

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2021р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології екологічної безпеки»**

спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

на тему: «Прилад безконтактного вимірювання температури»

Виконав:

студент III курсу, групи ПН-п81

Морозов Кирило Андрійович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н.,

Приміський Владислав Пилопович _____

Рецензент:

к.т.н., ст.вик.,

Муравйов Олександр Володимирович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2			Пояснювальна записка		
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

				ДП		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.						
Консульт.					КП ім. Ігоря Сікорського Каф. ПБФ Гр. ПН-п81	
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Прилад безконтактного вимірювання
температури»**

Київ – 2021 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО"

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології
екологічної безпеки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«____» _____ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Морозов Кирило Андрійович

1. Тема проекту «Прилад безконтактного вимірювання температури», керівник проекту Приміський Владислав Пилипович, доцент, к.т.н. затверджені наказом по Університету від "____" _____ 2021 р. №____.
2. Строк подання студентом проекту «20» травня 2021 р.
3. Вихідні дані до проекту:
 - 3.1 Конструктивні вимоги до приладу і його складових частин.
Габаритні розміри та маса виробу – мінімальні.
 - 3.1. Умови експлуатації:
 - Атмосферний тиск 84-106,7кПа
 - Відносна вологість 30-80% при 25°C
 - Напруга живлення 3,7-5 ±0,3В
 - 3.2. Характеристики приладу:
 - Працює на основі стандартних сигналів постійного струму з границями зміни вхідних сигналів 0...1 В, 0...10 В.
 - Діапазон вимірюваних температур $\Delta T = -70...380^{\circ}\text{C}$.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- 4.1. Поняття про температуру і температурних шкалах.
- 4.2. Виконати аналіз сучасних методів безконтактного вимірювання температури.
- 4.3. Виконати огляд сучасних аналогів
- 4.4. Обґрунтувати структуру приладу безконтактного вимірювання температури.
- 4.5. Виконати опис конструкції приладу безконтактного вимірювання температури.
- 4.6. Виконати висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема, принципова електрична схема, складальний кресленик, презентація доповіді.
6. Дата видачі завдання "01" березня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Поняття про температуру і температурних шкалах.	01.03.21р.	
2	Виконати аналіз сучасних методів безконтактного вимірювання температури.	05.03.21 р.	
3	Виконати аналіз сучасних методів та приладів контролю кисню в газових сумішах.	10.03.21р.	
4	Обґрунтувати структуру приладу безконтактного вимірювання температури.	20.03.21 р.	

5	Розробити функцію перетворення.	10.04.21 р.	
6	Виконати опис конструкції приладу	04.05.21 р	
7	Підготувати креслення до дипломного проекту	20.05.21р	
8	Підготувати презентацію та доповідь на захист дипломного проекту	07.06.21	

Студент _____Кирило МОРОЗОВ

Керівник проекту _____Владислав ПРИМІСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Метою дипломного проекту є розробка приладу безконтактного вимірювання температури. У межах даного проекту було досліджено теоретичні основи безконтактного вимірювання температури, спроектовано прилад дистанційного вимірювання температури. В результаті проведеної роботи розроблені функціональна і принципові схеми, складальні креслення всього виробу і окремих його вузлів

Робота викладена на 60 сторінок (без додатків), містить 14 таблиць, 38 рисунків, 3 графічних креслення та 34 літературних джерел.

Ключові слова: безконтактне вимірювання температури, пірометрія, пірометри сумарного випромінювання.

ABSTRACT

The purpose of the diploma project is to develop a non-contact temperature measurement device. As part of this project, the theoretical foundations of non-contact temperature measurement were investigated, and a remote temperature measurement device was designed. As a result of the work carried out, functional and schematic diagrams, assembly drawings of the entire product and its individual components were developed

The work is presented on 60 pages (without appendices), contains 14 tables, 38 Figures, 3 graphic drawings and 34 literary sources.

Keywords: non-contact temperature measurement, pyrometry, total radiation pyrometers.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧТ – абсолютно чорне тіло;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

МК – мікроконтролер;

АПП – апаратно-програмна платформа;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1 ПОНЯТТЯ ПРО ТЕМПЕРАТУРУ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ШКАЛАХ	13
1.1 Класифікація термометричних властивостей	14
1.2 Терморезистивні перетворювачі температури	16
1.3 Термоелектричні перетворювачі температури.....	17
1.4 Теплове випромінювання	18
РОЗДІЛ 2 ПІРОМЕТРІЯ, ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ	23
2.1 Пірометр	23
2.2 Застосування чорного тіла до реальних об'єктів.....	24
2.2).	24
Рисунок 2.2 - Розсіювання випромінювання в реальних матеріалах	24
2.2.1. Абсорбція (поглинання)	25
2.2.2 Відображення	25
2.2.3 Коефіцієнт пропускання (трансмисивності)	25
2.2.4 Радіаційні принципи, яким подається чорне тіло.....	26
2.3 Умови навколишнього середовища	29
2.4 Методи безконтактного вимірювання температур.....	30
2.5. Датчики часткового випромінювання	31
2.6. Радіаційні пірометри	34
2.7 Датчики сумарного випромінювання.....	40
2.8 Випускні пірометричні датчики.....	42
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ АНАЛОГІВ.....	45
3.1 Безконтактний інфрачервоний Пірометр Unit "UT301C".....	45
3.1.1 Принцип дії термометра.....	46
3.1.2 Позиціонування найбільш гарячої і холодної точки.....	46
3.1.3 Відстань і розмір плями	46
3.1.4 Коефіцієнт випромінювання.....	47
3.2 Пірометр Mastech "MS65222B"	48

3.2.1 Технічні характеристики	48
3.2.2 Характеристики	49
3.3 Пірометр гігрометр з термопарою Мегіон 16800	49
3.3.1 Коефіцієнт випромінювання	51
3.4 Пірометр Condrol Maxwell 3 3-16-043	53
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	56
4.1 Будова і принцип роботи	56
4.2 Оптична система, захисні скла, розмір плями і відстань вимірювання	56
4.3 Розмір плями і відстань, на якому проводиться вимірювання	57
4.4 Методи націлювання	57
4.5 Детектори	58
4.6 Виготовлені пірометричні датчики	59
4.6.1 Датчики фірми Murata.	59
4.6.1.1 Інфрачервоний піроелектричний SMD датчик Murata IRS-A200ST01.	59
4.6.1.2 Інфрачервоні піроелектричні датчики Murata серії IRA-E7	60
4.6.1.3 Температурно компенсовані інфрачервоні піроелектричні датчики Murata серії IRA-E420	61
4.6.2 Піроелектричні датчики фірми Banner Engineering серії M18	62
4.6.3 Датчик температури інфрачервоний MLX90614	63
4.7 Вибір контролера для пірометра	66
4.7.1 Arduino UNO	66
4.7.2 Arduino Nano	67
4.8 Побудова пірометра	68
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ВСТУП

Наука і техніка ніколи не стоїть на місці, і з часом все більшого поширення набувають пристрої та прилади, робота яких заснована на інших принципово других (наприклад, безконтактних) методах і принципах вимірювання та отримання інформації про одні і ті ж фізичні величини. До одного з таких напрямків належить і пірометрія, або безконтактне вимірювання температури.

У більшості випадків цю фізичну величину можна виміряти звичним контактним способом через пряму взаємодію чутливого елемента датчика з середовищем або об'єктом (наприклад, що знаходяться у воді або іншому середовищі чутливі елементи термопар або термоопорів).

РОЗДІЛ 1 ПОНЯТТЯ ПРО ТЕМПЕРАТУРУ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ШКАЛАХ

Температура- фізична величина, що є мірою і кількісно характеризує середню кінетичну енергію теплового руху молекул в будь-якій речовині або тілі. Під терміном «температурна шкала» розуміють неперервну сукупність числових значень, що лінійно пов'язана з якимись точно вимірюваними властивостями, і являється однозначною і монотонною функцією температури. На початку XX століття застосовували шкали Реомюра і Цельсія, для наукових робіт ще й водневу шкалу, та шкалу Кельвіна. Через те, що перерахунки з однієї шкали на іншу створювали труднощі, у 1933 році було ухвалене рішення ввести Міжнародну температурну шкалу (МТШ). Через деякий час МТШ була переглянута, тому що досвід використання показав потребу у внесеннях доповнень і уточнень для наближення її до термодинамічної шкали, та приведена у відповідність із знаннями того часу. 1960 року затвердили «Положення про міжнародну практичну температурну шкалу 1948 року».

Температура є статистичним поняттям, яке використовують до систем, яка складається з часток, які знаходяться у тепловій рівновазі. Температуру системи визначає усереднена енергія часток. При взаємодії двох рівнозважених систем з різними температурами, відбувається перехід енергії від системи з більшим енерговмістом в систему з меншим енерговмістом, доки обидві системи не приймуть новий стан рівноваги. Температура є спільним для усіх видів часток первісно поділених систем.

Фаренгейт (1715 р.), Реомюр (1776 р.) і Цельсій (1742 р.) при побудові шкал опиралися на гіпотезу лінійного зв'язку між температурою T і термометричними властивостями як, наприклад, розширення об'єму рідин V , тобто:

$$T = a + b \cdot V, \quad (1.1)$$

де a і b – сталі коефіцієнти.

Підставивши в це рівняння $V = V_1$, при $T = T_1$ $V = V_2$ при $T = T_2$, після перетворень отримаємо рівняння температурної шкали:

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{V_2 - V_1}(V - V_1) \quad (1.2)$$

В шкалах Фаренгейта, Реомюра і Цельсія точка танення льоду T , відповідала $+32,0$ і 0 градусам, а точка кипіння води $T_2 = 212,80$ і 100 градусам. Головний інтервал ділиться на $N = 180, 80$ і 100 рівних частин, і $1/N$ частину кожного з інтервалів називають градусом Фаренгейта – $T^\circ\text{F}$, градусом Реомюра – $T^\circ\text{R}$ градусом Цельсія – $T^\circ\text{C}$.

Градус- одиниця температури, дорівнює $1/100$ діапазону температур від точки танення льоду (0°C) до точки кипіння води (100°C), за шкалою Цельсія позначається 1°C .

Точці танення льоду в шкалі Цельсія відповідає нульова температура, ті, що нижче нульової – від’ємні.

Абсолютний нуль, який є найнижчою температурою, дорівнює $-273,16^\circ\text{C}$. У шкалі Кельвіна абсолютному нулю дорівнює нуль, тому за цією шкалою немає від’ємних температур.

Для шкал з подібним принципом побудови, градус являється масштабом шкали, а не одиницею вимірювання.

Для перерахунку з однієї з вказаних шкал температур в іншу використовують таке співвідношення:

$$T^\circ\text{C} = 1,25 R = (T^\circ\text{F} - 32). \quad (1.3)$$

1.1 Класифікація термометричних властивостей

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, що використовують різні термометричні властивості рідин, газів і твердих тіл. Існують десятки різних пристроїв, що використовуються в промисловості, при наукових дослідженнях, для спеціальних цілей.

Перерахуємо найбільш поширені термометричні властивості на основі яких функціонують датчики температури:

- теплове розширення;
- зміна тиску;
- зміна електричного опору;
- термоелектричні ефекти;
- теплове випромінювання.

Приклади приладів для виміру температури в залежності від використаної термоелектричної властивості приведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Прилади для виміру температури

Термометрична властивість	Найменування приладу
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри
Зміна тиску	Манометричні термометри
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору.
	Напівпровідникові термометри опору
Термоелектричні ефекти	Термоелектричні термометри (термопари) стандартизовані
	Термоелектричні термометри (термопари) спеціальні
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри.
	Радіаційні пірометри.
	Фотоелектричні пірометри.
	Колірні пірометри

Датчик- сукупність вимірювальних перетворювачів, з'єднаних в один конструктивний вузол, який виноситься на об'єкт вимірювання. В загальному випадку В загальному випадку датчик може складатися з декількох перетворювачів [24].

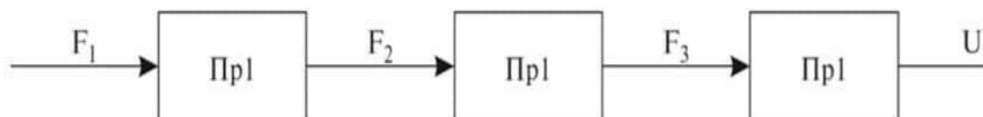


Рис.1.1 – Функціональна схема датчика: Пр.1, Пр2, Пр3- перетворювачі; F1- вхідна фізична величина; F2,3- проміжні фізичні величини; U - вихідний електричний сигнал.

Будь-який датчик є перетворювачем енергії. Незалежно від типу вимірюваної величини завжди відбувається передача енергії від досліджуваного

об'єкта до датчика. Робота датчика- це особливий випадок передачі інформації, а будь-яка передача інформації пов'язана з передачею енергії.

1.2 Терморезистивні перетворювачі температури

Терморезистори — це резистивні елементи, виготовлені з провідникового або напівпровідникового матеріалу з додатним або від'ємним температурним коефіцієнтом опору (ТКО). Принцип дії терморезисторів базується на залежності їх опору від температури.

Конструкції чутливих елементів терморезистивних перетворювачів температури в залежності від меж вимірюваних температур, умов експлуатації, и т.п., дуже різноманітні. З провідникових матеріалів широко застосовуються платина, мідь, нікель. Найбільш поширеними являються терморезистивні перетворювачі с платиновими та мідними чутливими елементами. Перші призначені для перетворення температури в інтервалі від 260 до +1000 °С, другі — від 200 до +200 °С.

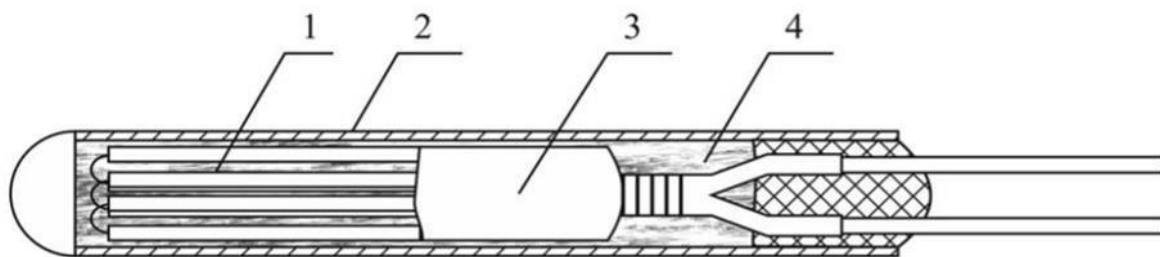


Рисунок 1.2 – Конструкція елементів терморезистивного перетворювача температури.

Чутливий елемент мідного термоперетворювача опору — безкаркасна обмотка 1 з мідного ізолюваного дроту (рис. 1.2, в), зверху покрита фторопластовою плівкою 3. Для забезпечення необхідної механічної міцності обмотка помещається у тонкостінну металічну гільзу 2, засипається керамічним порошком 4 та герметизується.

1.3 Термоелектричні перетворювачі температури

Принцип дії термоелектричного перетворювача (термопари) заснований на використанні термоелектричного ефекта Зеебека (1823), суть якого полягає у виникненні термоЕРС в ланцюгу, який складається з двох різнорідних провідників (або напівпровідників), які називаються термоелектродами. Якщо температура T місця з'єднання електродів (так званого робочого або гарячого спаю) і температура T_0 вільних (холодних) кінців різні (рис. 1.3), то значення виникаючої термо ЕРС є функцією різниці температури, а при постійній температурі $T_0 = \text{Const}$ — функцією температури T в $F(T, T_0)$. (Рис.1.3) Значення та характер залежності термоЕРС від температури T визначається як різницею температур $T - T_0$, так і термоелектричними властивостями термоелектродів, які утворюють термопару.

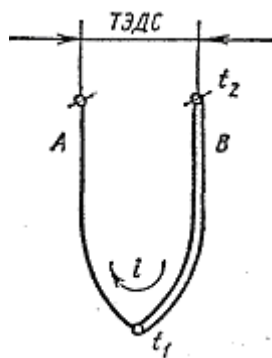


Рисунок 1.3 – Термоелектричний перетворювач температури

На рис. 1.4 приведені конструкції термопар із неблагородних металів, електроди 1 и 2 яких виконані з пар мідь—міднонікелевий сплав або залізо—міднонікелевий сплав. Кінці 4 термоелектродів з'єднані зварюванням, електроди ізолювані один від одного фарфоровою ізоляційною трубкою 3 або фарфоровими бусами.

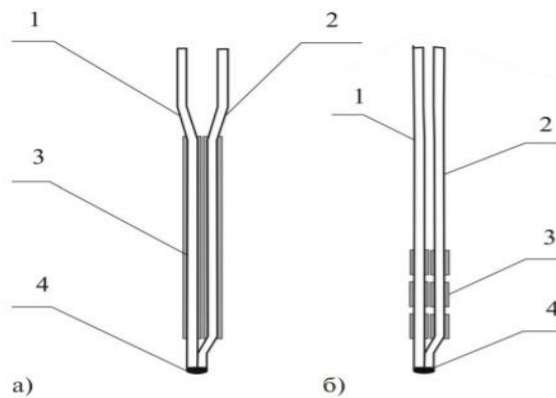


Рисунок 1.4 – Різновидність термопар з благородних металів

Існування багатьох різновидів конструкцій термоелектричних перетворювачів температури, при цьому залежність термоЕРС від температури в широкому діапазоні температур переважно нелінійна. Також термоелектричні перетворювачі характеризуються значною інертністю. В залежності від інерційності вони поділяються на малоінерційні, теплова інерція яких не перевищує 5 с для занурних та 10 с для поверхневих, середньої інерційності — відповідно не більш ніж 60 та 120 с і більшої інерційності — 180 и до 300 с.

1.4 Теплове випромінювання

Те, що може побачити наше око (видимий діапазон) є тільки найменша частина широкого спектру електромагнітної радіації. Те, що ми бачимо своїми очима це тільки мала частина (видима область) з широкого спектру електромагнітного випромінювання.

На стороні коротких довжин хвиль щодо видимого спектру лежить ультрафіолетове випромінювання, а на стороні великої довжини хвилі лежить інфрачервоне (ІЧ) випромінювання (див. рис.1.5). Ця невидима частина світла несе різну додаткову інформацію. Крім того, ця область відповідає за нагрівальний ефект сонця.

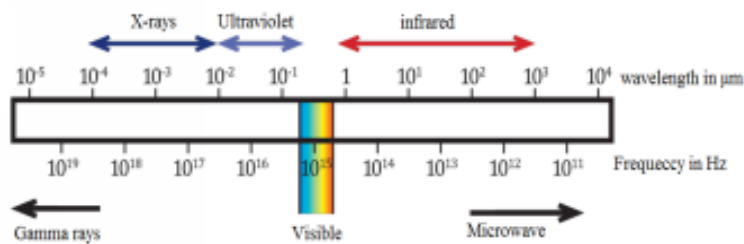


Рисунок 1.5 – Електромагнітний спектр

ІЧ область може бути розділена на три категорії:

- ближнього ІЧ випромінювання (NIR / короткі хвилі),
- середнього ІЧ випромінювання (МИР / середні хвилі)
- далекого ІЧ випромінювання (РП / довгі хвилі).

Таблиця 1.2 – Діапазони ІЧ область

Діапазони	Довжина хвилі (мкм)
Ближній інфрачервоний діапазон (БІЧД)	0,78 - 3
Середній інфрачервоний діапазон (СІД)	3 - 50
Дальній інфрачервоний діапазон (ДІКЧД)	50 - 1000

Для вимірювання температури можна використовувати теплове випромінювання, так як відомо, що різні властивості (параметри) теплового випромінювання нагрітих тіл залежать від їх температури. При цьому, звісно, немає необхідності в безпосередньому контакті засоба вимірювання і об'єкта вимірювання. Таким чином, методи, засновані на різних принципах перетворення теплового випромінювання об'єкта вимірювання в безпосередньо вимірювану фізичну величину, називають безконтактними або пірометричними методами вимірювання температури, а засоби вимірювання, які реалізують ці методи, - пірометрами. Розділ температурних вимірювань, який вивчає методи і засоби вимірювання температури безконтактним способом, називають пірометрією. Теплове випромінювання - випромінювання, що виникає в результаті теплового збудження частинок речовини (атомів, молекул). Енергія

такого випромінювання визначається тільки температурою і оптичними властивостями випромінювального тіла.

Теплове випромінювання носить електромагнітний характер, тобто являє собою сукупність електромагнітних хвиль або фотонів. Воно, як і будь-яке випромінювання, описується енергетичними та спектральними (частотними) характеристиками.

Будь-яке тіло, температура якого відмінна від абсолютного нуля, випромінює, і енергія цього випромінювання залежить від температури тіла і його оптичних властивостей. Широка відмінність цих властивостей призводить до того, що випромінювання різних тіл навіть при однаковій температурі буде вельми різним. Порівнювати випромінювання цих тіл зручно, вводячи поняття коефіцієнта випромінювання, тобто коефіцієнта, який характеризував би випромінювання цікавлячого нас тіла по відношенню до будь-якого прийнятого за зразкове (опірне). У цьому випадку коефіцієнт буде відображати різницю в оптичних властивостях тіл. Як зразкового приймають так зване «чорне тіло» або «абсолютно чорне тіло», випромінювання якого залежить тільки від його температури. Такі тіла в природі не зустрічаються, наближеним до них є різні види сажі і металевої черні. Ще кращим наближенням в широкому діапазоні температур є рівномірно нагріті порожнини різної конфігурації, які використовують на практиці в якості моделей чорного тіла.

Розподіл спектральної енергетичної складової яскравості абсолютно чорного тіла добре описується законом Планка

Знання фізичних основ, таких як чорне тіло, закони Планка, Стефана, Больцмана, Віна, Кірхгофа і т.д. має важливе значення в питаннях пірометрії.

$$L_{\lambda}^0 = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1.4)$$

де λ – довжина хвилі; T – абсолютна температура; c_1 , c_2 – константи випромінювання.

Ізотерми випромінювання абсолютно чорного тіла приведені на рис. 1.6. Для абсолютно чорного тіла (яке поглинає 100% падаючого на нього

випромінювання) характерні наступні закономірності теплового випромінювання (рис. 1.6):

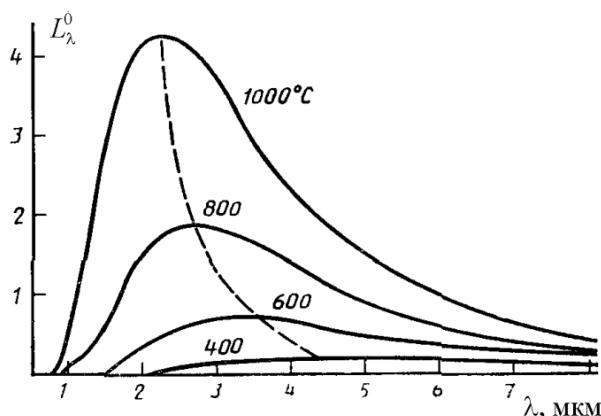


Рисунок 1.6 - Закономірності теплового випромінювання

- при підвищеній температурі тіла зростає спектральна енергетична яскравість та свічення на всіх довжинах хвиль; 62 Рис. 1.6. Ізотерми випромінювання абсолютно чорного тіла

- при нагріванні тіла максимум спектрального свічення зміщується в сторону більш коротких довжин хвиль (закон зміщення Віна);

- зі зростанням температури тіла зростає повне (інтегральне) свічення поверхні об'єкта. Дані закономірності закладені в основу принципу дії яскравісних, колірних та радіаційних пірометрів.

- при нагріванні тіла максимум спектрального свічення зміщується в сторону більш коротких довжин хвиль (закон зміщення Віна);

- зі зростанням температури тіла зростає повне (інтегральне) свічення поверхні об'єкта. Дані закономірності закладені в основу принципу дії яскравісних, колірних та радіаційних пірометрів.

Висновок: можливо використовувати різні методи вимірювання температури фізичних об'єктів. Але найбільш вдалим є безконтактний метод вимірювання на основі теплового випромінювання. Перевагою якого є відсутність безпосереднього контакту засобу вимірювання і об'єкту вимірювання. Також ці методи характеризуються високою чутливістю

швидкістю та несприйнятливостю до зовнішніх перешкод. На основі цих причин я вибираю безконтактний метод вимірювання температур.

Ось деякі з переваг використання пірометра:

- Він записує температуру в частки секунди (час відгуку);
- Матеріал і температура цілі не впливають на вимірювання;
- Не вимагає особливого обслуговування, отже, має більш тривалий термін служби.
- Він може вимірювати температуру рухомого об'єкта.
- Вимірювання проводиться для небезпечних або фізично недоступних об'єктів (наприклад, деталі під високою напругою і велика відстань вимірювання).
- Так як він не знаходиться в безпосередньому контакті з метою, отже можна вимірювати високі температури.
- Так як пірометри використовують безконтактний метод вимірювання, отже, вони не будуть механічно впливати в ціль.

РОЗДІЛ 2 ПІРОМЕТРІЯ, ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

2.1 Пірометр

Пірометр це безконтактний пристрій, який перехоплює і вимірює теплове випромінювання, не контактуючи з випромінюючим тілом. Даний процес відомий як пірометрія. Пірометри використовуються для визначення температури поверхні об'єкта.

Температура є найбільш часто вимірюваною фізичною величиною, яка передбачає стан продукту або частини апарату, як у виробництві, так і в області контролю якості. Пірометр строго працює на принципах випромінювання абсолютно чорного тіла. Тут коефіцієнт випромінювання цілі відіграє важливу роль, оскільки він керує тим, наскільки яскравим є об'єкт для пірометра. Завдяки своїй високій точності, швидкості, економічності і специфіки, він широко використовується в якості стандартної процедури в багатьох галузях промисловості.

Абсолютно чорне тіло є гіпотетичним об'єктом, який поглинає все випромінювання, що падає на нього. Таке тіло не відображає випромінювання і є абсолютно чорним. Абсолютно чорне тіло це найефективніший тепловий поглинач і випромінювач, тому що будь-який об'єкт в тепловій рівновазі буде випромінювати таку ж кількість світла, як він поглинає на кожній довжині хвилі. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла визначається тільки температурою, а не властивостями, матеріалом або структурою. Ці особливості, як ідеальний спосіб створювати або поглинати випромінювання зробило чорне тіло цінним для багатьох додатків. Для ідеального чорного тіла поглинання і тепловіддача приймається однаковими.

Тіло, випромінює менше теплового випромінювання, ніж абсолютно чорне тіло або його поверхня випромінювання (ϵ) менше одиниці, але незмінно на всіх частотах. Сіре тіло це корисне прирівнювання до деяких реальних матеріалів за деякими частотними діапазонами. Випромінювальна здатність сірого тіла в спектрі показана на рис. 2.1.

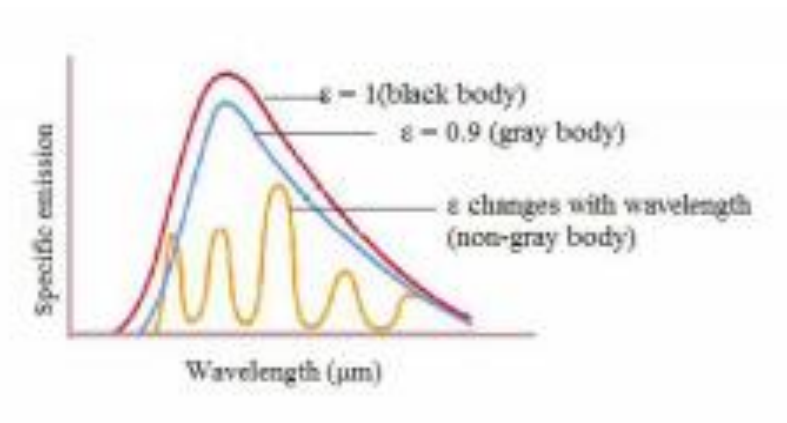


Рисунок 2.1 – Специфіка випромінювальної здатності сірого тіла

2.2 Застосування чорного тіла до реальних об'єктів

Абсолютно чорне тіло це тільки фізична абстракція, яка не існує в реальному світі. Кожне тіло випромінює електромагнітне випромінювання при температурі вище нуля ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$). Це випромінювання ніщо інше, як теплова енергія тіла, яка в даний час перетворена в електромагнітну енергію і, отже, називається тепловим випромінюванням. Реальні матеріали показують різну поведінку в порівнянні з абсолютно чорним тілом. Радіаційні властивості реальних об'єктів завжди відхиляються від властивостей ідеального чорного тіла. Випромінювання, що падає на реальне тіло може піддатися наступним фізичним явищам, таким як відображення, поглинання і передача (проникність) (див.рис. 2.2).

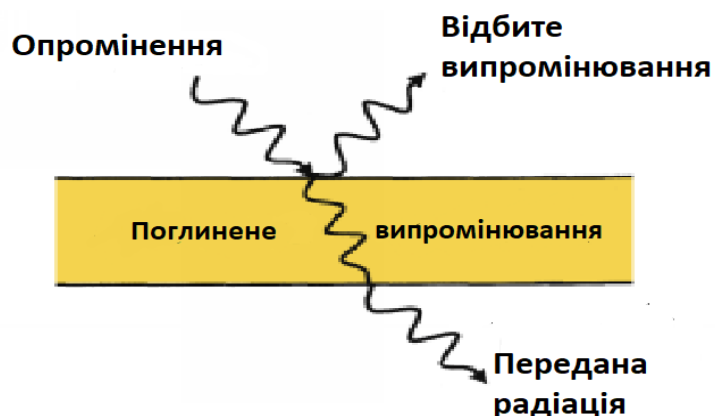


Рисунок 2.2 - Розсіювання випромінювання в реальних матеріалах

2.2.1. Абсорбція (поглинання)

Фракція опромінення, поглиненого поверхнею, називається абсорбційна здатність матеріалу. Він може бути охарактеризований як спрямований і спектральний розподіл. Зрозуміло, що поверхні можуть проявляти селективне поглинання щодо довжини хвилі і напрямку падаючого випромінювання. Однак для більшості технічних застосувань бажано працювати з поверхневими властивостями, які представляють спрямовані усереднення.

2.2.2 Відображення

Відображувальна здатність поверхні описує долю падаючого випромінювання, відбитого від поверхні. Якщо інтенсивність відбитого випромінювання не залежить від напрямку падаючого випромінювання і напрямку відбитого випромінювання, то поверхня називається дифузним випромінювачем. На противагу цьому, якщо кут падіння еквівалентний куту відображення, то така поверхня називається дзеркальним відбивачем. Хоча не існує ідеально дифузійної або дзеркальної поверхні, дзеркальну поведінку можна наблизити до полірованих або дзеркальних поверхонь. Дифузна поведінка близька до шорстких поверхонь і, ймовірно, зустрічається в промисловому використанні.

2.2.3 Коефіцієнт пропускання (трансмівності)

Частина випромінювання, що залишилася передається назовні, а кількість випромінювання, що пройшло через поверхню називається трансмісивністю. Цей процес також може бути вибірконим залежно від характеру матеріалу і падаючого випромінювання.

(Г) Коефіцієнт випромінювання (ϵ)

Коефіцієнт випромінювання являє собою відношення енергії, випромінюваної від об'єкта до зовнішнього і енергетичного випромінювання від чорного тіла. Випромінювальна здатність змінюється в залежності від стану

поверхні об'єкта, а також зі зміною температури і довжини хвилі. Якщо це значення не є точним, то температура не може бути виміряна точно. Іншими словами, коливання або зміна випромінювальної здатності тіла буде викликати зміну показань.

За законом Кірхгофа про теплове випромінювання : " При тепловій рівновазі, випромінювальна здатність тіла або поверхні (ϵ) дорівнює його коефіцієнту поглинання (абсорбції) (α)". Так, для абсолютно чорного тіла, $\epsilon = 1$ в той час як будь-який реальний об'єкт буде мати ϵ менше 1. Також трансмісивність (пропускна здатність) (τ) і відображення (ρ) дорівнюють нулю.

Сума коефіцієнтів трансмісивності, відображення і пропускання завжди дорівнює 1:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.1)$$

По випромінювальному фактору матеріали можуть бути класифіковані як:

- Метал
- Неметал
- Прозорі матеріали

2.2.4 Радіаційні принципи, яким подається чорне тіло

Середні або об'ємні властивості електромагнітного випромінювання, що взаємодіє з речовиною систематизовані в простий набір правил, званих закони випромінювання. Ці закони застосовуються, коли випромінююче тіло є джерелом випромінювання абсолютно чорного тіла. Як правило, умови чорного тіла застосовуються, коли тіло (випромінювач) має дуже слабку взаємодію з навколишнім середовищем і прирівнюється станом рівноваги. Деякі з цих законів наведені нижче:

Закон Планка: Закон Планка говорить, що інтенсивність електромагнітних випромінювань чорного тіла є функцією частоти (або довжини хвилі). Чорне тіло буде випромінювати енергію на всіх частотах. Закон Планка дає розподіл, що піки на певній довжині хвилі, зміщуються в

короткохвильову область більш високих температур, а також площа під кривою швидко збільшується з ростом температури (див.рис. 2.3).

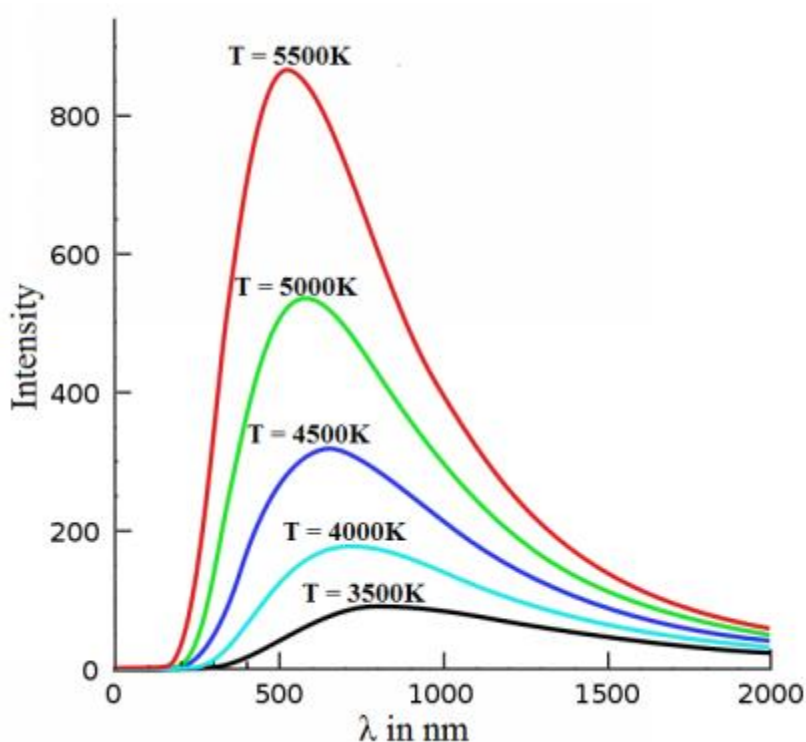


Рисунок 2.3 - Спектр абсолютно чорного тіла

Зміщення Віна і закон Стефана-Больцмана: закон зміщення Віна стверджує, що довжина хвилі, при якій емісивитет спектра абсолютно чорного тіла змінюється обернено пропорційно температурі чорного тіла, або ми можемо сказати, що чим спекотніше об'єкт, тим коротше довжина хвилі, на якій він буде випромінювати більшу частину випромінювання. Закон Стефана-Больцмана стверджує, що повна енергія, що випромінюється на одиницю поверхні абсолютно чорного тіла за одиницю часу обернено пропорційна четвертому ступеню температури чорного тіла.

Закон Вієнна використовує довжину хвилі піку розподіленого випромінювання, в той час як закон Стефана-Больцмана дає повну енергію, випромінювану чорним тілом на всіх довжинах хвиль (тобто площа під кривою Закону Планка (див.рис.2.3). Так, закон Вієнна дає пояснення зміщення піку в короткохвильову область з підвищенням температури, в той час як закон

Стефана-Больцмана пояснює зростання висоти кривої з ростом температури. Обидва ці закони випромінювання можуть бути отримані з закону Планка.

Коефіцієнт випромінювання відіграє важливу роль для вимірювання температури безконтактним методом із застосуванням пірометрів. Тому важливо встановити точний коефіцієнт випромінювання для вимірюваного матеріалу або цілі.

Випромінювальна здатність металу сильно залежить від довжини хвилі і температури. Для блискучих (гладких) металевих поверхонь, коефіцієнт випромінювання високий на коротких хвилях і зменшується зі збільшенням довжини хвилі. Крім того знос, окислення, забруднення, іржа і т.д. також можуть вплинути на коефіцієнт випромінювання металів. Таким чином, важливо вибрати інструмент, який вимірює інфрачервоне випромінювання на певній довжині хвилі і в межах певного діапазону температур, при якому метали мають найвищу можливу випромінювальну здатність. Оптимальна довжина хвилі при високих температурах для металів, лежить в межах від 0,8 до 1,0 мкм, на межі видимого діапазону. Довжини хвиль 1.6, 2.2, і 3.9 мкм, також можливі. Хороші результати можуть бути досягнуті за допомогою пірометрів порівняння у випадках, де вимірювання проводиться в порівняно широкому діапазоні температур і коефіцієнт випромінювання змінюється разом з температурою (наприклад, процеси опалення).

Поглинаюча здатність пластику змінюється з довжиною хвилі і товщиною матеріалу. Таким чином, оптимальне вимірювання температури здійснюється з довжинами хвиль, де поглинання майже дорівнює нулю. Поліетилен, поліпропілен, нейлон і полістирол це деякі з пластмас, які не є пропускаючими при довжині хвилі 3.43 мкм в той час як поліестер, поліуретан, тефлон FEP, і поліамід, являються не пропускаючими при довжині хвилі 7.9 мкм. Оптимальний спектральний діапазон для вимірювання може бути визначений шляхом виготовлення інфрачервоного пристрою.

Для вимірювання температури скла застосовуючи безконтактний метод вимірювання із застосуванням пірометра, необхідно враховувати такі важливі

параметри як відображаючі і поглинаючі здатності. Тільки ретельний підбір довжини хвилі полегшує вимірювання температури поверхні, а також більш глибоких шарів скла. Для вимірювання глибоких шарів підходять довжини хвиль 1.0 μm , 2.2 μm або 3.9 μm , в той час як для поверхневих вимірювань рекомендується вибирати довжину хвилі 5 мкм. При низьких температурах необхідно вибрати довжину хвилі 8,14 мкм і випромінюючу здатність рівну 0,85, для того, щоб компенсувати відбивну здатність скла. Так як скло є поганим провідником тепла, отже воно може швидко змінювати свою температуру поверхні, тому рекомендується застосовувати пірометри з коротким часом відгуку.

2.3 Умови навколишнього середовища

Поведінка на шляху передачі (зазвичай це навколишнє повітря) також має бути розглянуто до налаштування будь-якого ІЧ термометра (пірометр спектрального випромінювання). Є певні компоненти в атмосфері (наприклад, пар, вуглекислий газ і т.д.), які поглинають інфрачервоне випромінювання на деяких довжинах хвиль, через що послаблюється передача випромінювання. Таким чином, для точного вимірювання температури, ці поглинаючі фактори також повинні бути прийняті до уваги. Є так звані "вікна" в інфрачервоному спектрі, які не містять ці смуги поглинання (див.рис. 2.4). Типові вимірювальні вікна це діапазони: 1,1-1,7 мкм, 2 - 2,5 мкм, 3,5 мкм і 8,14 мкм. Таким чином, інфрачервоний вимірювальний прилад повинен бути розроблений з відповідними коригуючими атмосферними фільтрами. У таблиці 2.1, різні атмосферні вікна перераховані для різних сплавів.

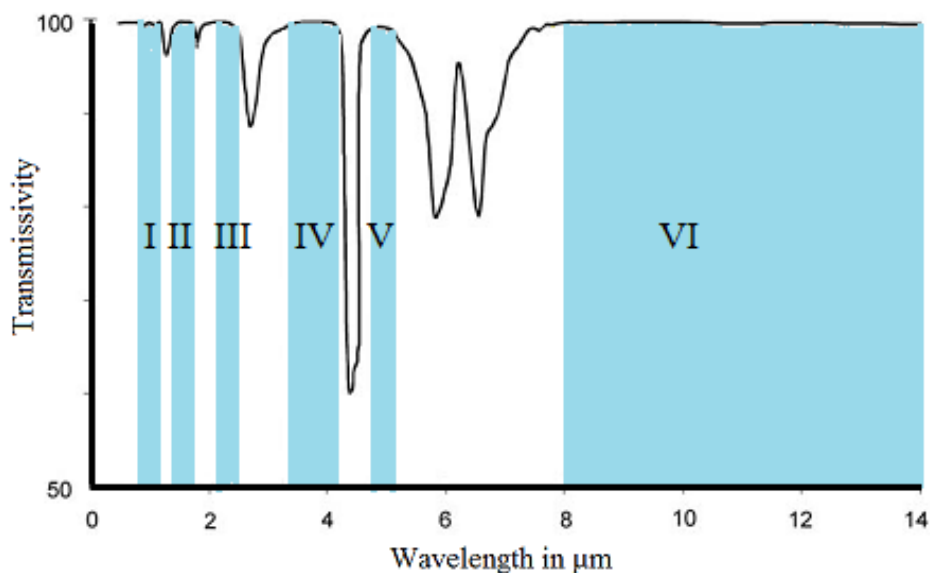


Рисунок 2.4 - Атмосферні вікна та передача повітря

Таблиця 2.1 - Різні атмосферні вікна перераховані для різних сплавів

Тип детектора (матеріал)	Вікно
Кремній	I
ГерманійІндій-арсенід-галій	II
Сульфід свинцю	III
Селенід свинцю Термопара піроелектричний детектор	IV
Термопара Піроелектричний детектор	V
Термопара Піроелектричний детектор	VI

2.4 Методи безконтактного вимірювання температур

На основі визначення параметрів теплового випромінювання, яке являється електромагнітними хвилями різної довжини, нагрітого тіла можна

судити про його температуру. Кількість випромінюваної енергії залежить від температури тіла. Датчики, якими вимірюють теплове випромінювання, називаються пірометричними сенсорами. Вони не впливають на температурне поле нагрітого тіла, тому що не вступають з ним в безпосередній контакт, в чому є головний плюс цих пристроїв. Тому дані методи названі безконтактними.

На основі законів випромінювання розроблені датчики таких типів:

- датчик сумарного випромінювання (СИ) – вимірюється повна енергія випромінювання;
- датчик часткового випромінювання (ЧИ) – вимірюється енергія в обмеженому фільтром ділянці спектра;
- датчики спектрального відношення (СО) – визначається відношення енергії фіксованих ділянок спектра.

Температура розрізняються на радіаційну, яскравісну та колірну в залежності від типу датчика.

Радіаційна температура фізичного тіла чисельно дорівнює температурі абсолютно чорного тіла, при якій інтегральне випромінювання обох тіл однакові. Яскравісна температура реального тіла – температура при якій щільність потоку спектрального випромінювання реального тіла рівна щільності потоку спектрального випромінювання абсолютно чорного тіла для тієї самої довжини хвилі при дійсній температурі. Колірною температурою реального тіла називають температуру при якій відношення щільності потоків випромінювання АЧТ для двох довжин хвиль λ_1 та λ_2 дорівнює відношенню густини потоків випромінювань реального тіла для тих же довжин хвиль при дійсній температурі T_d .

2.5. Датчики часткового випромінювання

Монохроматичні оптичні і фотоелектричні пірометри, які визначають енергію потоку у вузькому діапазоні довжин хвиль, відносяться до датчиків для вимірювання яскравісної температури об'єкту.

Принцип роботи оптичних датчиків полягає в залежності щільності потоку монохроматичного випромінювання від температури. На рис. 2.5 показана схема оптичного пірометра з "зникаючою" ниткою, принцип дії якого заснований на зіставленні яскравості об'єкту виміру і градуйованого джерела випромінювання в певній довжині хвилі.

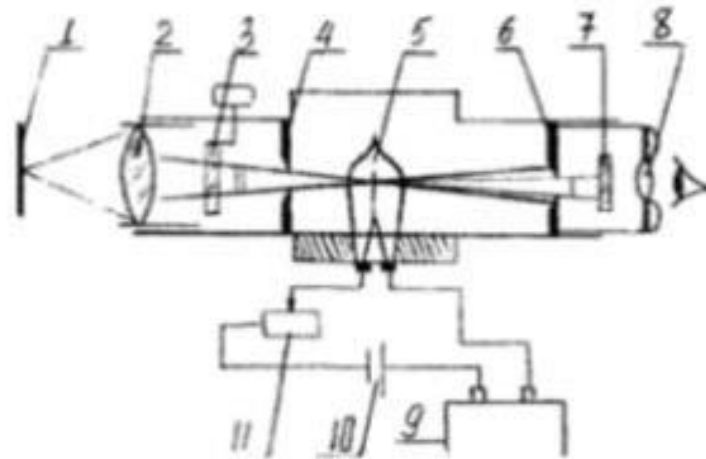


Рисунок 2.5 - Оптичний датчик теплового випромінювання

Зображення випромінювача 1 лінзою 2 і діафрагмою 4 об'єктива пірометра фокусується в площині нитки розжарення лампи 5. Оператор через діафрагму 6 лінзу 8 окуляра і червоний світлофільтр 7 на тлі розжареного тіла бачить нить лампи. Переміщаючи движок реостата 11, оператор добивається однакової яскравості нитки і випромінювача, змінюючи проходячий через лампу струм. Нитка буде виглядати чорною смугою на фоні тіла, якщо її яскравість буде менше яскравості тіла, якщо її температура буде більшою, виглядатиме світлою смугою на темному фоні.

Якщо яскравість буде рівною, оператору не буде видно нитку. Це вказує на те, що яскравісна температура об'єкту виміру і нитки лампи однакові.

Живлення лампи відбувається завдяки батареї 10. Прилад 9, фіксувальний силу струму, що протікає у вимірювальному ланцюзі, проградуйований в значеннях залежності сили струму і яскравісної температури абсолютно чорного тіла, що дозволяє виробляти прочитування результату в °С.

Фотоелектричні датчики часткового випромінювання забезпечують безперебійні автоматичні виміри і реєстрацію температури. Принцип їх роботи полягає у використанні взаємозв'язку інтенсивності випромінювання від температури у вузькому інтервалі довжин хвиль спектру. Фотодіоди, фотоопори, фотоелементи і фотопомножувачі використовують у цих приборах як приймачі.

Фотоелектричні датчики часткового випромінювання поділяються на дві групи:

- в яких величина потоку приймача випромінювання являється мірою температури об'єкту;

- які містять постійне джерело випромінювання, а фотоприймач є тільки показником рівності яскравостей данного джерела і об'єкту.

На рис. 2.6 зображена схема фотоелектричного датчика другої групи, у якому як приймач випромінювання застосовується фотоелемент. Потік від випромінювача 1 лінзою 2 і діафрагмою 3 об'єктиви фокусується на отворі 7 в утримувачі світлофільтру 5 так, щоб цей отвір був перекритий зображенням візованої ділянки поверхні випромінювача. У цьому випадку яскравість випромінювача (температура) визначає величину світлового потоку, що падає на катод фотоелемента 6, який знаходиться за світлофільтром.

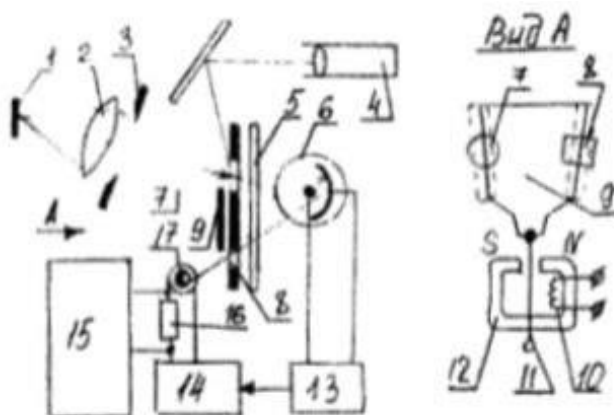


Рисунок 2.6 - Фотоелектричний датчик теплового випромінювання

Через отвір 8, який знаходиться у утримувачі світлофільтру, на фотоелемент потрапляє потік від лампи зворотного зв'язку 17. Постійний магніт 12 та котушка збудження 10 забезпечують зворотно-поступальний рух заслінки

9, яка, в свою чергу, забезпечує подання світлових потоків від випромінювача 1 і лампи 17 на катод поперемінно з частотою 50 Гц. У вібраторі перемагнічується сталевий якір 11, який з частотою 50 Гц по черзі притягується полюсами магніту 12 і пересуває заслінку 9. При різниці в світлових потоках випромінювача 1 і лампи 17 в струмі фотоелемента з'явиться змінна складова, що має частоту 50 Гц і амплітуду, пропорційну різниці цих потоків. Фазовий детектор 14 забезпечує випрямлення змінної складової, а підсилювач 13- посилення. Отриманий вихідний сигнал подається на лампу, через що сила струму розжарювання змінюється. Це буде відбуватися доти, доки світлові потоки на катоді фотоелемента від двох джерел не зрівняються. Отож, струм лампи зворотного зв'язку напряму пов'язаний з яскравісною температурою об'єкту виміру. Ланцюг лампи 17 містить опір, що калібрується, 16, падіння напруги на ньому пропорційно силі струму і визначається швидкодіючим потенціометром 15, у якому є температурна шкала. Окуляр 4 забезпечує наведення пристрою на об'єкт виміру.

2.6.Радіаційні пірометри

Вимірювання температури по випромінюванню тіла базується на використанні основних законів випромінювання, які встановлюють зв'язок між температурою випромінювача та його спектральним світінням, тобто кількістю енергії, яка випромінюється за одиницю часу із одиниці поверхні досліджуваного об'єкту і яка міститься в певному діапазоні довжин хвиль. В залежності від спектральної чутливості пристрою вимірювання температури по випромінюванню розділяють радіаційні, квазімонохроматичні і спектральні випромінювання. [27]

Теоретичною основою радіаційної пірометрії є закон Стефана-Больцмана, який встановлює зв'язок між інтегральним значенням спектрального свічення, тобто енергетичного свічення R , і абсолютною температурою випромінювача. Пристрої, які базуються на цьому принципі, називаються пірометрами повного (сумарного) випромінювання. [27]

Радіаційні пірометри являються самими простими по будові. Правда, вони найменш точні серед приладів, які вимірюють температуру по випромінюванню. Радіаційний пірометр складається з оптичної системи (телескопа), первинний перетворювач потоку випромінювання в електричний сигнал і вторинного вимірювального пристрою. В якості первинного перетворювача частіше за все використовують зачернені термоелектричні перетворювачі або болометри, які чутливі до всіх довжин хвиль сприйманого потоку випромінювання.

Існує два різновиди оптичних систем радіаційних пірометрів: рефракторна (з заломленою лінзою) та рефлекторна (з відбиваючим внутрішнім дзеркалом) системи. В рефракторному пірометрі (рис. 2.7, а) випромінювання від досліджуваного об'єкту 1 надходить на об'єктив (лінзу) 2 та через діафрагму 3 фокусується на гарячому спаї термоперетворювача. Виникаюча термо-е.р.с. вимірюється мілівольтметром, який градується в одиницях вимірюваної температури.

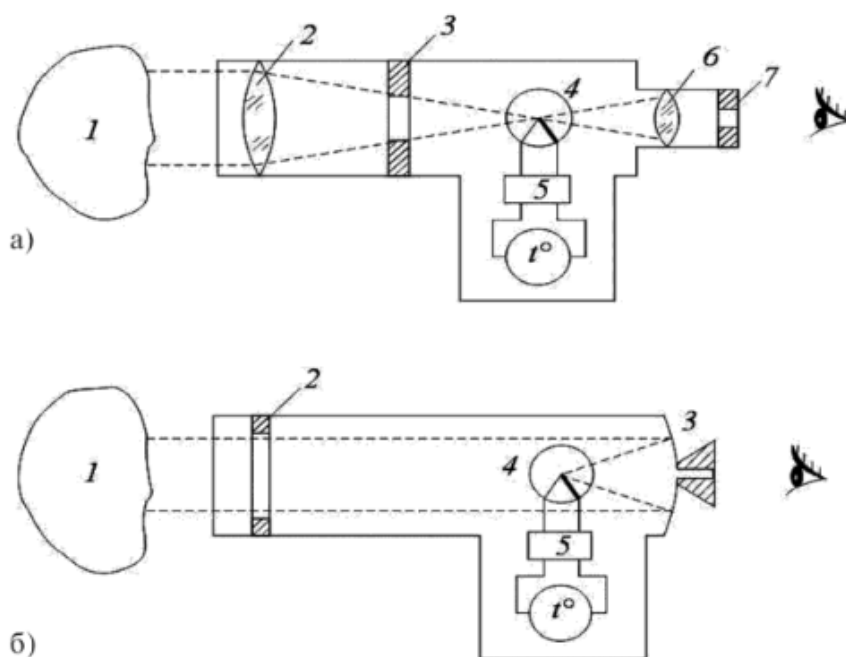


Рисунок 2.7 - Схеми пірометрів повного випромінювання: а- рефракторної системи; б- рефлекторної

Для компенсації похибки від зміни температури вільних кінців термоперетворювачів використовують пристрій 5 автоматичної корекції

похибки у вигляді, наприклад, мостової схеми. Для візування телескопа на об'єкт вимірювання служать окуляр 6 та діафрагма 7. [27]

В рефлекторному телескопі (рис. 2.7, б) випромінювання від досліджуваного об'єкту 1 через діафрагму 2 поступає на рефлектор 3, відображається і фокусується на гарячих спаях термоперетворювача. Ланцюг вимірювання термо-е.р.с. складається, як в рефракторній системі, із вимірювального пристрою і пристрою 5 автоматичної корекції похибок від змінення температури вільних кінців термоперетворювача.

Радіаційні пірометри градууються по чорному випромінювачу. Тому при зміні температури реальних, нечорних тіл через їх менші випромінювальні здатності радіаційні пірометри показують не дійсну температуру T_x досліджуваного об'єкту, а нижчу, так звану радіаційну температуру T_p . І справді, згідно закону Стефана-Больцмана енергетичне свічення абсолютно чорного тіла

$$R^* = \sigma T_p^4. \quad (2.2)$$

Звідки радіаційна температура

$$T_p = \sqrt[4]{R^*/\sigma},$$
$$\text{де, } \sigma = 5,6697 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K}^4). \quad (2.3)$$

Для реального тіла енергетичне свічення R і дійсне значення температури вимірювача пов'язані залежністю

$$R = \varepsilon_0 \sigma T_x^4, \text{ а } T_x = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon_0}, \quad (2.4)$$

Де ε_0 – коефіцієнт сумарного випромінювання, який дорівнює відношенню енергетичного свічення досліджуваного об'єкта до енергетичного свічення чорного тіла ідентичної температури.

Отже, радіаційна температура, виміряна пірометром повного випромінювання пов'язана з дійсною температурою досліджуваного об'єкту відношенням

$$T_x = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon_0}, \text{ а } T_p = T_x \sqrt[4]{\varepsilon_0}. \quad (2.5)$$

Поправка, яку необхідно додати до виміряної пірометром повного випромінювання радіаційній температурі

$$\Delta T = T_x - T_p = T_x - (1 - \sqrt[4]{\epsilon_0}) = T_p (\sqrt[4]{1/\epsilon_0} - 1) \quad (2.6)$$

а відносна похибка, яка викликана неврахуванням коефіцієнта сумарного випромінювання досліджуваного об'єкта

$$\delta T_{\epsilon_0} = (\Delta T / T_x) \cdot 100\% = (\sqrt[4]{1/\epsilon_0} - 1) \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Становить для $\epsilon_0 = 0,9$ приблизно 3%, для $\epsilon_0 = 0,8$ прибіл. 6%, а для $\epsilon_0 = 0,3$ досягає 35%.

Для реальних фізичних об'єктів ϵ_0 визначається властивостями об'єкту, станом його поверхні та другими факторами та може знаходитись у межах 0,9..0,95 до 0,1 та навіть нижче. Тому радіаційні виміри температури супроводжуються здебільшого попередньою оцінкою ϵ_0 внесення надалі поправок, в тому числі, регулюванням чутливості. Цього можна досягнути попереднім градуванням радіаційного пірометра, суть якого полягає в одночасному вимірі температури цього об'єкта за допомогою радіаційного пірометра та другого засобу, який виміряє не радіаційну, а дійсну температуру, наприклад, за допомогою термоелектричного термометра або пірометра спектрального відношення. Порівнюючи ці показання, визначають ϵ_0 і для всіх наступних вимірів температури цього об'єкту за допомогою радіаційного пірометру, може бути введена поправка на коефіцієнт сумарного випромінювання.

Пірометри повного випромінювання агрегатного комплексу перетворювачів пірометрів та пірометрів випромінювання типу АПІР-С призначені для вимірювання температури в діапазоні 30-3000 оС з основною похибкою 1,5-2%.

На практиці зробити приймач випромінювання, який поглинав би випромінювання всіх довжин хвиль від 0 до ∞ , вельми важко. Тому дуже часто задовольняються приймачами, які сприймають випромінювання в обмеженому діапазоні довжин хвиль від λ_1 до λ_2 . Пірометри, принцип дії яких ґрунтується

на залежності енергетичного свічення випромінювача від температури в обмеженому інтервалі довжин хвиль, називають пірометрами часткового випромінювання. [27]

Пірометри, принцип дії яких базується на використанні залежності від температури спектрального свічення або пропорційної до них спектральної яскравості (тобто спектрального свічення, віднесеного до одиниці просторового кута), називають квазімонохроматичними або яскравісними. Найбільш поширені серед них візуальні пірометри зі зникаючою ниткою (рис. 2.8, а), які називаються також оптичними пірометрами. При вимірюванні такими пірометрами випромінювання від досліджуваного об'єкту 1 через об'єктив 2 фокусується на нитку розжарювання 4. Між об'єктивом і лампою пірометра при вимірюванні температури вище 1500 оС (допустима температура нитки розжарювання) ставиться поглинаюче скло 3. Зображення об'єкта дослідження та нитки пірометричного напруження при вимірюванні температури спостерігається пірометристом через окуляр 6. Між окуляром і ниткою пірометричного напруження знаходиться червоний світлофільтр 5.

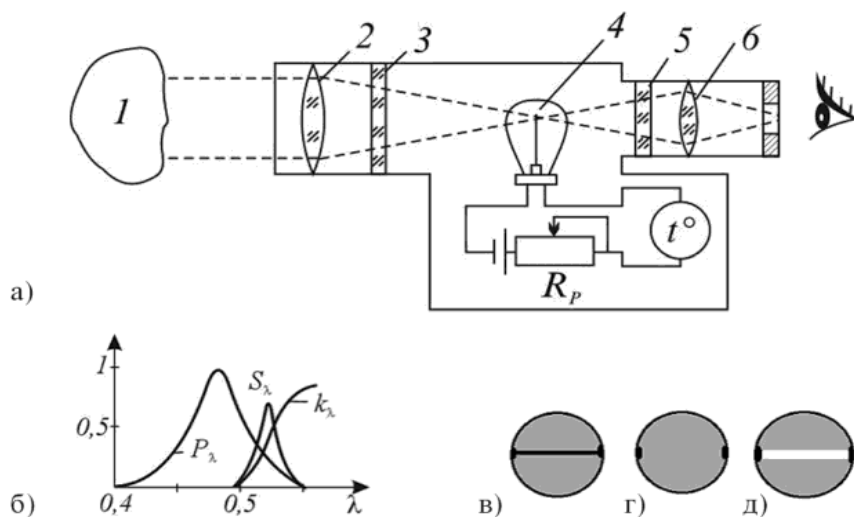


Рисунок 2.8 - До принципу дії оптичного пірометра

Вимірюють температуру нитки 4, регулюючи струм напруження за допомогою регулюючого реостата R_p до зникнення видимості нитки розжарювання, як на рис. 2.8, г (на рис. 2.8 в нитка розжарювання недогріта, на

2.8, д- перегріта). Значення цього струму вимірюється приладом, проградуированим в одиницях вимірюваної температури.

Описаний вище оптичний пірометр чутливий до енергетичного свічення дуже вузького діапазону довжин хвиль в області так званої ефективної довжини хвилі $\lambda_{\text{эф}}=0,65$ мкм. Спектральна чутливість ока людини характеризується чутливістю $R_{\lambda} = f(\lambda)$ (рис.2.8, б), а червоний світлофільтр- спектральним коефіцієнтом пропускання $k_{\lambda} = \phi(\lambda)$.

Отже, ефективна чутливість такої системи $S_{\lambda} = F(\lambda)$ має максимум при $\lambda_{\text{эф}} \approx 0,65$ мкм та стрімко падає до нуля при довжинах хвиль, які відрізняються від $\lambda_{\text{эф}}$ навіть на $\pm 0,05$ мкм.

Як і пірометри повного випромінювання, яскравісні пірометри градууються по чорному випромінювачу. Тому виміряна так звана яскравісна температура $T_{\text{я}}$ реального не чорного тіла з монохроматичним коефіцієнтом теплового випромінювання $\alpha_{\lambda} < 1$ буде відрізнятися від дійсної $T_{\text{х}}$. Поправку $\Delta T_{\text{я}}$, яку потрібно додати до виміряної оптичним пірометром яскравісної температури для отримання дійсного значення вимірюваної температури можна визначити по формулі

$$\Delta T_{\text{я}} = T_{\text{х}} - T_{\text{я}} = \frac{\alpha_{\lambda} T_{\text{н}}^2}{1 - \alpha_{\lambda} T_{\text{я}}} \quad (2.8)$$

а відносну похибку від нехтування коефіцієнтом α_{λ}

$$\delta T_{\lambda} = \frac{\alpha_{\lambda} T_{\text{н}}}{1 - \alpha_{\lambda} T_{\text{я}}} 100\%, \quad (2.9)$$

Значення якої для хвиль довжиною $\lambda = 0,65$ мкм в залежності від α_{λ} при вимірюванні температури близько 1000К становить для $\alpha_{\lambda} = 0,9$ приблизно 0,5%, $\alpha_{\lambda} = 0,8$ близько 1%, для $\alpha_{\lambda} = 0,3$ досягає 6%. При інших однакових умовах при $T_{\text{х}} = 2000\text{К}$ для $\alpha_{\lambda} = 0,3$ ця похибка може досягати 20%.

Монохроматичні візуальні пірометри зі зникаючою ниткою типу «Луч» призначені для вимірювання температур в діапазоні від 800 до 5000 °С. Їх основна похибка в діапазоні 800- 1400°С становить 14°С, в діапазоні 1200-2000 °С- 20°С, 1800-5000°С- 150°С.

Візуальні пірометри, невід'ємним елементом вимірювального ланцюга яких є око людини, непридатні для роботи в системах автоматичного вимірювання і регулювання температури. Тому поширення отримали квазімонохроматичні фотоелектричні пірометри (як і фотоелектричні пірометри часткового випромінювання). В фотоелектричних монохроматичних пірометрах фотоелемент в поєднанні з червоним світлофільтром підібрані так, щоб ефективна довжина хвилі такої системи, як в оптичних пірометрах, дорівнювала $\lambda=0,65\text{мкм}$. Це забезпечує порівнянність результатів фотоелектричних і оптичних пірометрів. [27]

2.7 Датчики сумарного випромінювання

Найчастіше датчики сумарного випромінювання називаються радіаційними, через те, що вони вимірюють радіаційну температуру. Принцип їх роботи базується на використанні закону Стефана-Больцмана. Коли застосовуються оптичні системи в СВ вимірювання температури проводиться по щільності інтегрального випромінювання у невеликому інтервалі довжин хвиль: для плавленого кварцу робочий спектральний діапазон складає 0,4-4 мкм, для скла-0,4-2,5 мкм.

Датчик виготовляється на манер телескопа, лінза об'єктиву котрого зосереджується на теплочутливому приймачі випромінювання нагрітого об'єкта. Термоелектричний перетворювач, болометри (металеві та напівпровідникові), термобатарей, біметалічні спіралі і подібне застосовується як термочутливий елемент.

Частіше використовуються термобатарей (рис. 2.9, а), в яких застосовується 6-10 по черзі з'єднаних маленьких термопар. На розклепані «гарячі» кінці 4 термопар 2 потрапляє потік випромінювання. До зафіксованих на слюдяному кільці 3 тонких пластинок 1 приварюються «холодні» кінці термопар. Для прикріплення до вимірювального прибору використовуються металеві виводи 5, як правило ними служать потенціометри та мілівольтметри. Робочі кінці термопар нагріваються, поглинаючи падаючу енергію. «Холодні»

кінці знаходяться за межами потоку випромінювання, у них температура така ж, як у корпусу телескопа. Через виниклу різницю температур термобатарея розвиває термо-е.р.с еквівалентну температурі робочих спаїв і тіла виміру.

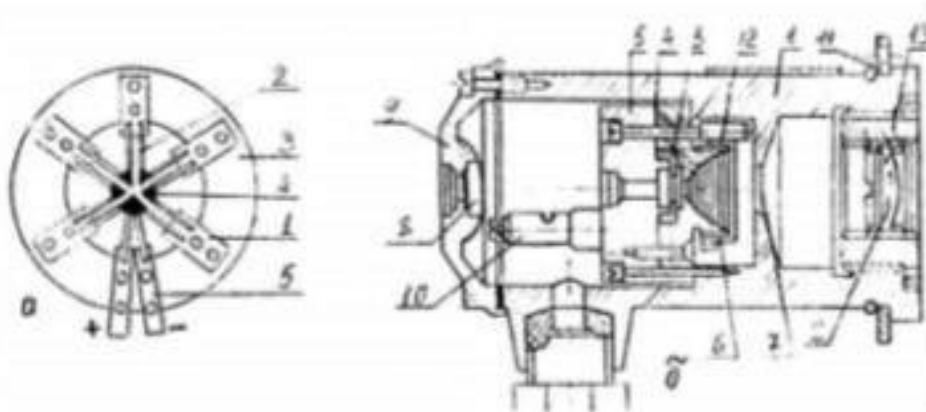


Рис. 2.9 - Датчик сумарного теплового випромінювання

На рис. 2.9 б зображений прибор телескопа СВ. Він містить: корпус 1 з діафрагмою 7; об'єktiv зі скляною або кварцевою лінзою 2, встановлену у втулці 13 прикріпленій до корпусу; блок термобатареї, який формується з самої термобатареї 3, корпусу 5, відростка, на який нагвинчує рухлива діафрагма 6, контактних гвинтів; компенсаційний мідний опір 4, який шунтує термобатарею і зменшує вплив вимірів температури телескопа на показання пірометра; окуляр, включаючий лінзу 8 і захисне скло 9. Фланець 11 призначений для скріплювання корпусу і захисної арматури, що забезпечує роботу пірометра в важких умовах металургійного виробництва.

Завдяки переміщенням діафрагми 6, зубчастий вінець якої з'єднаний із зубами трубки 12, отримується стандартне градуювання. Встановлена у телескопі діафрагма обмежує тілесний кут візування, що сприяє відсутності впливу на показання розмірів випромінювача і його відстані від датчика. При цьому на термобатарею потрапляє випромінювання тільки з певної ділянки тіла виміру. З показників візування, які є співвідношенням меншого діаметру випромінювача до відстані від об'єкту виміру до об'єктиву телескопа,

визначається розмір цієї ділянки. Отвір діафрагми 6 повністю перекривається зображенням круга, вписаним у випромінювач.

Телескопи діляться на 2 типи: ширококутні (показник візування більше 1/16) та вузькокутові (показник рівний або менше 1/16). Для виміру температури в схему пірометра між телескопом и вторинним приладом додається до складу панель зрівняльних і еквівалентних опорів, яка забезпечує безперервне навантаження телескопа при роботі з одним або двома вторинними приладами та заміну телескопа одного градування на телескоп іншого градування.

2.8 Випускні пірометричні датчики

На даний момент випускається безліч різних пірометричних приладів..

Піроелектричні інфрачервоні чутливі елементи мають високу чутливість і надійне виконання.

Будь-якому тілу або об'єкту з температурою вище абсолютного нуля ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) незалежно від його агрегатного стану властиве теплове (температурне) випромінювання. Тепловим (температурним) випромінюванням (ТВ) називають:

- електромагнітне випромінювання, що випускається тілом, речовина якого знаходиться в стані термодинамічної рівноваги і характеризується певною температурою;

- передачу енергії від одних тіл до інших у вигляді електромагнітних хвиль за рахунок їх теплової енергії. Воно в основному припадає на інфрачервону ділянку спектра, тобто на довжини хвиль від 0,74 мкм до 1000 мкм (рис. 2.10), і з ростом температури його загальна інтенсивність зростає.

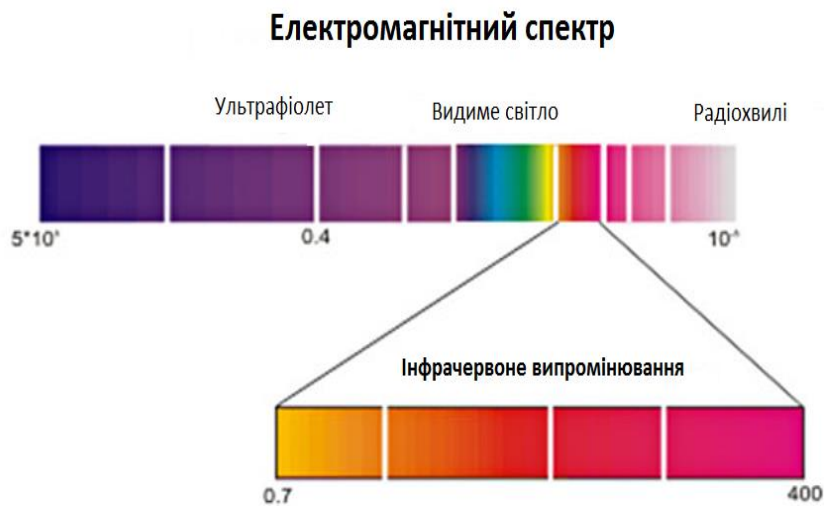


Рисунок 2.10 - Електромагнітний спектр

Завдяки своїй електромагнітній природі ТВ, як і світло, поширюється в просторі прямими лініями зі швидкістю світла, що дає можливість вимірювати температурні показники об'єктів і тіл на відстані. На вимірюванні теплової потужності повного випромінювання об'єкта як у видимому, так і невидимому діапазоні, і заснований принцип роботи радіаційних інфрачервоних (ІЧ) пірометрів, або пірометрів повного випромінювання. Їх схематичну будову зображено на рис. 2.11.

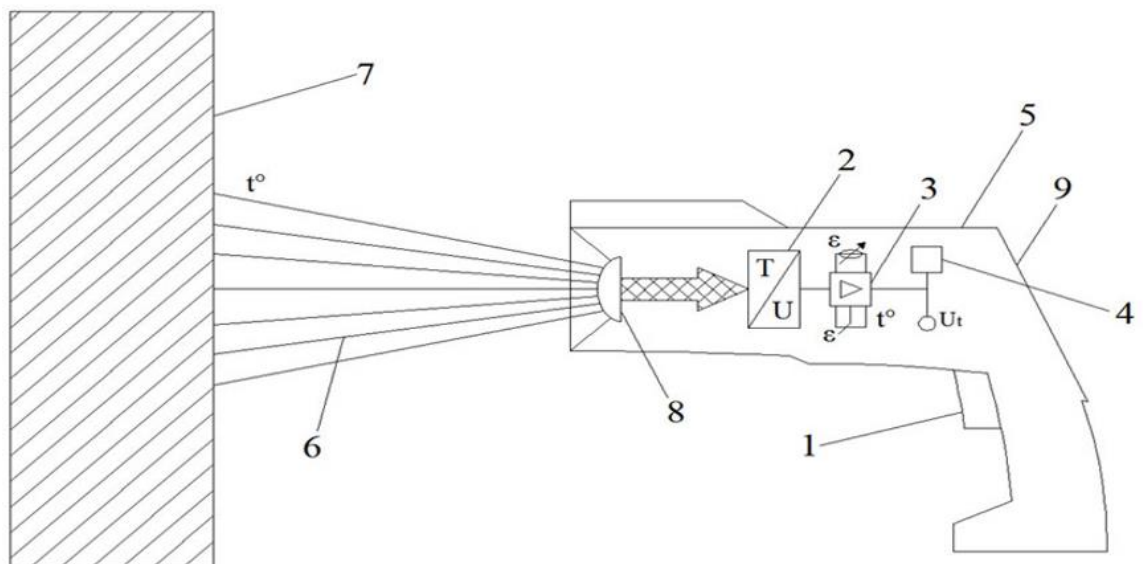


Рисунок 2.11- Схематична будова пірометричного датчика: 1-кнопка включення/вимірювання; 2-інфрачервоний датчик; 3-електронний

перетворювач; 4-вимірювальний пристрій; 5-корпус; 6-теплове випромінювання(ТВ); 7-об'єкт вимірювання; 8-система лінз; 9-дисплей.

Працюють інфрачервоні безконтактні термометри наступним чином. При наведенні на об'єкт вимірювання 7 і натисканні кнопки включення / вимірювання 1 прилад вмикається, і теплове інфрачервоне випромінювання 6 від об'єкта вимірювання 7 фокусується оптичною системою лінз 8 і передається на інфрачервоний датчик 2 (ІЧ діод). Останній перетворює потрапляюче на нього випромінювання в електричний сигнал, пропорційний його потужності (а значить, і температурі об'єкта). Електричний сигнал від датчика 2 перетворюється електронним перетворювачем 3 і надходить на вимірювальний пристрій 4, де обробляється, конвертується в значення температури (в градусах) і виводиться на цифровий дисплей 9.

Можливість проводити вимірювання без прямого, безпосереднього контакту з середовищем або поверхнею вимірювання дозволяють віднести інфрачервоні пірометри до групи приладів неруйнівного контролю. Це означає, що їх можна використовувати в наукових цілях для дотримання чистоти і цілісності експериментів, а також для вимірювання, контролю, діагностики, моніторингу, прогнозування, сертифікації (зокрема, екологічної), сканування і профілактики в самих різних сферах діяльності людини без втручання в технологічний процес, роботу або конструкцію об'єкта. При цьому забезпечується об'єктивність і висока точність результатів вимірювання завдяки нечутливості цих пристроїв до зовнішніх впливів (завадостійкості).

На даний момент випускається безліч різних пірометричних приладів.

Піроелектричні інфрачервоні чутливі елементи мають високу чутливість і надійне виконання.

Особливості приладів:

- висока чутливість;
- висока стабільність до температурних змін;
- висока несприйнятливості до зовнішньої перешкоди;
- Високе співвідношення якість-ціна.

тому що деякі матеріали можуть мати різну здатність до випромінювання. А також прилад здатний проводити вимірювання в двох режимах: режимі фіксації і режимі безперервного вимірювання.

3.1.1 Принцип дії термометра

Інфрачервоні термометри вимірюють температуру поверхні непрозорого об'єкта. Оптика термометра визначає енергію інфрачервоного випромінювання, збираючи і фокусуючи його на детектор. Електронна система термометра обробляє цю інформацію і відображає її на дисплеї у вигляді значення температури. Лазер використовується виключно для прицілювання.

3.1.2 Позиціонування найбільш гарячої і холодної точки

Щоб, встановити місце розташування найбільш гарячої або холодної точки, направте термометр за межі досліджуваної області. Потім повільно сканувати досліджувану область рухами вгору і вниз, поки не знайдете розташування найбільш гарячої або холодної точки (див. рис 3.2).

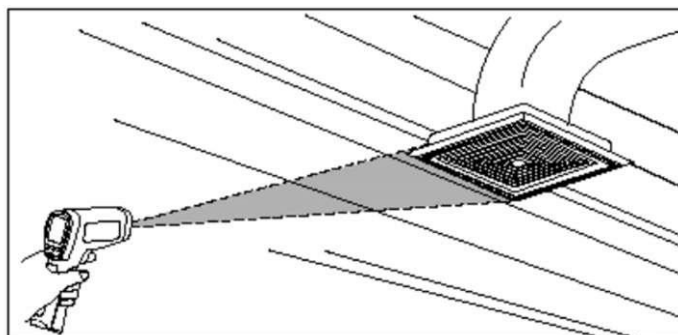


Рисунок 3.2 - Визначення положення найбільш гарячої або холодної точки

3.1.3 Відстань і розмір плями

Зі збільшенням відстані (D) до вимірюваної області розмір плями (S), в якому проводиться вимір, також зростає. Розмір плями відповідає 90% охопленої енергії. Максимальне значення $D: S$ досягається, коли відстань від

термометра до мети становить 600 мм (60 см), при цьому прилад вловлює випромінювання від плями діаметром 20 мм (2 см) (див. Рис 3.3).

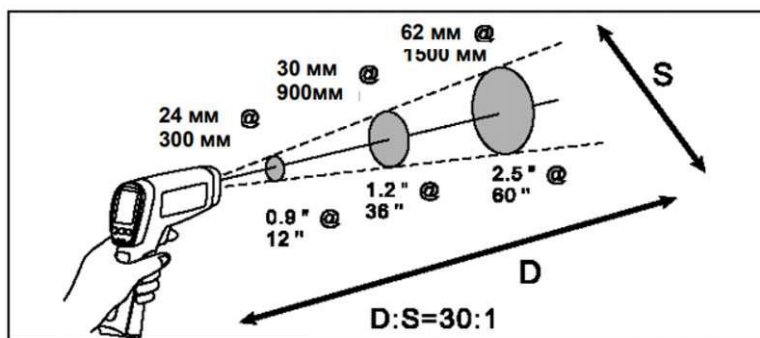


Рисунок 3.3 - Випромінювання від плями

3.1.4 Коефіцієнт випромінювання

Коефіцієнт випромінювання характеризує радіаційну здатність матеріалу. Більшість органічних матеріалів, а також забарвлених або окислених поверхонь мають коефіцієнт випромінювання близько 0,95. Якщо це можливо, то щоб уникнути помилок вимірювання, які можуть бути викликані наявністю на досліджуваній поверхні елементів з металевим блиском, покрийте поверхню клейкою стрічкою або рівним шаром чорної фарби.

Таблиця 3.1 - Коефіцієнт випромінювання поверхні

Вимірювальна поверхня	Положення перемикача
Окислений	0.2-0,4
Окислений	0.3
Шерохватий	0.1-0,3
Блискуча	0.3
Окислена	0.5
Окислена	0.4-0,8
Контактні колодки	0.6
сплав	0.3-0,8

3.2 Пірометр Mastech "MS65222B"



Рисунок 3.4 - Пірометр Mastech "MS65222B"

Цифровий пірометр Mastech "MS65222B" - це дистанційний вимірювач температури, що дозволяє вимірювати температуру поверхонь твердих тіл безконтактним способом. Діапазон вимірювань становить від -20°C до $+500^{\circ}\text{C}$. Цифровий пірометр для зручності користування оснащений лазерним цілевказівником і РК-дисплеєм. Прилад має функцію утримання показників на дисплеї, підсвічування РК-дисплея, індикатор розряду батареї.

3.2.1 Технічні характеристики

Значення допуску допустимі до одного рік після калібрування при температурі навколишнього середовища від 18°C до 28°C і вологість до 75%.

Таблиця 3.2 - Похибки вимірювання температур

Величина	Обхват	Похибка вимірювання
Температура	$-20\sim 0^{\circ}\text{C}$	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
	$-4\sim 32^{\circ}\text{F}$	$\pm 5^{\circ}\text{F}$
	$0\sim 500^{\circ}\text{C}$	$\pm(2.0\% + 2)$
	$32\sim 932^{\circ}\text{F}$	$\pm(2.0\% + 3)$

3.2.2 Характеристики

Безконтактний термометр виявляє інфрачервоне світло, яке випромінюють предмети. Пристрій фокусує інфрачервону енергію об'єкта на датчику через лінзу і змінює температуру поверхні на електричний сигнал, мікрокомп'ютер обчислює та відображає температуру вимірювання на РК-дисплеї.

Таблиця 3.3 - Характеристика пірометра

Разделительная способность	10:1
Захранване	Батерия от 1.5V 2xAAA (NEDA 24A, или LR03)
Спектрален отговор	8~14μm
Работна температура	0° ~ 40° C
Температура за съхранение	-10° ~ 50° C
Индикатор за изразходвана батерия	На дисплея се показва
Размери	143 x 99 x 47 mm

3.3 Пірометр гігрометр з термопарою Мегіон 16800



Рисунок. 3.5 - Пірометр гігрометр з термопарою Мегіон 16800

Цифровий безконтактний інфрачервоний термометр з функцією вимірювання навколишньої температури, вологості, точки роси і функцією контактного вимірювання температури за допомогою термопари к-типу МЕГЕОН 16800, це пристрій, який дозволяє безпечно і швидко вимірювати температуру поверхні об'єкта. Вимірювання ймовірності виникнення цвілі, вимірювання різниці температур навколишнього середовища і поверхні. Прилад володіє зрозумілим інтерфейсом і кольоровим дисплеєм. Низьке енергоспоживання за рахунок застосування сучасних мікропроцесорних рішень і обробки даних. Ультрафіолетовий ліхтарик для швидкого виявлення витоків (наприклад холодоагенту кондиціонера автомобілів).

Прилад має певний кут і поле зору, як показано на рис. 3.6.

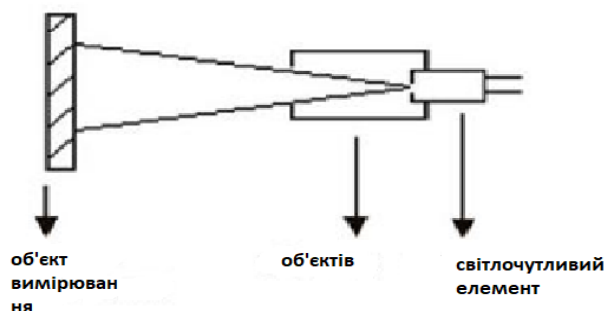


Рисунок 3.6 - Співвідношення між відстанню до об'єкта і діаметром області вимірювання.

Необхідно впевнитись, що досліджуваний об'єкт цілком перекриває поле зору приладу, і в поле зору не попадає нічого, крім об'єкта вимірювання. Чим більше об'єкт вимірювання, тим більше може бути відстань між ним і термометром при вимірюванні температури. Чим менше об'єкт, тим ближче до нього необхідно розміщувати термометр. Співвідношення між відстанню до об'єкта і його розміром становить 12: 1, як показано на наступній схемі:

При вимірі термометр буде випромінювати світло у вигляді кільця-індикатора. Виміряна температура - це температура поверхні об'єкта в межах кільця рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – температура поверхні об'єкта в межах кільця

При вимірі термометр буде випромінювати світло у вигляді кільця-індикатора. Виміряна температура - це температура поверхні об'єкта в межах кільця рис. 3.8.

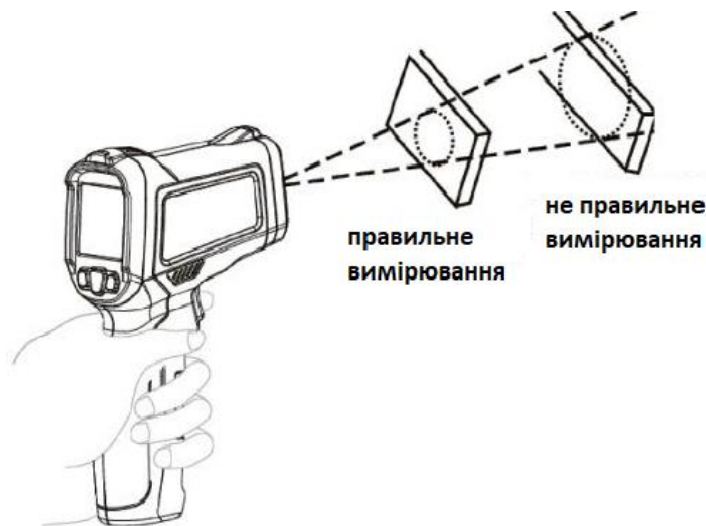


Рисунок 3.8 - Температура поверхні об'єкта в межах кільця

3.3.1 Коефіцієнт випромінювання

Коефіцієнт випромінювання характеризує здатність об'єкта випускати теплове випромінювання в інфрачервоному діапазоні. Чим вище коефіцієнт випромінювання матеріалу об'єкта, тим сильніше виявляється випромінювальна здатність його поверхні. Коефіцієнт випромінювання більшості органічних матеріалів лежить в межах 0,85-0,98. За замовчуванням в термометрі встановлений коефіцієнт випромінювання дорівнює 0,95. Це значення слід коригувати відповідно до матеріалу об'єкта вимірювання. При

вимірі необхідно враховувати вплив коефіцієнта випромінювання на результат вимірювання. У наступній таблиці наведені довідкові значення коефіцієнта випромінювання для різних матеріалів.

Таблиця 3.4 - Коефіцієнт випромінювання для різних матеріалів

Матеріал		Коефіцієнт випромінювання
Алюміній	оксидований	0,2-0,4
	сплав А3003 оксидований	0,3
	сплав А3003 шорсткий	0,1-0,3
Мідь	оксидований	0,4-0,8
	покриття монтажних плат	0,6
Цинк	оксидированный	0,1
Асбест		0,95
Асфальт		0,95
Графіт		0,9
Глина		0,95
Бетон		0,95
Тканина		0,95
Листовое стекло		0,85
Гіпс		0,8-0,95
Лід		0,98
Вапняк		0,98
Бумага		0,95
Пластмасса		0,95
Почва		0,9-0,98
Вода		0,93
Дерево (натуральне)		0,9-0,95

3.4 Пірометр Condrol Maxwell 3 3-16-043



Рисунок 3.8 - Пірометр Condrol Maxwell 3 3-16-043

Пірометр Condrol Maxwell 3 3-16-043 використовується для виявлення несправностей в системах теплопостачання, витоку тепла, перегріву деталей в різних механізмах. Лазерний покажчик наочно демонструє зону вимірювання, забезпечуючи більш точне наведення на ціль. Завдяки оптичній роздільній здатності 12:1 можна працювати на безпечній відстані від гарячих об'єктів. Передбачена сигналізація виходу температури за межі встановлених параметрів.

Об'єкти з різною поверхнею, але рівною температурою, випромінюють різну кількість теплової енергії. Більшість предметів та матеріалів, наприклад, пофарбовані метали, дерево, вода, шкіра, тканини мають високу емісійність (0,9 і більше) і випромінюють більше енергії, ніж блискучі поверхні та нефарбовані метали з коефіцієнтом випромінювання менше 0,6. Регулювання коефіцієнта випромінювання дозволяє пристрою враховувати це та мінімізувати похибку вимірювання.

Таблиця 3.5 - Емісивність матеріалів

Матеріал		Коефіцієнт випромінювання
Алюміній	Окислений	0.2~0.4
	Окислений розчин	0.3
	Грубий сплав	0.1~0.3
Латунь	Полірований	0.3
	Окиснений	0.5
Мідь	Окиснений	0.4~0.8
Залізо	Окиснений	0.5~0.9
	Іржавий	0.5~0.7
Залізо (лите)	Окиснений	0.6~0.95
	Неокислений	0.2
	Розплавлений і відлитий	0.2~0.3

Порівняння характеристик розглянутих пірометрів наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Порівнянь характеристик пірометрів

Показник	Unit "UT301C"	Mastech "MS65222B"	Merion 16800	Condrol Maxwell 3 3- 16-043
Діапазон вимірювань	-18 С- 550 °С	- 20°C~500°C	°C/°F: 50...800/ (-58...1472)	- °С від -30 до +380
Оптичне розширення	12:1	10:1	12:1	12:1

Продовження Таблиці 3.4

Точність	$\pm 1.8^{\circ}\text{C}$ або $\pm 2\%$	$\pm 0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,5\%$	$(-50^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C})$ $\pm 3^{\circ}\text{C}, (0^{\circ}\text{C} \dots +800^{\circ}\text{C}) \pm 1,5\%$ $+2^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5\% + 2^{\circ}\text{C}$
Особливості	Лазерний вказівник; Вибір шкали С/Ф; Запис максимальних, мінімальних, диференціальних та усереднених значень; Автоматичне відключення; Режим зниженого енергозбереження; Утримання показників на дисплеї.	Лазерний вказівник; Вибір шкали С/Ф; Індикація заряду батареї; Утримання показників на дисплеї; Режим відображень максимальних, середніх та мінімальних значень.	Лазерний вказівник; Ультрафіолетовий ліхтарик; Автоматичне відключення; Вимірювання ймовірності виникнення цвілі; Термопара К-типу.	Лазерний вказівник; Сигналізація виходу температури за межі встановлених параметрів.

РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1 Будова і принцип роботи

Пірометр це будь-який пристрій для вимірювання температури, який включає в себе датчик і перетворювач. Оптична система збирає видиму і інфрачервону енергію від об'єкта і фокусує її на детекторі. Детектор отримує енергію фотонів від оптичної системи і перетворює її в електричний сигнал, що виводиться на дисплей або блок управління. Блок-схема інфрачервоного пірометра показана на рис. 6. Інфрачервоні термометри мають різні конфігурації і конструкції. Основні відмінності між пірометрами полягають в оптиці, електроніці, технології, розмірах і типах корпусу. Однак, незалежно від цього, спосіб обробки сигналу у всіх однаковий (тобто він завжди починається з інфрачервоного сигналу і закінчується вихідним електронним сигналом температури). Механізм роботи показаний на блок-схемі (див.рис. 4.1).

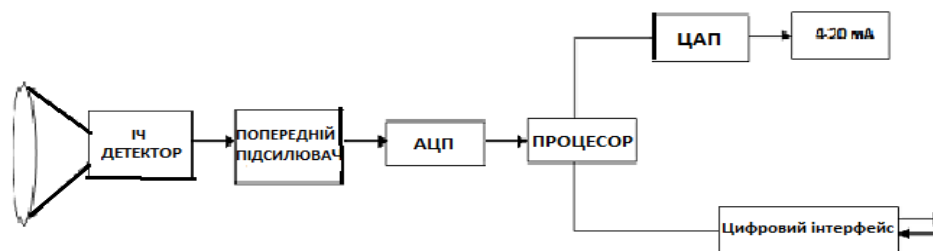


Рисунок 4.1 - Схема інфрачервоного пірометра

4.2 Оптична система, захисні скла, розмір плями і відстань вимірювання

Детектор і оптична система це основні компоненти пірометра. Отже, вони повинні бути ретельно обрані, щоб отримати оптимальний компроміс, заснований на конфліктуючих параметрах ціни, точності, швидкості реагування і використовуваного діапазону температур.

Оптична система в основному складається з скла, лінз і фільтрів. Система лінз може бути використана для певних діапазонів довжин хвиль в залежності від довжин хвиль матеріалу. Зазвичай, для фіксованого фокуса

оптичні прилади використовують системи лінз і дзеркал, так як це є більш простим завданням, ніж регулювання фокуса за допомогою рухомих частин.

Характеристики (значення світлопередачі) лінз, фільтрів і матеріалів скла повинні бути підібрані відповідно до спектральної чутливості датчика. При високих температурах зазвичай використовується кварцове скло. При низьких температурах (в діапазоні 8,14 мкм) необхідно застосовувати спеціальні ІЧ пропускаючі матеріали (тобто, Ge і ZnSe).

За допомогою фільтрів властивості передачі можуть бути змінені таким чином, що можна запобігти потраплянню на детектор небажаних хвиль з певною довжиною хвилі. Фільтри розміщені в передній частині детекторів.

4.3 Розмір плями і відстань, на якому проводиться вимірювання

Оптика пірометра передає образ частини цільової області вимірюваної поверхні на детектор. Також, слід враховувати відстань між камерою і об'єктом. Розміри вимірюваного об'єкта визначають необхідний розмір плями пірометра. Таким чином, розмір цілі повинен бути більшим, ніж розмір плями. Відношення відстані до розміру плями є розмір вимірювальної точки на певній відстані. Так само, залежність відстані від вимірювального приладу до цілі, а також відношення відстані до діаметру плями ($D: S$) є оптичним розширенням. Краще, щоб оптичне розширення пірометра було менше ніж можливий розмір цілі. Щоб уникнути помилок вимірювань, розмір плями повинен повністю заповнювати об'єкт, в іншому випадку датчик буде зчитувати температури випромінювання від фону, що впливають на кінцеве значення вимірювання.

4.4 Методи націлювання

Є кілька методів коригувань, які допомагають визначити область захоплення цілі пірометром. Ось деякі з них:

Техніка - "крізь лінзу": у цій техніці, користувач дивиться на об'єкт аналогічно тому, як він дивиться через камеру. У центрі області перегляду відображається позначка, яка характеризує розмір плями, що проектується на

цільовий об'єкт. Так як користувач знаходиться в безпосередньому контакті з випромінюванням, всередині встановлені фільтри для захисту очей.

"Пілотне світло" / Лазерний покажчик: галогенна лампа, LED, або лазер можуть використовуватися як цілевказівники. Світловий промінь допомагає користувачеві націлюватися на вимірювальну область більш швидко і точно, і, отже, в темряві вимірювання температури може бути також проведено дуже точно.

4.5 Детектори

Детектори відіграють життєво важливу роль у будь-якому пірометрі. Вони є приймачами випромінювання, які перетворюють прийняте інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали. Ці електричні сигнали перетворюються, передаються за допомогою електронного зв'язку, а потім відображаються у вигляді значень температури на дисплеї.

Детектори можуть бути розділені на дві категорії: теплові детектори і квантові детектори.

Поведінка теплових детекторів схожа з поведінкою терморезисторів. Коли фотони взаємодіють з чутливим елементом в тепловому датчику, то температура цього елемента змінюється, що в свою чергу, змінює деякі властивості детектора. Ці зміни аналізуються і прирівнюються до значень напруги, що генеруються в терморезисторах.

Квантові детектори працюють за принципом фотоелектричного ефекту. Вони взаємодіють безпосередньо з потрапляючими на детектор фотонами. Такі Детектори також відомі як фотодіоди.

Квантові детектори працюють швидше, ніж теплові. В основному вони використовуються для систем візуалізації та лінійних сканерів. Виконання цих детекторів сильно залежить від зміни температури навколишнього середовища, відповідно цей вплив має бути скомпенсовано для досягнення високої точності вимірювань.

4.6 Виготовлені пірометричні датчики

На даний момент випускається безліч різних пірометричних датчиків. Розглянемо деякі з них.

4.6.1 Датчики фірми Murata.

Піроелектричні інфрачервоні чутливі елементи фірми Murata, мають високу чутливість і надійне виконання, можливі завдяки керамічній і пакувальній технології Murata, яка розвивалася багато років.

Особливості датчиків:

- висока чутливість і чудове співвідношення С / Ш;
- висока стабільність до температурних змін;
- висока несприйнятливості до зовнішньої перешкоди;
- високе співвідношення якість-ціна. [28]

4.6.1.1 Інфрачервоний піроелектричний SMD датчик Murata IRS-A200ST01.

Схема підключення і габаритні характеристики SMD датчика IRS-A200ST01 наведені на рис. 4.2.

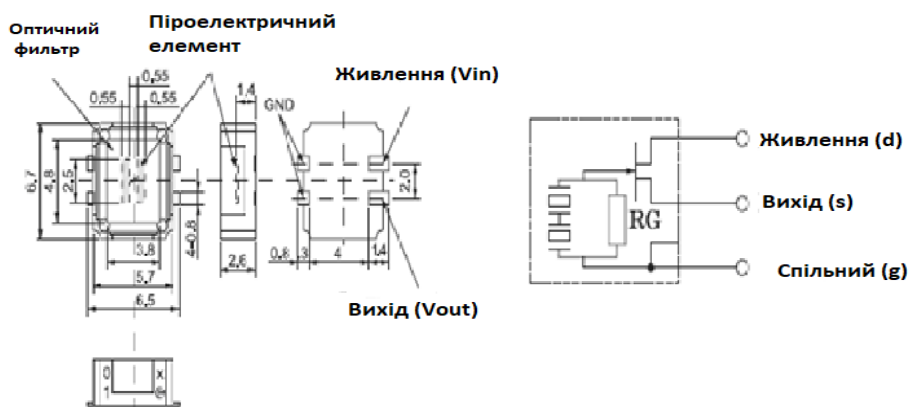


Рисунок 4.2 - Габаритні розміри і електрична схема сенсора IRS-A200ST01

Основні характеристики датчика IRS-A200ST01:

Типова чутливість 3.8 мВ (розмах напруги на виході сенсора при перериванні випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою 227 °С, що знаходиться від нього на відстані 140 мм);

- кут огляду 50°;
- напруга живлення від 2 до 15 В;
- розміри фоточутливих елементів 2.5x4.0x0.55 мм;
- діапазон робочих температур від -40 до 70 °С;
- температура зберігання від -40 до 85 °С;
- можлива пайка оплавленням при температурах до 240°С;
- оптичний фільтр 5 мкм; [29]

4.6.1.2 Інфрачервоні піроелектричні датчики Murata серії IRA-E7

Схема підключення і габаритні характеристики датчиків Murata IRA-E700ST0 і IRA-E710ST0 наведені на рис. 3.8

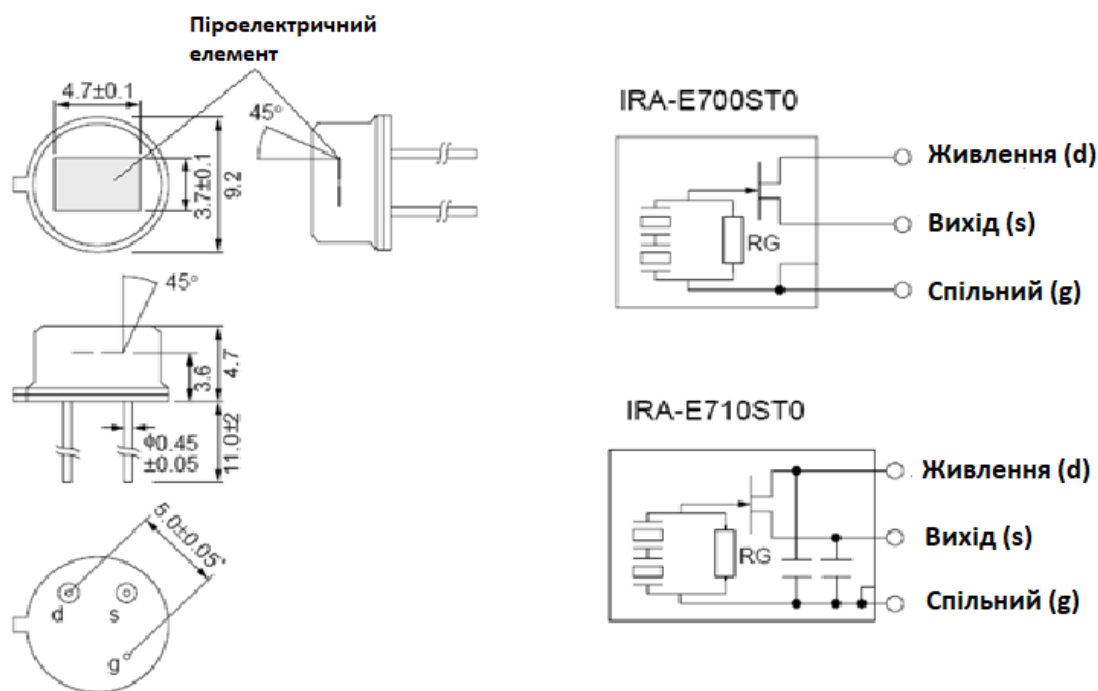


Рисунок 4.3 - Габаритні розміри і електрична схема сенсорів

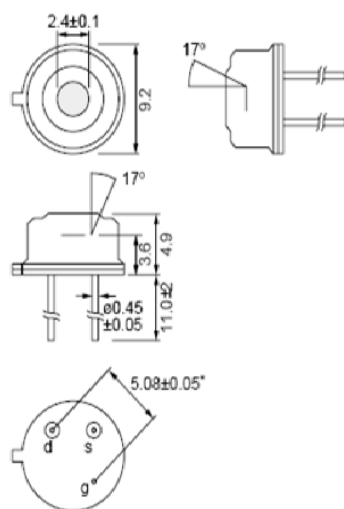
Основні характеристики датчиків серії IRA-E7:

- типова чутливість 4.3 мВ;
- кут огляду 45°;
- напруга живлення від 2 до 15 В;
- розміри фоточутливих елементів 2Ч1 мм;
- діапазон робочих температур від -40 до 70 °С;
- оптичний фільтр 5 мкм;
- температура зберігання від -40 до 85 °С;

4.6.1.3 Температурно компенсовані інфрачервоні піроелектричні датчики Murata серії IRA-E420

Схема підключення і габаритні характеристики датчиків Murata IRA-E420S1, IR a-E420QW1 і IR a-E420SW1 наведені на рис. 3.9.

IRA-E420S1, IRA-E420QW1



IRA-E420SW1

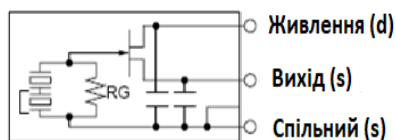
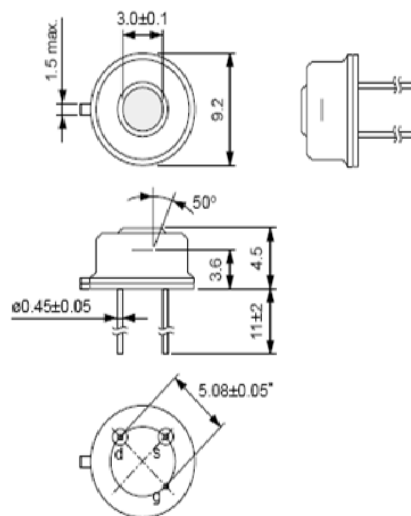


Рисунок 4.4 – Габаритні розміри і електрична схема сенсорів

Основні характеристики датчиків серії IRA-E420 наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики датчиків серії IRA-E420

Характеристика	IRA-E420S1	IRA-E420QW1	IRA-E420SW1
Типова чутливість	3.4 мВ	1.3 мВ	0.45 мВ
Кут огляду	17°		50°
Напруга живлення	3...15 В		
Діапазон робочих температур	-25...70 °C	-25...55 °C	-25...70 °C
Температура зберігання	-30...100 °C		
Габаритні розміри	9.2Ч9.2Ч4.9 мм		9.2Ч9.2Ч4.5 мм
Оптичний фільтр	1...15 мкм	4.3 мкм	4.45 мкм

4.6.2 Піроелектричні датчики фірми Banner Engineering серії M18

Основні характеристики датчиків Banner Engineering серії M18 наведені в табл. 4.2 і 4.3.

Таблиця 4.2 – Основні характеристики датчиків серії M18

Модель	З'єднання	Відношення відстань/розмір вікна	Чутлива поверхня
M18TUP8	Кабель	8:1	Вбудовані лінзи
M18TUP6E	Кабель	6:1	Закрита пластикова поверхня
M18TUP14	Кабель	14:1	Германієві лінзи
M18TUP8Q	Роз'єм	8:1	Вбудовані лінзи
M18TUP6EQ	Роз'єм	6:1	Закрита пластикова поверхня
M18TUP14Q	Роз'єм	14:1	Германієві лінзи

Таблиця 4.3 – Характеристики датчиків серії M18 з аналоговим виходом

Діапазон вимірюваних температур, °C	0...300
Довжина хвилі, нм	8...14
Вихід, В	0..10 DC
Лінійність, °C	± 2 (0...50 °C), ± 1 (50...300 °C)
Повторюваність,	$\pm 1\%$
Напруга живлення, В	12...30 DC
Споживаний струм, мА	< 35
Мінімальний опір на виході, кОм	2,5
Струм витoku, мкА	< 10
Готовність до роботи після включення, с	1,5
Мінімальний опір входу навчання, кОм	3
Час прогріву, хв	5
Температура навколишнього середовища, °C	-20...70

Схема підключення і габаритні характеристики датчиків Banner Engineering серії M18 наведені на рис. 4.5.

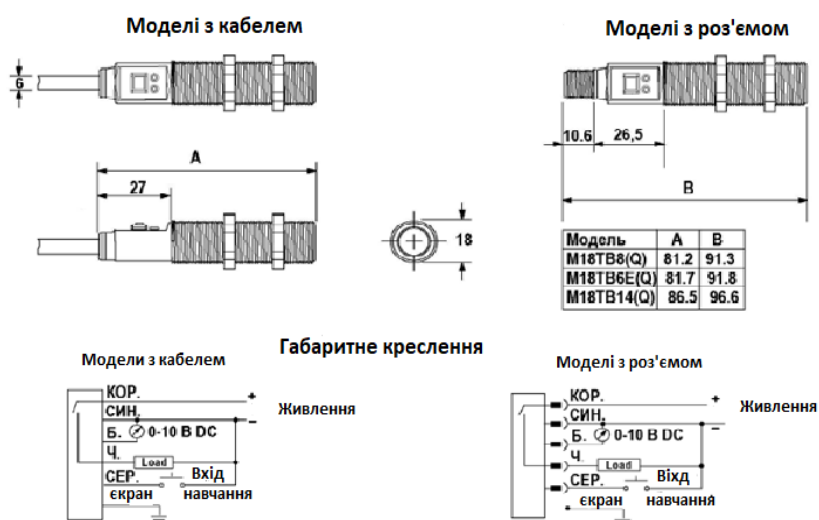


Рисунок 4.5 - Габаритні розміри і електрична схема сенсорів

4.6.3 Датчик температури інфрачервоний MLX90614



Рисунок 4.6 - Датчик температури інфрачервоний MLX90614

Опис інфрачервоного датчика температури MLX90614

MLX90614-це інфрачервоний термометр в корпусі TO - 39 для безконтактного вимірювання температури.

Датчики вимірюють дві температури: температуру об'єкта і температуру навколишнього середовища. Вимірювання температури об'єкта відбувається безконтактним способом, а температура середовища вимірюється на кристалі датчика.

Температура об'єкта вимірюється в діапазоні від -70 до 380 градусів з 17-бітним дозволом за допомогою зчитування інфрачервоного випромінювання, що виходить від нього. Така точність дозволяє датчику розрізняти температуру між 25°C і 25.02°C.

У корпусі об'єднані ІЧ детектор (MLX81101) і мікросхема обробки сигналу (MLX90302). Завдяки застосуванню малошумного підсилювача, 17-бітного АЦП і потужного DSP процесора датчики мають високу точність і розширення. Результатом вимірювань є усереднена температура всіх об'єктів, що потрапляють в робочу область датчика. Точність стандартних моделей становить -0.5°C, а точність моделей для медичного застосування (MLX90614ESF-DCI) доходить від 0.2°C. Слід враховувати, що дана точність може бути досягнута тільки в тому випадку, якщо датчик знаходиться в стані термічної рівноваги. На його зміну можуть впливати знаходяться поруч гарячі або холодні об'єкти.

ІЧ датчики MLX90614 калібровані на заводі-виробнику з цифровим ШІМ і SMBus виходом в діапазоні від -40 до 125°C для температури навколишнього середовища і в діапазоні -70...380°C для вимірюваних об'єктів.

Датчики MLX90614 підтримують два інтерфейси, однак достатньо мати один, щоб отримати доступ до іншого. Первинне підключення до ІЧ датчику відбувається по 2-провідному SMBus інтерфейсу, дуже простому і близькому до I2C. Якщо він вже налаштований, то пізніше можна конфігурувати датчик на ШІМ вихід. Два вихідних сигнали-SDA і SCL-передають дані і сигнал синхронізації.

Кожен датчик має I2C адресу за стандартом 0x5A, але може бути змінений, це є одним з головних переваг датчика. За допомогою конфігурації адреси можна додавати до 127 датчиків до однієї шини і отримувати широку температурну карту.

Датчики випускаються в декількох модифікаціях, з індексом DCI або BCI. Обидва датчики мають вхідну напругу 3В, сумісну з батарейним живленням. Індекс І позначає тип модифікацію корпусу, який має насадку для забезпечення вузького поля зору в 5°.

Крім датчика і мікросхеми обробки сигналу в корпусі розташований оптичний фільтр, який відрізає видимий і близький до інфрачервоного випромінювання потік. Такий фільтр забезпечує нечутливість датчика до сонячного світла і зовнішнього засвічення. Смуга пропускання фільтра становить 5.5 ... 14 мкм.

Датчик MLX90614 випускаються в 4-вивідному TO-39 корпусі, два для живлення і два для SMBus інтерфейсу. Датчик встановлений на плату, яка містить стабілізатор напруги на 3,3 вольт, підтягуючі резистори і фільтруючі конденсатори.

Особливості:

- малі розміри, невелика вартість
- легкість інтеграції
- заводське калібрування в широкому температурному діапазоні: -40 ... 125°C для датчика і -70 ... 380°C для вимірюваного об'єкта
- висока точність 0.5°C в широкому температурному діапазоні (0...50°C)
- високоточне (медичне) калібрування

- дозвіл вимірювань 0.02°C
- SMBus сумісний інтерфейс
- ШІМ вихід для отримання безперервних результатів вимірювань
- моделі з напругою живлення 3 і 5 В
- моделі з однією і двома зонами (датчиками)
- проста адаптація для додатків на 8-16 В
- режим зниженого енергоспоживання для економії живлення
- різні модифікації корпусу для спеціалізованого

4.7 Вибір контролера для пірометра

На сьогодні на ринку існує величезна кількість різноманітних мікроконтролерів. Для розробки приладу нам достатньо 8-ми бітного мікроконтролера. Найпопулярніші на цей час кристали це Atmel AVR8 та тестові плати на їх основі Arduino.

8-ми бітні мікроконтроллери AVR працюють на частотах від 1..16 МГц. Мають об'єм флеш пам'яті 1..128 кБ. Живляться від напруги 5 В.

4.7.1 Arduino UNO

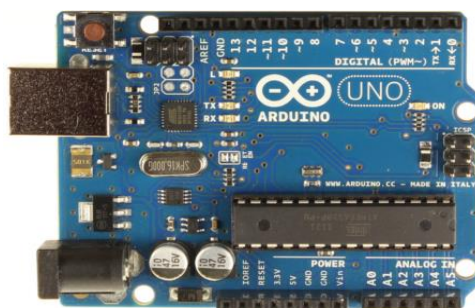


Рисунок 4.7 - Arduino UNO

Таблиця 4.4 - Характеристика Arduino UNO

Мікроконтролер	ATmega328
Цифрові входи	14
Аналогові входи	6
Flash-пам'ять	32 кБ (ATmega328)
EEPROM	1 кБ(ATmega328)
Тактова частота	16 МГц.
Напруга живлення	5..15 В.

4.7.2 Arduino Nano



Рисунок 4.8 - Arduino Nano

Таблиця 4.5 - Характеристика Arduino UNO

Мікроконтролер	ATmega328
Цифрові входи	14
Аналогові входи	6
Flash-пам'ять	32 кБ (ATmega328)
EEPROM	1 кБ(ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	1.85 см x 4.3 см
Напруга живлення	5..15 В

Плати Arduino мають такі ж параметри як і AVR, але вони постачаються як готові для роботи модулі. Для розробки приладу була вибрана плата Arduino

NANO. Оскільки вона ідеально підходить по параметрах, а саме у неї достатньо пінів вводу/виводу і вона має компактні габарити, що дозволить нам розробити на її основі портативний і зручний прилад.

4.8 Побудова пірометра

Компоненти, необхідні для збірки нашого інфрачервоного термометра Ардуіно наведені нижче:

- 1.Кнопка-перемикач
- 2.Резистори 5 кОм, 200 Ом
- 3.5В лазер
- 4.Ардуіно Нано
- 5.Перемикач вмикання / вимикання
- 6.Дисплей OLED 0,96 "
- 7.Датчик температури GY-906 або датчик MLX90614 з відповідними конденсаторами / резисторами
8. Акумулятор 9В

Сенсор MLX90614 – це інфрачервоний термометр в корпусі TO-39 для безконтактного вимірювання температури.

У корпусі об'єднані ІК детектор (MLX81101) і мікросхема обробки сигналу (MLX90302). Завдяки застосуванню малошумящего підсилювача, 17-бітного АЦП і потужного DSP процесора датчики мають високу точність і дозвіл. Результатом вимірювань є усереднена температура всіх об'єктів, що потрапляють в робочу область датчика. Точність стандартних моделей становить -0.5°C

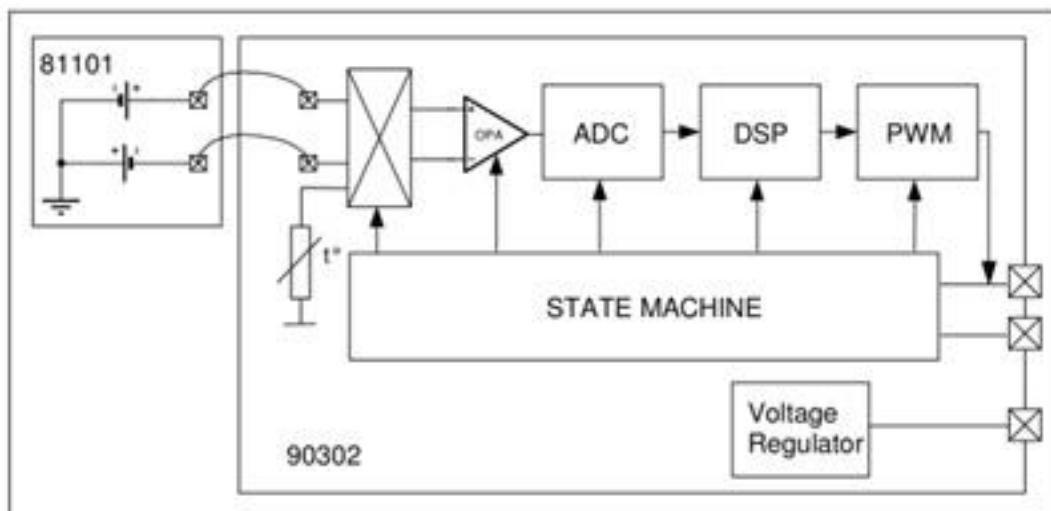


Рисунок 4.9 - Блок схема сенсора MLX90614

Датчики MLX90614 поддерживают два интерфейса, однако достаточно иметь один, чтобы получить доступ к другому. Первичное подключение к ИК датчику происходит по 2-проводному SMBus интерфейсу, очень простому и близкому к I2C. Если он уже настроен, то позже можно сконфигурировать датчик на ШИМ выход. Два выходных сигнала - SDA и SCL – передают данные и сигнал синхронизации.

В режимі одиночного виходу ШІМ використовуються налаштування лише для даних ШІМ1. Показник температури можна розрахувати за синхронізація сигналу як:

$$T_{OUT} = \left(\frac{2t_2}{T} \cdot (T_{O_MAX} - T_{O_MIN}) \right) + T_{O_MIN} \quad 4.1$$

де T_{min} і T_{max} - відповідні коефіцієнти масштабування в EEPROM для обраної вихідної температури (T_a, об'єкт діапазон температур є дійсним як для T_{obj1}, так і для T_{obj2}, як зазначено в попередній таблиці), а T - період ШІМ. T_{out} - T_{O1}, T_{O2} або T_a відповідно до налаштувань Config Register.

Схема підключення наведена нижче:

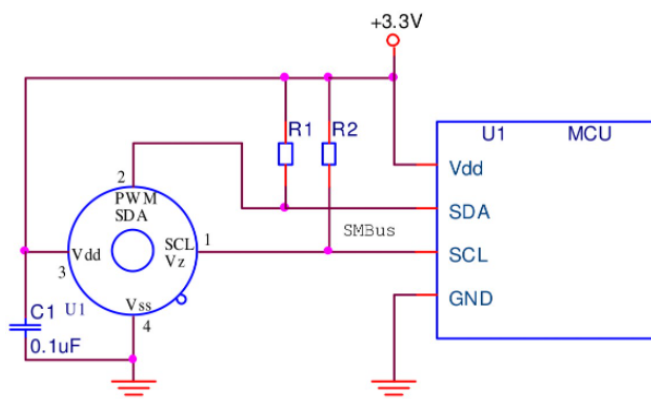


Рисунок 4.10 - Подключение к ИК датчику

Для реалізації функціонування приладу було розроблено принципову електричну схему.

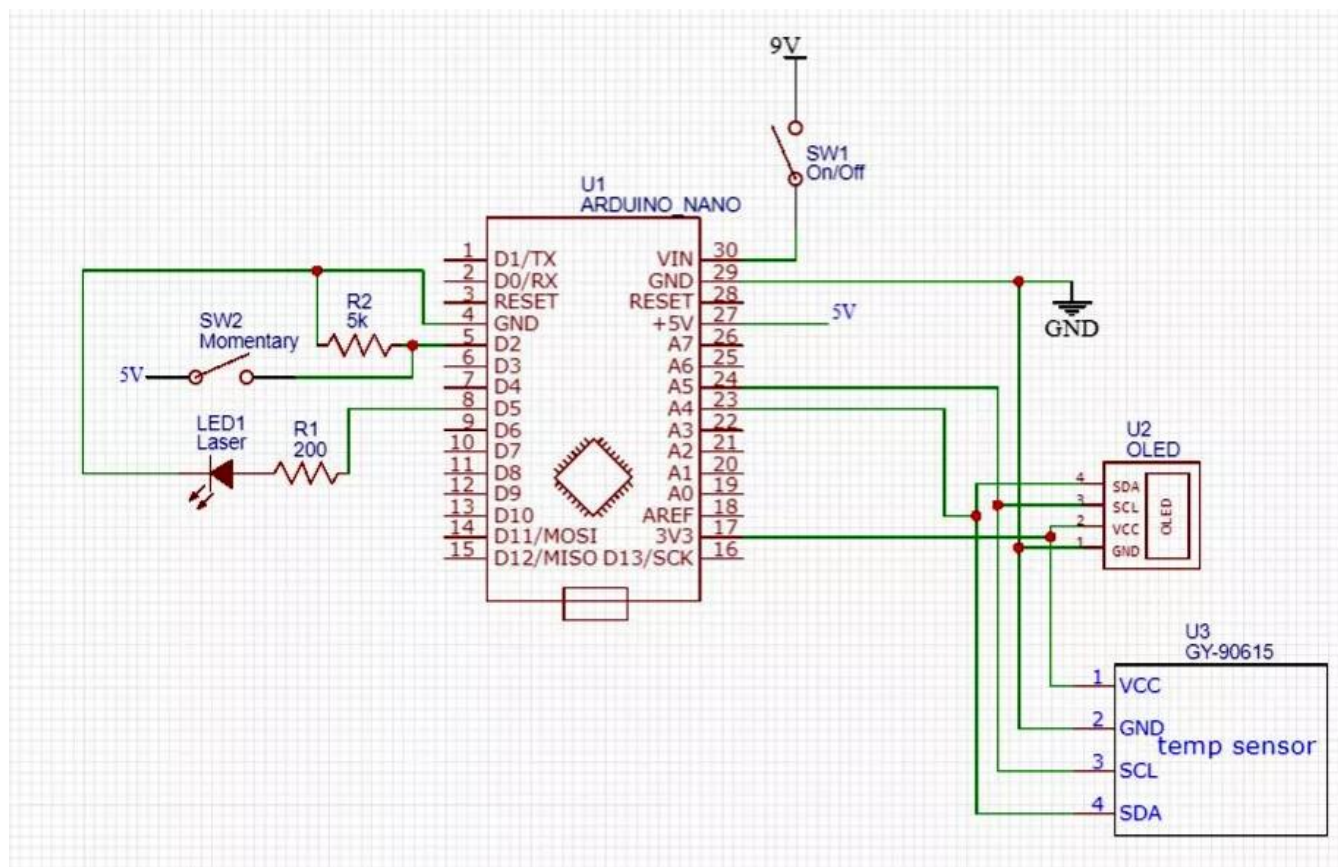


Рисунок 4.11 - Електрична схема пірометра

В схемі використовується датчик інфрачервоного термометра GY-906, що є перехідною платою для безконтактного інфрачервоного термометра MLX90614 від Melexis.

Зовнішня плата дуже недорога і її легко інтегрувати, поставляється з підтягуючим резистором 10K для інтерфейсу I2C.

Підтягаючий резистор - резистор, включений між провідником, через який поширюється електричний сигнал, і живленням (pull-up resistor - підтягаючий вгору резистор), або між провідником і землею (pull-down resistor - підтягаючий вниз резистор).

Підтягаючий резистор потрібен, щоб гарантувати на логічному вході, з яким сполучений провідник, високий (в першому випадку) або низький (в другому випадку) рівень у випадках:

- провідник не з'єднаний з логічним виходом;
- приєднаний логічний вихід знаходиться в високоімпедансному стані;
- коли розімкнений ключовий елемент на приєднаному логічному виході, який влаштований як відкритий висновок ключового елемента.

GY-906 поставляється із заводським калібруванням в діапазоні від -40 до +125 градусів за Цельсієм для температури датчика і від -70 до 380 градусів за Цельсієм для температури об'єкта. Точність цього датчика становить приблизно 0,5 градуса Цельсія.

Зліва є лазер зі струмообмежувальним резистором 200 Ом, керований від цифрового виходу 5. Також є стандартна кнопка, яка підключена між 5 В і цифровим входом 2. Є підтягуючий резистор 5 кОм, щоб коли перемикач розімкнений, на вхід нічого не йде, а замість цього встановлюється на 0В.

Праворуч основний вимикач, який з'єднує батарею 9 В з виводами VIN і GND на Arduino Nano. Дисплей OLED і інфрачервоний датчик температури GY - 906 підключені до 3,3 В, а лінії SDA підключені до A4, а SCL а5. На дисплеї і GY - 906 вже є підтягуючі резистори на лініях I2C.

Програма постійно зчитує дані про температуру з MLX90614, але відображається на OLED тільки при натисканні кнопки тригера. Якщо натиснути на курок, лазер також вмикається, щоб допомогти визначити, який об'єкт вимірюється.

Для приладу був розроблений власний корпус, що візначається ергономічністю і зручністю в використанні приладу (рис.4.6.)

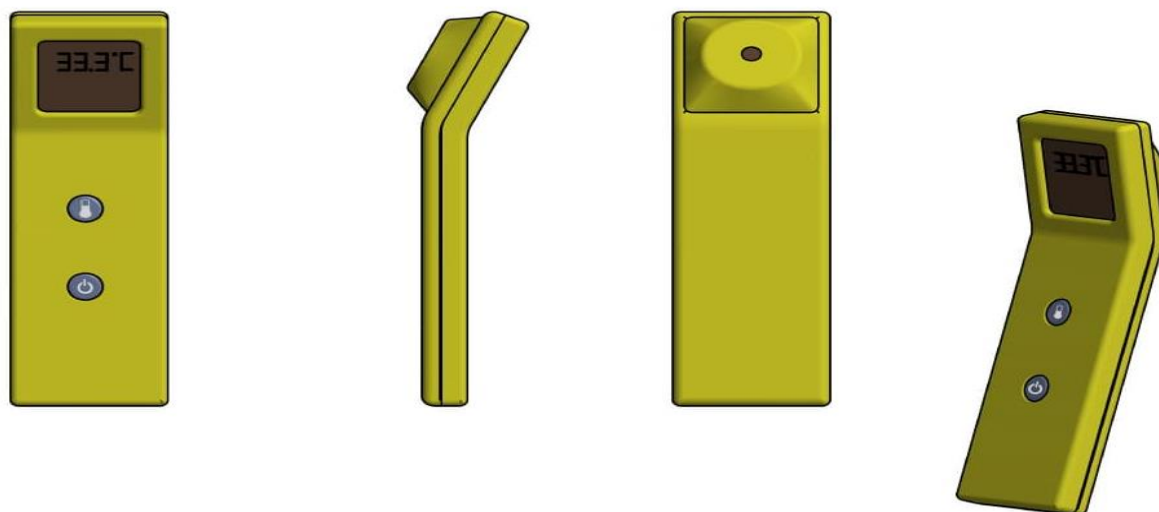


Рисунок 4.12 - 3D-корпус інфрачервоного термометра

У корпусі термометра є місце для батареї 9 В, перемикача Вкл/викл і спускового механізму (тригера), який являє собою просту короткочасну кнопку. Кришка основи замикається на місці. Є також простір для прокладки проводки базових компонентів у верхній частині термометра.

Корпус має отвір для 0,96-дюймового OLED-дисплея і напареній кришці корпусу отвір для лазера і датчика MLX90614. Як лазер, так і датчик можуть бути запресовані в отвір. Верхня частина призначена для Arduino Nano.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В данному дипломному проєкті переді мною була поставленна задача розробки приладу безконтактного вимірювання температури.

В ході роботи розглянув поняття про температуру і температурних шкалах та основні поняття про пірометрію. На основі розглянутих мною пунктів зробив висновок що найбільш вдалим є безконтактний метод вимірювання на основі теплового випромінювання.

У межах третього розділу було здійснено підбір елементів конструкції приладу, проаналізовано основні технічні характеристики та визначено їх переваги.

Отримані результати у даному дипломному проєкті дозволили побудувати модель робочого пристрою. Використання саме таких елементів дозволило зробити достатньо просту і недорогу конструкцію пірометру, при цьому забезпечивши його достатньою точністю вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галаган Р.М. Модель восстановления серии изображений из смазанного изображения для решения задачи высокоточного измерения диаметра и температуры излучающих объектов / Р.М. Галаган, А.В. Муравьев, А.С. Томашук // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій (матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції), 2019. – С. 169-171.
2. Живкович, А. В. Современные технологии бесконтактного измерения температуры / А. В. Живкович, А. В. Муравьев // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований - 2020», 07-15 июля 2020, Пшемисль, Польша. – Przemysł : Nauka i studia, 2020. – Vol. 7. – С. 110-115.
3. Muraviov, O. V. Thermal imaging diagnostic in medical applications / Muraviov O. V., Nakonechna A. V. // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 18-19 травня 2021 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 135–137.
4. Наконечная А. В. Автоматизированные системы пирометрического контроля на литейно-прокатном производстве / А. В. Наконечная, А. В. Муравьев // Материалы XVIII Международной научно-практической конференции «Эффективные инструменты современных наук - 2021», г. Прага, 22-30 апреля, 2021 г. – Прага : Education and Science, 2021. – Vol. 5. – С. 58-64.
5. Назарчук О. О. Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа / О. О. Назарчук, О. В. Муравйов. // Біомедична інженерія. – 2017. – №5. – С. 66–67.
6. Протасов А.Г. Многоканальный стенд для контроля температуры / А.Г. Протасов // Вісник НТУУ "КПІ". Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, 2015. – № 49(1) . – С. 61-68.
7. Кучеренко О.К. Вплив температури на абераційні властивості ІЧ-об'єктивів / О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, Д.О. Остапенко. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. – № 1. – С. 99-105.

8. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. — М.: Радио и связь, 1983. — 104 с.
9. Викулин И.М., Курмашев Ш.Д., Синица И.И. Магниточувствительность δ -диода с механизмом отрицательного дифференциального сопротивления // Электронная техника. Серия «Полупроводниковые приборы», 1986. — Вып. 3(182). — С. 44—48.
10. Евтихий Н.Н., Купершмидт Я.Л., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин / Под ред. Н.Н. Евтихеева. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
11. Егiazарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитолиоды, магнитотранзисторы и их применение. — М.: Радио и связь, 1989. — 88 с.
12. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — 912 с.
13. Курмашев Ш.Д., Викулин И.М. Магнитодиод с инжекционным усилением на основе $1\text{p}5\text{b}$ для низких температур // Электронная техника. Сер. «Полупроводниковые приборы», 1986. - Вып. 3(182). - С. 42-44.
14. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.
15. Матвеев Л.Н. Электричество и магнетизм. — М.: Высшая школа, 1983. — 463 с.
16. Полишук Е.С. Измерительные преобразователи. — Киев: Вища школа, 1981. — 296 с.
17. Полишук Е.С., Дорожовец М.М., Стадник Б.И., Ивахив О.В., Бойко Т.Г., Ковальчик А. Средства и методы измерений неэлектрических величин: Учебник / Под ред. проф. Полишука. — Львов: Бескид Бит, 2008. — 618 с. (Паукр. яз.).
18. Полупроводниковые преобразователи / Под ред. Ю. Пожелы. — Вильнюс: Моклас, 1980. - 176 с.

19. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
20. Хо.мерики О.К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. — М.:Энер- гоатомиздат, 1986. — 136 с.
21. Schaumburg H. Scnsoren. Band 3. B.C. Teubner Stuttgart: 1992.
22. Schaunibura H. (Hrsg.) Sensoranwendungen. Band 8. B.G. Teubner Stuttgart: 1995.
23. <https://arduinoplus.ru/lazernii-infrakrasnii-termometr-arduino/>
24. <https://www.bestadvisor.ru/pirometry>
25. <https://isup.ru/articles/3/14961/>
26. <https://xreferat.com/76/1406-1-ustroystvo-dlya-izmereniya-temperature-v-udalennyh-tochkah.html>
27. https://studopedia.com.ua/1_16490_tema--termometriya-za-viprominyuvannyam-tila.html
28. https://www.tme.eu/ua/linecard/p,murata_147/
29. <https://core.ac.uk/download/pdf/161264979.pdf>
30. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2766/1/Dolinska%20LV_Rozrobka_pirometrychnoho_datchyka_syhnalizatsiyi_KMR_2018.pdf
31. <https://www.arduino.cc/en/software>
32. https://studopedia.ru/7_56745_obshchie-svedeniya.html
33. <http://roskip.ru/?id=5362>
34. http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4020.html