали різним положенням регулятора газової плити. Кожне положення задавало рівень подачі газу та, відповідно, інтенсивність полум'я, що умовно класифікувалися як низький, середній та високий режими нагрівання. Зазначені настільні експериментальні дослідження дали змогу здійснити детальний аналіз характеристик розробленого пірометра та оцінити його працездатність у різних режимах роботи.

Вимірювання виконувалися в контрольованих кімнатних умовах, у яких температура та вологість могли незначно змінюватися протягом доби, однак залишалися в межах типових побутових значень. Основні характеристики приміщення, де проводився експеримент, були такими:

Температура навколишнього середовища: експеримент здійснювався в житловому приміщенні, що забезпечувало стабільні умови без різких температурних коливань. Температура додатково контролювалася настінним термометром і підтримувалася в межах ± 1 °C.

Рівень вологості: змінювався залежно від зовнішніх погодних умов, а також впливу вентиляції та системи опалення.

Розташування вимірювальних приладів: безконтактний пірометр здійснював вимірювання на відстані приблизно 2 см від поверхні об'єкта, тоді як контактний електронний термометр працював у режимі безпосереднього контакту.

Перевірка працездатності: перед початком експерименту було проведено перевірку коректності роботи вимірювальних приладів та всіх їх функціональних елементів.

Сталий характер умов експерименту забезпечувався відсутністю провітрювання та відкривання дверей під час вимірювань, що дозволяло запобігти раптовим коливанням температури й вологості повітря в приміщенні.

Застосування наведених заходів дозволило забезпечити стабільність умов

проведення експерименту, що є важливою передумовою підвищення точності та достовірності отриманих результатів вимірювань.

4.2 Обробка результатів вимірювання безконтактних пірометрів

У межах експериментальних досліджень було виконано серію вимірювань температури об'єкта за різних рівнів його нагрівання. Отримані результати подано у табличному та графічному вигляді, що забезпечує наочність аналізу та дає змогу виявити відповідні температурні залежності. Сукупність експериментальних даних також дозволяє оцінити стабільність умов проведення дослідження.

На початковому етапі експерименту здійснювався нагрів металевого зразка, при цьому параметри навколишнього середовища залишалися практично незмінними.

На першому етапі визначалась температура приміщення $T_{A(\text{дійсна})}$ за допомогою пірометра. Результати цих вимірювань наведено в табл. 4.1.[5].

Таблиця 4.1 – Значення температури навколишнього середовища, отримані за допомогою безконтактного пірометра

Прилад	Значення вимірюваної температури приміщення $T_{A(\text{дійсна})}$, °C						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Пірометр	26,5	26,1	26,6	26,2	26,5	26,3	26,6

Середньоарифметичне значення температури повітря в приміщенні за результатами вимірювань становить **26,4 °C**.

На другому етапі експерименту виконувалися вимірювання дійсної температури металевого об'єкта $T_{O(\text{дійсна})}$ із використанням контактного електронного термометра. Паралельно здійснювалося визначення температури об'єкта $T_{O(\text{нова})}$ за допомогою розробленого пірометра. Під час першого дослідження рукоятку газової плити було встановлено в положення 1, що відповідало мінімальній подачі газу та низькій інтенсивності полум'я.

Результати проведених вимірювань наведено в табл. 4.2[5], а на рис. 4.2 подано порівняльні графіки температури, визначеної пірометром і контактним електронним термометром за умов слабого нагрівання.

Таблиця 4.2 – Результати експериментальних вимірювань температури об’єкта за умов малого рівня нагрівання

Прилад	Значення вимірної температури об’єкту $T_{O(дійсна)}$, °C						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Контактний термометр $T_{O(дійсна)}$	147,8	146,4	147,9	146,8	147,2	148,6	146,2
Пірометр $T_{O(нова)}$	136,2	137,8	138,7	139,4	137,7	138,5	137,4

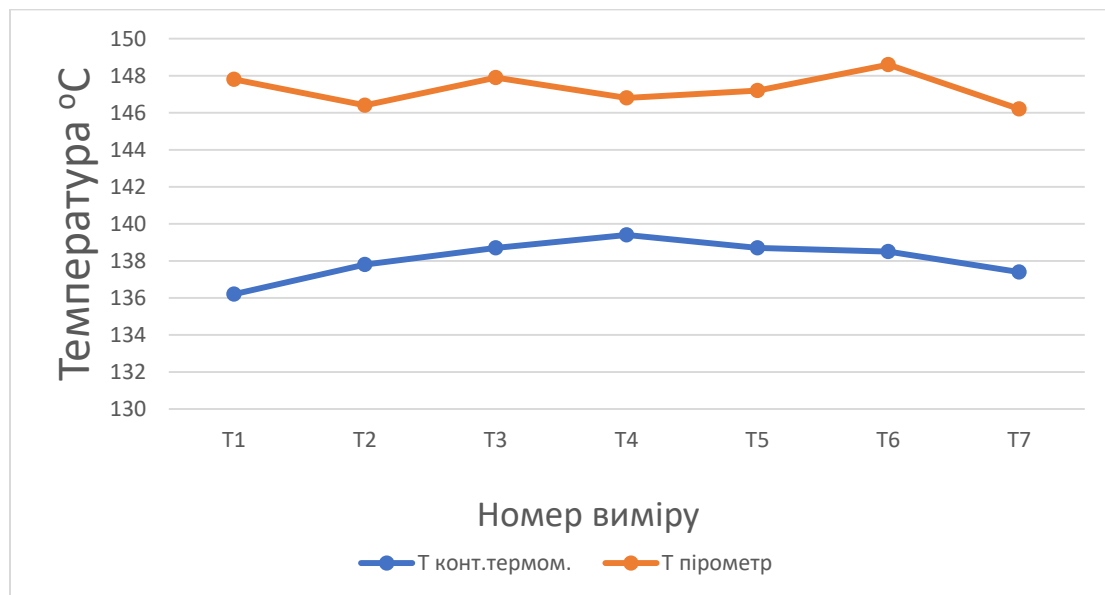


Рисунок. 4.2 – Результати вимірювань температури при малому нагріванні

Різниця між значеннями температур, отриманими контактним і безконтактним методами вимірювання, становила:

$$\Delta T_{\max} = 11,6 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta T_{\text{сер}} = 9,31 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta T_{\min} = 7,7 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Під час другого експериментального дослідження рукоятку газової плити було встановлено в положення 2, що відповідало середньому рівню подачі газу та, відповідно, середній інтенсивності полум'я. Результати вимірювань у цьому режимі наведено в табл. 4.3[5], а на рис. 4.3 подано порівняльні результати визначення температури пірометром і контактним електронним термометром за умов середнього нагрівання.

Таблиця 4.3 – Показники температурних вимірювань об'єкта за умов середнього рівня нагрівання

Прилад	Значення вимірної температури об'єкта $T_{O(дійсна)}$, °C						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Контактний термометр $T_{O(дійсна)}$	205,3	206,2	208,4	207,1	202,7	204,5	206,2
Пірометр $T_{O(нова)}$	190,9	193,4	189,4	191,2	190,3	189,5	194,4

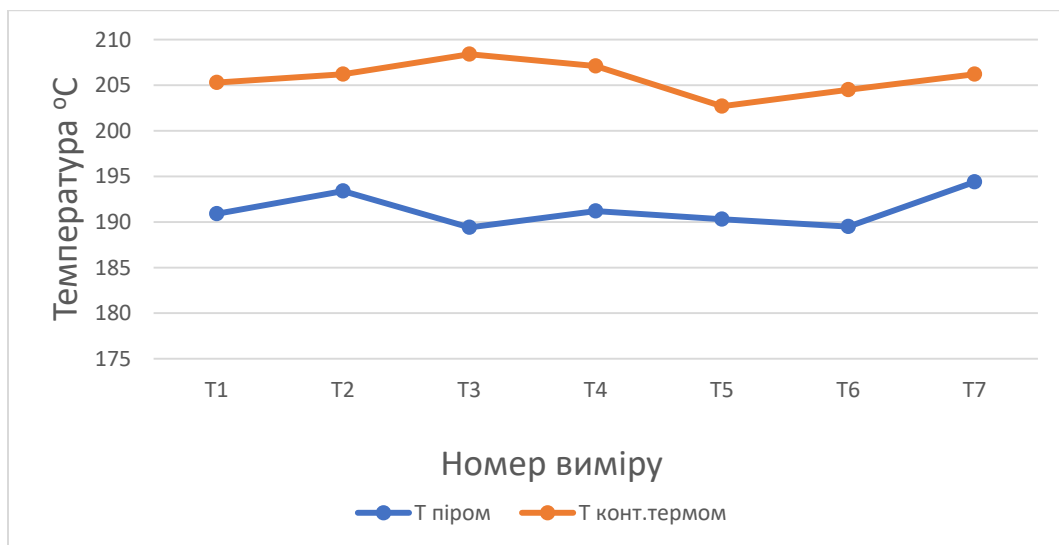


Рисунок 4.3 – Графічне представлення результатів вимірювання температури об'єкта за умов середнього рівня нагрівання

Різниця між результатами вимірювання температури, отриманими за допомогою контактного та безконтактного методів, становила:

$$\Delta T_{\max} = 19 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta T_{\text{сеп}} = 14,47 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta T_{\min} = 11,8^{\circ}\text{C}.$$

Під час третього експериментального дослідження рукоятку газової плити було переведено в положення 3, що відповідало максимальній подачі газу та високій інтенсивності полум'я. Результати вимірювань у даному режимі наведено в табл. 4.4[6], а на рис. 4.4 подано порівняльні результати визначення температури за допомогою пірометра та контактного електронного термометра за умов інтенсивного нагрівання.

Таблиця 4.4 – Експериментальні дані вимірювання температури об'єкта за режиму інтенсивного нагрівання

Прилад	Значення вимірної температури об'єкта $T_{O(дійсна)}$, °C						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Контактний термометр $T_{O(дійсна)}$	216,1	217,8	218,3	220,4	220,3	219,5	217,6
Пірометр $T_{O(нова)}$	204,6	203,2	205,4	206,8	205,4	205,5	204,1

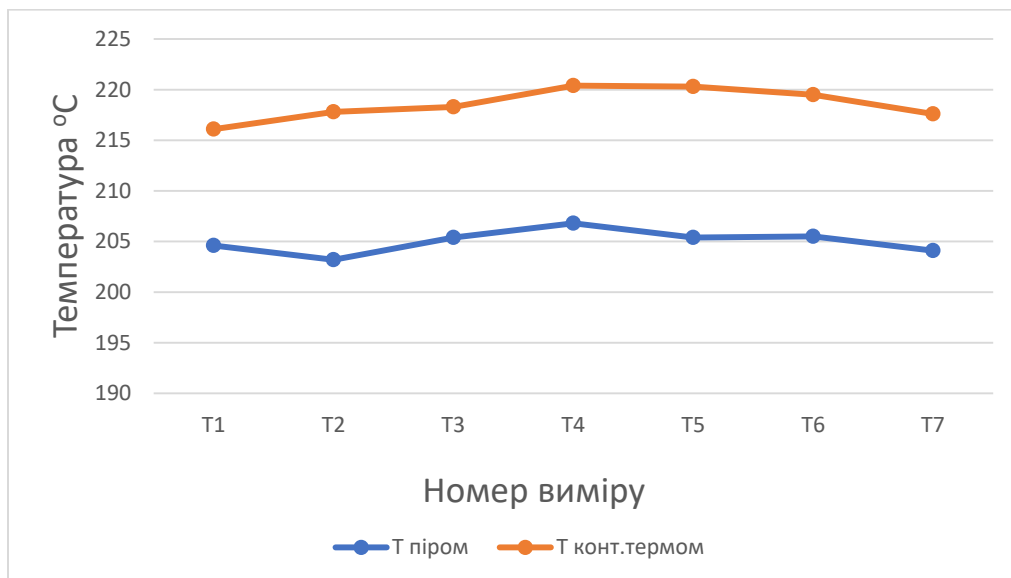


Рисунок 4.4 – Зміна температури металевого зразка в умовах максимального теплового навантаження

Різниця між значеннями температур, отриманими в ході вимірювань, становила:

$$\Delta T_{\max} = 14,9 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta T_{\text{сер}} = 13,57 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta T_{\text{min}} = 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

На основі отриманих експериментальних даних було виконано розрахунок коефіцієнта випромінювання досліджуваного металевго об'єкта з використанням формули (3.4). Для проведення розрахунків застосовувалися середні значення температур, визначені за різних режимів нагрівання, які наведено в табл. 4.5[6].

Таблиця 4.5 – Визначене значення коефіцієнта випромінювання досліджуваного матеріалу

Значення температури, К	Мале нагрівання	Середнє нагрівання	Сильне нагрівання
$T_{\text{о(дійсна)}}$	420,42	478,92	491,72
$T_{\text{А(дійсна)}}$	299,55	299,65	300,25
$T_{\text{о(нова)}}$	411,11	464,45	478,15
$T_{\text{А(нова)}}$	299,95	300,45	300,85
Коефіцієнт випромінювання	0,883	0,862	0,876

Середньоарифметичне значення - 0,874.

4.3. Обробка результатів вимірювань з урахуванням скоригованого коефіцієнта випромінювання

У ході експериментальних досліджень було визначено значення коефіцієнта випромінювання $k_{\text{для матеріалу}}$, з якого виготовлений досліджуваний об'єкт. Отримане значення коефіцієнта було інтегровано в програмний код пірометра, після чого виконано повторні вимірювання температури об'єкта за різних режимів його нагрівання.

Результати температурних вимірювань, отримані за допомогою пірометра з урахуванням скоригованого коефіцієнта випромінювання, було зіставлено з

показами контактного електронного термометра. Порівняльні результати наведено в табл. 4.6.

На рис. 4.5 представлено результати вимірювання температури за умов слабого нагрівання, отримані пірометром із внесеним коефіцієнтом випромінювання та контактним електронним термометром. На рис. 4.6[6] наведено аналогічні результати для середнього рівня нагрівання, а на рис. 4.7 — для режиму інтенсивного нагрівання об'єкта.

Таблиця 4.6 – Порівняльні результати вимірювання температури об'єкта контактним електронним термометром і безконтактним пірометром за різних режимів нагрівання

Режим нагрівання (горіння)	Прилад	Значення вимірної температури об'єкту $T_{O(\text{дійсна})}$, °C						
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Мале	Контактний термометр	141,3	139,4	140,9	141,6	139,4	142,2	141,7
	Пірометр	139,5	141,8	142,7	140,6	140,2	139,9	140,1
Середнє	Контактний термометр	188,7	188,4	189,7	187,6	190,5	189,8	187,2
	Пірометр	187,9	189,2	188,4	189,4	188,9	190,3	190,1
Сильне	Контактний термометр	228,7	230,2	230,7	229,8	230,2	231,8	232,7
	Пірометр	229,2	231,8	228,4	230,7	231,1	229,6	231,1

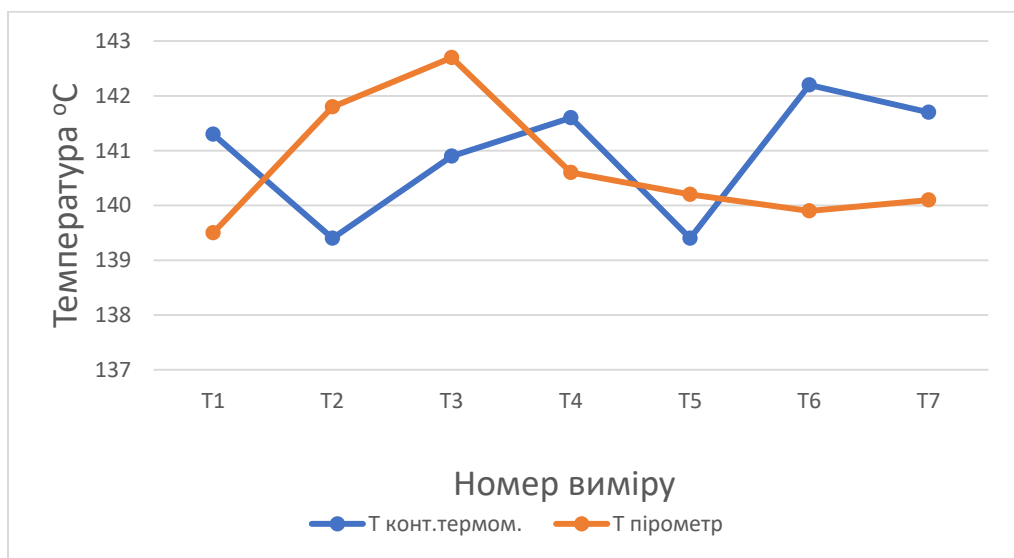


Рисунок 4.5 – Залежність температури металевого зразка від часу за умов слабого нагрівання

Різниця значень температур при малому нагріванні : $\Delta T_{\text{мах}} = -2,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{сер}} = 1,67 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{мін}} = -0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

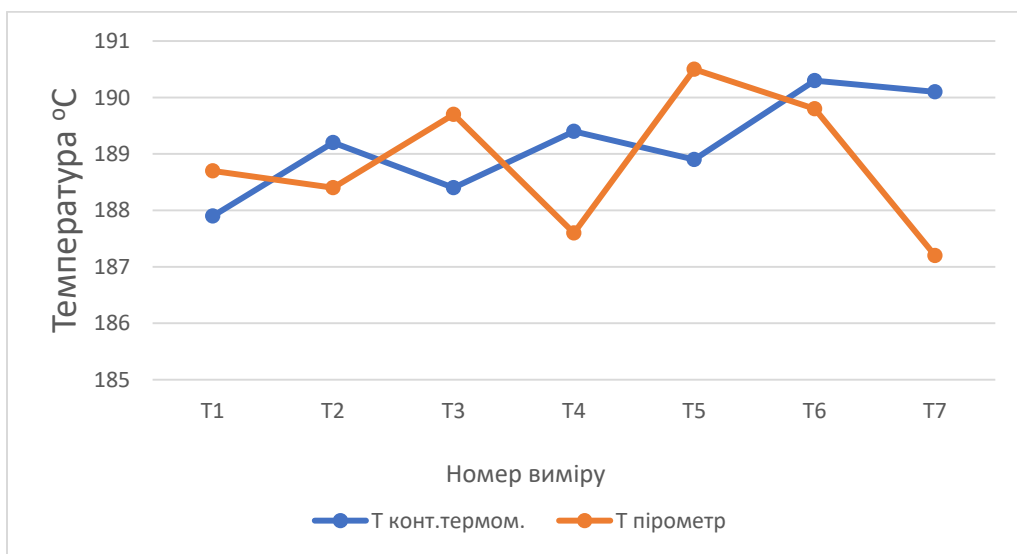


Рисунок 4.6 – Динаміка зміни температури металевого об'єкта за режиму середнього нагрівання

При середньому нагріванні становило : $\Delta T_{\text{мах}} = 2,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{сер}} = 1,39 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{мін}} = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

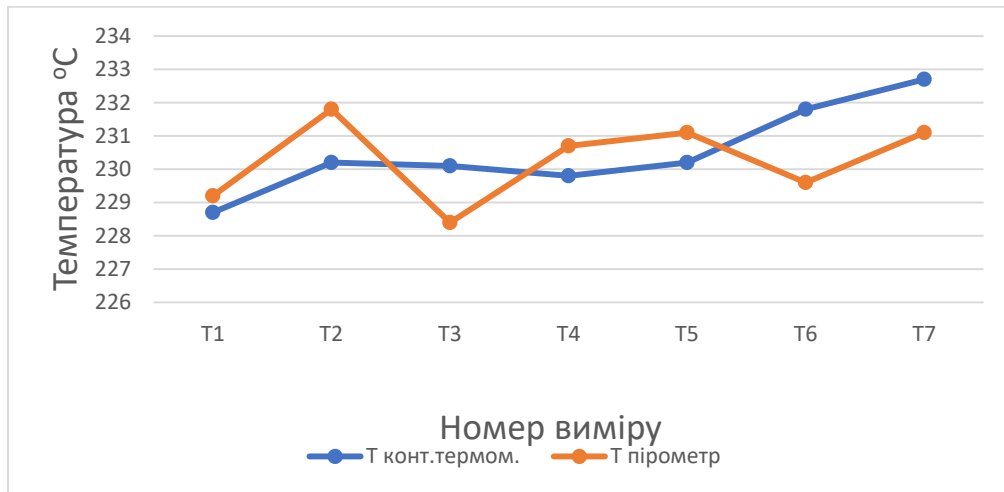


Рисунок 4.7 – Залежність температури металевого зразка від часу за умов інтенсивного нагрівання

При сильному нагріванні становило : $\Delta T_{\max} = 2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{сер}} = 1,34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\min} = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.4 Розрахунок похибки пристрою контролю температури твердих об'єктів

Для кількісної оцінки підвищення точності вимірювань виконаємо обчислення середньоквадратичної та відносної похибок як до **корекції коефіцієнта випромінювання**, так і **після його введення**. Це дозволить об'єктивно порівняти результати та визначити ефективність застосованої корекції.

Середньоквадратична похибка (СКП) визначається відповідно до такої математичної залежності:

$$\text{СКП} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{іеталон}})^2}, \quad (4.1)$$

Відносна похибка обчислюється за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{дійсне}}} \cdot 100, \quad (4.2)$$

Значення розрахованих похибок табл. 4.7. [6]

Таблиця 4.7 – Результати оцінювання похибок вимірювання

Режим нагрівання (горіння)	Коефіцієнт випромінювання	СКП	Відносна похибка, %
Мале	$k=1$ (до внесення змін)	3,82	6,75
	$k=0,874$. (після внесення змін)	0,45	0,71
Середнє	$k=1$ (до внесення змін)	5,95	7,56
	$k=0,874$. (після внесення змін)	0,48	0,55
Сильне	$k=1$ (до внесення змін)	5,56	6,62
	$k=0,874$. (після внесення змін)	0,47	0,43

Надалі сформовано графічну залежність значень температури, отриманих безконтактним пірометром, від показів температури, зафіксованих контактним електронним термометром. На графіку сині маркери відповідають значенням температури, отриманим без урахування скоригованого коефіцієнта випромінювання матеріалу. Червоні маркери відображають результати вимірювань після внесення поправки на коефіцієнт випромінювання. Чорна пряма лінія відповідає ідеальному узгодженню показів пірометра та контактного електронного термометра.

Графічну інтерпретацію результатів наведено на рис. 4.8. Аналіз отриманої залежності свідчить про суттєве підвищення точності безконтактних вимірювань температури після корекції коефіцієнта випромінювання, що підтверджує доцільність урахування цього параметра при практичному використанні пірометрів.

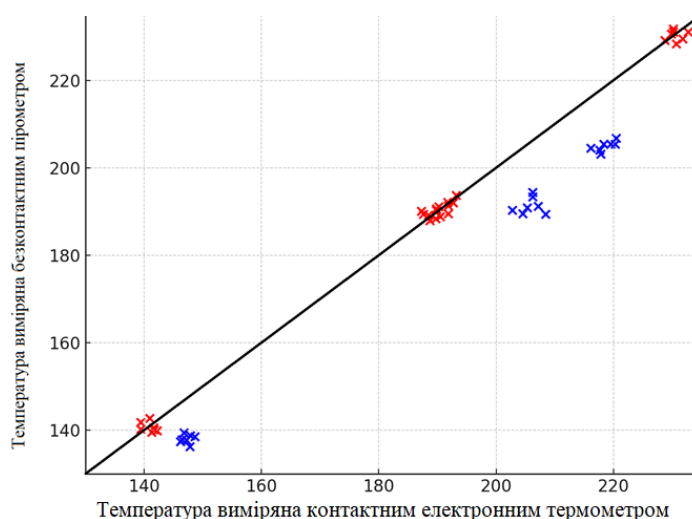


Рисунок. 4.8 – Графік залежності температур

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень у магістерській роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу розроблення інформаційно-вимірювальної системи безконтактного контролю температури твердих тіл на основі сучасних пірометричних технологій з урахуванням коефіцієнта випромінювання поверхні.

Проведено ґрунтовний аналіз існуючих методів і засобів вимірювання температури, зокрема контактних і безконтактних. Встановлено, що безконтактні пірометричні методи є найбільш доцільними для вимірювання температури високонагрітих, рухомих, електрично небезпечних та важкодоступних об'єктів, де застосування контактних засобів є обмеженим або неможливим.

Розглянуто фізичні основи теплового інфрачервоного випромінювання тіл, проаналізовано закони Кірхгофа, Планка, Віна та Стефана–Больцмана, що лежать в основі пірометрії. Показано визначальний вплив коефіцієнта випромінювання матеріалу та стану поверхні об'єкта на точність безконтактних температурних вимірювань.

На основі проведеного аналізу розроблено фізичну, структурну та функціональну моделі системи безконтактного вимірювання температури. Обґрунтовано вибір основних компонентів системи, зокрема інфрачервоного датчика MLX90614, мікроконтролера Arduino Nano та OLED-дисплея, що забезпечило високу точність вимірювань, низьке енергоспоживання та зручність експлуатації пристрою.

Реалізовано програмне забезпечення для збору, обробки та відображення температурних даних, а також впроваджено алгоритми компенсації впливу температури навколишнього середовища і корекції результатів вимірювання з урахуванням коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта.

Проведено експериментальні дослідження температури металевого об'єкта при різних режимах нагрівання з використанням розробленого пірометра та контактного електронного термометра як еталонного засобу. На основі отриманих результатів визначено коефіцієнт випромінювання досліджуваного матеріалу та здійснено корекцію показів пірометра. Експериментально підтверджено, що врахування коефіцієнта випромінювання дозволяє суттєво зменшити похибку

вимірювань і підвищити узгодженість результатів безконтактного та контактного методів.

На основі аналізу факторів, що впливають на точність пірометричних вимірювань, встановлено, що ключову роль відіграють оптична роздільна здатність приладу, стабільність умов вимірювання та правильне задання коефіцієнта випромінювання. Отримані результати свідчать про доцільність використання розробленої системи за критерієм точності, швидкодії та безпеки вимірювань.

Таким чином, результати магістерської роботи підтверджують ефективність і перспективність розробленої інформаційно-вимірювальної системи безконтактного контролю температури твердих тіл. Запропоновані технічні рішення та методика корекції вимірювань можуть бути використані в промисловості, енергетиці, будівництві, екологічному моніторингу та наукових дослідженнях. Подальші напрями розвитку роботи полягають у розширенні функціональності системи, автоматизації визначення коефіцієнта випромінювання та адаптації пристрою для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Метрологія

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50209/1/Metrolohiiia_2022.pdf

2. <https://brom.ua/uk/pirometri-termometri-ukr> - Монохроматичний пірометр гарантує точне вимірювання температури

3. Muraviov, O. V. Modern laser rangefinding / O. V. Muraviov // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи", 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна : збірник тез доповідей. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 149.

4. Бабич О.О. Визначення безконтактних методів вимірювання температури нагрітих тіл / О.О. Бабич, Н.М. Александрова // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – № 1. – С. 69-71

5. Брао І. Аналіз проблематики та перспективних напрямів розвитку безконтактної термометрії [Текст] / І. Брао // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2014. – Вип. 75. – С. 40-44

6. <https://brom.ua/uk/radiatsionnye-iarkostnye-opticheskie-pirometry-v-metallurgii-ukr> - Монохроматичний пірометр гарантує точне вимірювання температури

7. Назарчук О. О. Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа / О. О. Назарчук, О. В. Муравйов. // Біомедична інженерія. – 2017. – №5. – С. 66–67

8. <https://calconuae.online/Wintact-WT320> - Earning Trust

9. <https://www.fluke.com/en/product/temperature-measurement/ir-thermometers/fluke-62-max-plus>- Fluke companies

10. Маркіна О.М. Фізична модель формування вихідного сигналу в біспектральній пірометрії М.О.Маркін, О.М.Маркіна ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011- X наук.-техн. конф., 21 – 22 квітня 2011 р. – К., 2011.

11. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>

12. <https://brom.ua/uk/radiatsionnye-iarkostnye-opticheskie-pirometry-v-metallurgii-ukr>

13. OLED дисплей. – Режим доступу - <https://arduino.ua/ru/prod1263-oled-displei-modyl-beli>

14. Скорик Б. І. До питання застосування безконтактних методів вимірювання температури нагрітих тіл / Б. І. Скорик, А. В. Гейко // Системи обробки інформації.-2007- Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2007_9_34

15. _Оборський Г. О. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю / Г. О. Оборський, О. С. Левинський, М. О. Голофєєва // Технологічний аудит та резерви виробництва. - 2016. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2016_2\(3\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2016_2(3)_2).

16. _Протасов, А. Г. Технології теплового неруйнівного контролю / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

17. Самойленко М. М. Біспектральний телевізійний пірометр / М. М. Самойленко, О. М. Маркіна, М. О. Маркін // Матеріали міжнародної наукової конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення- Режим доступу - <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1147/>

18. Пірометри– Режим доступу до ресурсу: <https://hot-land.com.ua/ua/g19968873-pirometry>

19.

20. Changing Emissivity Setting in MLX90614– Режим доступу до ресурсу: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/application-notes/application-note-mlx90614-changing-emissivity-setting>

21. _Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартаппроектів. Конспект лекцій: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/29447>

22. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей. За заг. ред. О.А. Гавриша.2016.

23. Кісіль І. С. Конструювання вимірювальних приладів: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Івано-Франківськ: видавництво "Факел", 2004.- 328с.

24. Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості / під ред. С. А. Чеховського. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 534 с.

25. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність результатів та засобів вимірювань: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Івано-Франківськ: видавництво «Факел», 2002. 400 с.

26. Захаров І. П., В. Д. Кукуш Теорія невизначеності у вимірюваннях. Харків: Консун, 2002. 256 с.

27. Поджаренко В. О., Васілевський О. М., Кучерук В. Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності: Навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 126 с.

28. Дорожовець М. М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посібник. Львів 2007. 624 с.

29. Новицкий П.В., Зограф І.А. Оцінка похибки результатів вимірювань. Л.: Електроатомвидав, 1991. 302 с.