НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«___» _____ 20_21_ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю та діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: « Мультиспектральний пірометр»

Виконала:
студентка IV курсу, групи ПК – 71
Наконечна Анастасія Вікторівна _____

Науковий керівник:
старший викладач, к.т.н.
Муравйов Олександр Володимирович _____

Консультант з графічної частини
старший викладач, к.т.н.
Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробки принципової електричної схеми
доцент, к.т.н.
Баженов Віктор Григорович _____

Рецензент
к.т.н., доц.
Мокійчук Валентин Михайлович _____

Засвідчую, що в цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань
Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю та діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Анатолій ПРОТАСОВ
«____» _____ 21___ року

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студентці
Наконечній Анастасії Вікторівні

1. Тема проєкту «Мультиспектральний пірометр», керівник проєкту Муравйов Олександр Володимирович, к.т.н., старший викладач, затверджені наказом по університету від «_26_» _травня_ 2021 року № 1347-с .

2. Строк подання студентом проєкту: «_11_» _червня_ 2021 року.

3. Вихідні дані до проєкту: кут поля зору $2\omega = 0{,}58^{o}$, робочій спектральний діапазон $\Delta\lambda = 940 - 1557$ нм, діаметр вхідної зіниці оптичної системи $D_{вх.зін.} = 14$ мм, діапазон вимірюваних температур $\Delta T = 350...2500°C$.

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Літературний огляд за темою роботи; Розділ 2. Проектування мультиспектрального пірометра; Розділ 3. Підбір комплектуючих для мультиспектрального пірометра.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема оптична, функціональна схема, принципова електрична схема, складальний кресленик, презентація доповіді.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Принципова електрична схема	Баженов В.Г., доц., к.т.н.		
Графічна частина	Богдан Г.А., ст. викладач, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання 11.03.2021

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Літературний огляд за темою дипломного проекту	12.04.2021	
2.	Синтез функціональної схеми приладу	20.04.2021	
3.	Синтез оптичної системи приладу	03.05.2021	
4.	Підбір комплектуючих для конструкції приладу	10.05.2021	
5.	Синтез електричної принципової схеми приладу	19.05.2021	
6.	Розробка складального креслення	27.05.2021	
7.	Формування загальних висновків	30.05.2021	
8.	Остаточне оформлення дипломного проєкту	01.06.2021	

Студентка Анастасія НАКОНЕЧНА

Керівник Олександр МУРАВЙОВ

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	А4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	А4	ПК 7112.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	77	
3	А2	ПК 7112.01.000 ФС	Функціональна схема	1	
4	А1	ПК 7112.02.000 ЕП	Схема електрична принципова	1	
5	А1	ПК 7112.03.000 СК	Складальний кресленик	1	
6	А2	ПК 7112.04.000 ОС	Схема оптична	1	

				ПК 7112.00.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Наконечна А.В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівник	Муравйов О.В.				1	1
Консульт.	Богдан Г.А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71	
Консульт.	Баженов В.Г.					
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав. каф.	Протасов А.Г.					

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

на тему: «Мультиспектральний пірометр»

Київ – 2021 року

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект під назвою «Мультиспектральний пірометр» присвячений розробці безконтактного приладу вимірювання температури спектрального відношення. Роботу виконала студенка кафедри ПСНК (НТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського») Наконечна Анастасія.

При виконанні даного проекту було розглянуто теоретичні основи вимірювання температури, фізичні основи пірометрії, розроблено функціональну схему приладу, синтезовано та розраховано характеристики оптичної системи мультиспектрального пірометра, підібрано комплектуючі для пристрою, розроблено електричну принципову схему та складальний кресленик.

Обсяг роботи складається з 77 сторінок (без додатків), 3 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, містить 8 таблиць, 41 рисунок та 22 літературних джерела.

Ключові слова: безконтактне вимірювання температури, пірометрія, мультиспектральний пірометр, пірометр спектрального відношення, колірний пірометр, оптична система, неруйнівний контроль.

ABSTRACT

The diploma project entitled "Multispectral pyrometer" is devoted to the development of contactless device for spectral ratio temperature measuring. This work was performed by a student of the department of PSNK (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute) Anastasia Nakonechna.

During the work on project the theoretical bases of temperature measurement, physical bases of pyrometry were considered, the functional scheme of the device was developed, the optical system of a multispectral pyrometer was synthesized and calculated, components were selected, the electric schematic diagram and assembly drawing were developed.

The volume of the work consists of 77 pages (without appendices), 3 chapters, general conclusions, list of references, contains 8 tables, 41 figures and 22 references.

Key words: non-contact temperature measurement, pyrometry, multispectral pyrometer, spectral ratio pyrometer, color pyrometer, optical system, non-destructive testing.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІЧ – інфрачервоний;

ПК – персональний комп’ютер;

АД – апертурна діафрагма;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

RISC – reduced instruction set computer;

SRAM – static random access memory;

EEPROM – electrically erasable programmable read-only memory;

SPI – serial peripheral interface;

I2C – Inter-Integrated Circuit;

USART – universal asynchronous receiver/transmitter;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

OLED – organic light-emitting diode;

LCD – liquid crystal display.

ЗМІСТ

ВСТУП 12
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ 14
1.1. Класифікація методів та засобів для контролю температури 14
1.2. Фізичні основи пірометрії 16
1.3. Сфери використання пірометрів 21
1.4. Класифікація пірометрів 25
1.5. Принцип роботи пірометрів 26
1.5.1. Радіаційні пірометри 27
1.5.2. Яскравісні пірометри 29
1.5.3. Пірометри спектрального відношення 31
1.6. Обґрунтування вибору мультиспектрального пірометра 32
1.7. Огляд аналогів 36
Висновки до розділу 1 39
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПІРОМЕТРА 41
2.1. Розробка функціональної схеми приладу 41
2.2. Проектування оптичної системи приладу 43
2.3. Аналітичний розрахунок шуму на виході фотоприймача 58
2.4. Розрахунок кута установки лазерних модулів 63
Висновки до розділу 2 63
РОЗДІЛ 3. ПІДБІР КОМПЛЕКТУЮЧИХ ДЛЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПІРОМЕТРА 65
3.1. Апаратно-програмна платформа та мікроконтролер 65
3.2. Дисплей 68
3.3. Bluetooth-модуль 69
3.4. Плата зарядки 71

3.5. Датчик дотику 72
Висновки до розділу 3 73
ВИСНОВКИ 74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 76
ДОДАТКИ 79

ВСТУП

Всі тіла, що мають значення температури вище за абсолютний нуль, випромінюють світловий потік в інфрачервоному діапазоні оптичного спектра. Одним з приладів, який використовують для того щоб визначити температуру поверхні об’єктів є пірометр. Вони використовують довжину хвилі та інтенсивність цього випромінювання як інформативний параметр. Є основна відмінність між даними інфрачервоними термометрами та іншими типами термометрів. Вона полягає в тому, що в деяких випадках рівні розжарювання поверхонь можуть бути надзвичайно високими для здійснення контактного вимірювання, а пірометри дозволяють вимірювати таку температуру без контакту з об'єктом безпосередньо. Це можливо за рахунок вбудованих у пірометр оптичних детекторів. Оптична система яких фокусує теплове випромінювання на чутливу площадку інфрачервоного фотоприймача. Сигнал детектора на виході пов'язаний з рівнем теплового випромінювання цільового об'єкта через закон Стефана-Больцмана, константу пропорційності, що називається постійною Стефана-Больцмана та випромінюючою здатністю об'єкта. Ці вихідні дані використовуються для визначення температури поверхні контролю. Отже, немає необхідності в безпосередньому контакті з об’єктом, температура якого вимірюється, що робить процес вимірювання температури безпечнішим для робітників на підприємствах. За допомогою пірометрів є можливість проводити виміри у агресивних середовищах та у випадках, коли об’єкт знаходиться у русі.

Сучасні пірометри мають високу точністю, швидкість роботи та економічність. Попит на дані прилади постійно збільшується, через те, що безконтактне вимірювання температури є важливою складовою на багатьох підприємствах, оскільки недотримання температурних норм та навіть невеликі відхилення у деяких сферах можуть спричинити небажані, а в деяких випадках катастрофічні наслідки. Сьогодні температурний контроль – це стандартна процедура в багатьох галузях виробництва, в науковій

діяльності, широко застосовується у побуті. В умовах світової пандемії коронавірусу застосування таких приладів в медичних цілях є беззаперечною необхідністю [1]. На сучасному ринку існує велике різноманіття безконтактних приладів вимірювання температури, тож кожен споживач може підібрати потрібний прилад виходячи з необхідних цілей, параметрів та економічної складової.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1. Класифікація методів та засобів для контролю температури

Вимірювання температури є важливою та невід'ємною процедурою на більшості промислових підприємств. Процес вимірювання температури здійснюється за допомогою термометрів. Дані прилади поділяють на дві групи залежно від методу, що використовується для контролю температури: контактні й безконтактні.

Повна класифікація термометрів представлено на рис. 1.1.

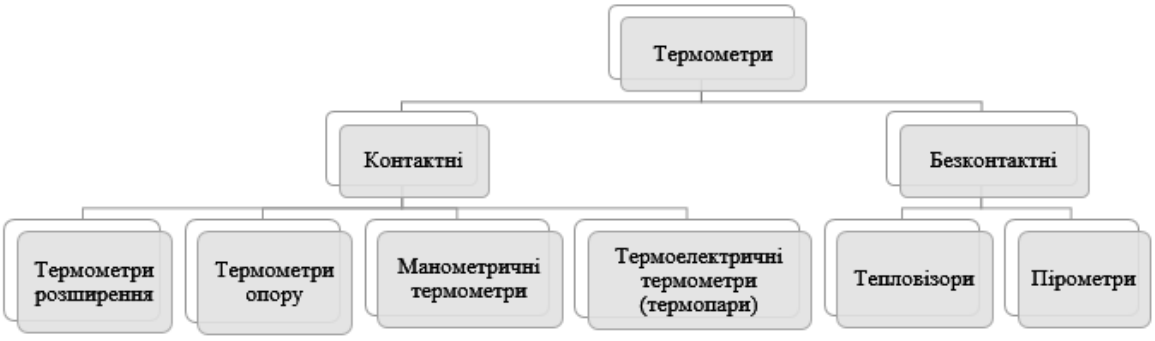

Рис. 1.1. Класифікація термометрів

Контактні метод контролю температури здійснюють безпосередній контакт між первинним перетворювачем та вимірювальним об'єктом. Контактні термометри в свою чергу класифікують на:

- термометри розширення, котрі базуються на зчитуванні об'ємного розширення рідини або лінійних розмірів твердих речовин від температурних змін;
- термометри опору. Температурна зміна призводить до зміни електричного опору матеріалу. Зміна опору вимірюється, щоб зробити висновок про зміну температури;

- манометричні термометри. За принципом дії такі пристрої контролю температури ґрунтуються на зміні тиску чутливої до температури речовини;
- термоелектричні термометри або термопари. При нагріванні двох спаяних на одному кінці різнорідних металів, з яких складається термопара, відбувається зміна термоелектрорушійної сили, яку вимірюють, щоб зробити висновок про температурну зміну [2].

Безконтактні пристрої дозволяють вимірять температуру поверхні об’єкту контролю без фізичного контакту вимірюваного тіла та датчика температури. Такі прилади поділяються на тепловізори та пірометри [3].

Робота тепловізорів ґрунтується на сприйнятті різниці температур та перетворенні цієї різниці у видиме зображення. Картина розподілу ІЧ випромінювання від об’єкта контролю з’являється за рахунок того, що всі тіла нагріваються не однаково. Теплове зображення буде мати тим кращий контраст, чим більша різниця буде між інтенсивністю ІЧ-випромінювання від об’єктів та інтенсивністю ІЧ-випромінювання фону [4].

Пірометри використовують теплове випромінювання тіла об’єкта для вимірювання температури. Дані пристрої діють як фотодетекетори через здатність поглинати енергію та вимірювати інтенсивність електромагнітних хвиль на будь-якій довжині хвилі. Пірометри випускаються в різних спектральних діапазонах, тож можуть буди застосовані для металів, які мають короткохвильовий діапазон та неметалів з довгохвильовим діапазоном ІЧ випромінювання. При належній якості оптичної системи приладу використовуючи такий пристрій можна виміряти температуру дуже маленького об’єкта на відносно великій відстані від нього.

Сфер застосування пірометрів дуже багато і з кожним роком ці прилади використовуються ще в більшій кількості різних галузях промисловості, науковій діяльності та побуті. Даний попит обумовлений перевагами використання пірометрів над контактними приладами контролю температури, а саме:

- дозволяють здійснювати вимірювання об’єктів у русі або у важкодоступних місцях;
- можливість вимірювання навіть при високій напрузі, електромагнітних полях, вібраціях, або високих температурах, коли застосування контактних термометрів не доцільно або загалом можливе;
- не спотворюють температурне поле контрольованого об’єкта;
- дуже короткий час вимірювання.

Як бачимо, для вимірювання температури вигідно використовувати пірометри замість звичайних термометрів контактного методу, за низкою переваг. Таким чином можна проводити вимірювання без зупинки виробництва або технологічного процесу, людина, що виконує вимірювання, здатна знаходитись на безпечній відстані від високотемпературного об’єкту, дані прилади легкі в використані, надійні та точні.

1.2. Фізичні основи пірометрії

Усі тіла, температура яких вища за абсолютний нулю, значення якого складає -273°С, випромінюють інфрачервону енергію. Інфрачервоне випромінювання є частиною електромагнітного спектра. Воно знаходиться між видимим випромінюванням для людського ока та радіохвилями. Діапазон хвиль інфрачервоної ділянки електромагнітного спектру знаходиться від 0,7 мкм до 1000 мкм, див рис. 1.2.. Але, як показала практика, насправді з цього діапазону для вимірювання температури підходять хвилі від 0,7 мкм да 20 мкм. Це зумовлено тим, що на сьогодні не має достатньо чутливих детекторів оптичного випромінювання для вимірювання енергії вище довжини хвилі 20 мкм.

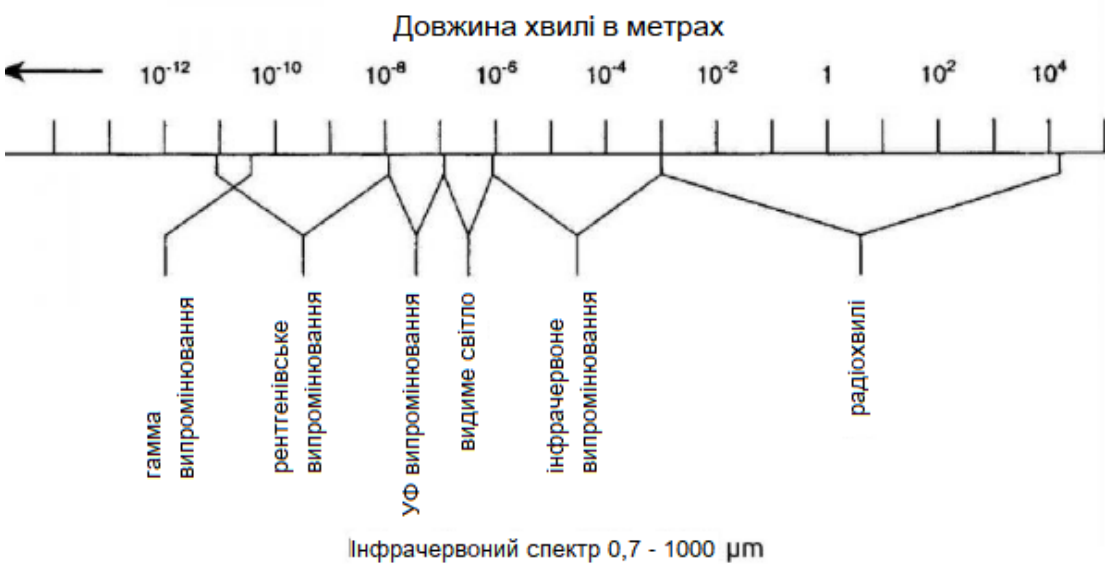

Рис. 1.2. Спектр електромагнітного випромінювання

На рис. 1.3. показана залежність, що характеризує інтенсивність випромінювання чорного тіла при різних температурах. Як видно, найбільша частина енергії лежить за межами видимого діапазону оптичної частини спектру [5].

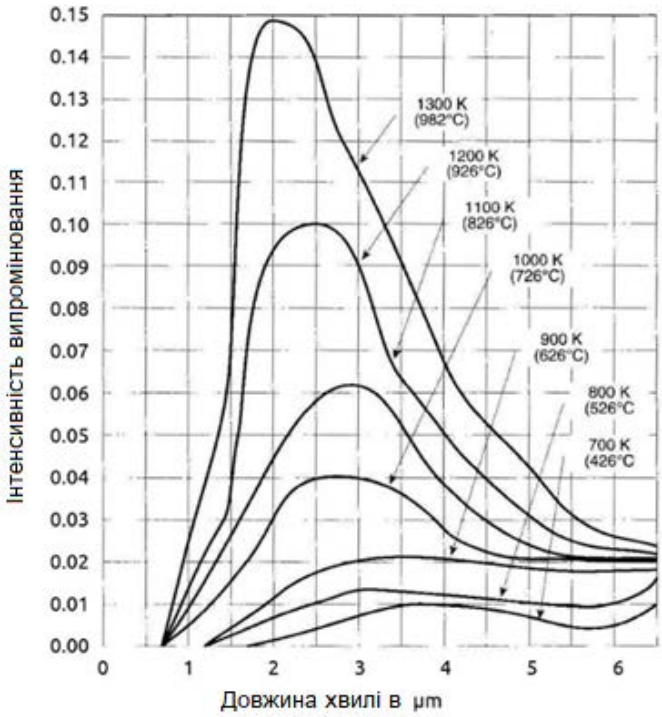

Рис. 1.3. Інтенсивність випромінювання як функція залежності довжини хвилі та температури

В багатьох випадках ІЧ-випромінювання поводить себе таким же чином, що й видиме світло. Воно поширюється прямими лініями від джерела, зустрічаючи перешкоди може поглинатися або відбиватися. Об’єкти, які є непрозорими для людського ока, будуть частково поглинати та відображати частину випромінювання, що потрапляє на них. Ці об’єкти, зі свого боку, будуть випромінювати частину енергії, яку вони поглинули, та частину внутрішньо відображати. Кількість енергії, яку об’єкт буде відображати або поглинати залежить від характеристик його поверхності. З закону збереження енергії можна вивести враз, який показує, що сума переданої, відбитої та випроміненої (поглинутої) ІЧ енергії повинна дорівнювати одиниці.

Об’єкт, який поглинає усі випромінювання називають чорним тілом, але не один об’єкт в природі не є справжнім чорним тілом. Для можливості проведення порівнянь коефіцієнт випромінювання чорного тіла дорівнює одиниці.

Коефіцієнт випромінювання представляє співвідношення теплового випромінювання сірого та чорного тіл при однаковій температурі. Об’єкт, випромінювальні здатності якого не змінюється від довжини хвиль, тобто на всіх довжинах однакова, та випромінює менше інфрачервоної енергії ніж чорне тіло, називається сірим тілом. Об’єкти випромінювальна здатність яких змінюється в залежності від довжини хвилі називаються несірими або селективними, прикладом таких об’єктів є метали. Порівнянна даних об’єктів зображено на рис. 1.4.

Рис. 1.4. Порівняння випромінювання чорного, сірого та селективного тіл

Різні матеріали в більшості випадків мають різні коефіцієнти випромінювання, через це при певній температурі вони будуть мати різні інтенсивності випромінювання інфрачервоної енергії. Як правило, коефіцієнт випромінювання не залежить від кольору, при умові якщо коефіцієнт випромінювання фарби не відрізняється від випромінювальної здатності самого матеріалу об’єкта.

Розглянемо основні закони, на яких ґрунтується вимірювання температурних значень пірометрами:

1. Закон випромінювання Кірхгофа

Коефіцієнт випромінювальної здатність тіла ε дорівнює його поглинанню α при заданій температурі T та довжині хвилі λ:

$$\varepsilon = \alpha \tag{1.1}$$

Виходячи з цього, при тій же заданій температурі променевий потік реального тіла $\emptyset_r$ дорівнює променевому потоку чорного тіла $\emptyset_s$, помноженному на коефіцієнт випромінювання цього об’єкта:

$$\emptyset_r = \varepsilon \cdot \emptyset_s \tag{1.2}$$

2. Закон Планка

Потужність випромінювання та довжина хвилі чорного тіла при даній температурі Т визначається законом Планка. Даний вираз виглядає наступним чином:

$$W_b(\lambda, \mathrm{T}) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5[e^{\frac{hc}{k\lambda \mathrm{T}}}-1]}, \quad (1.3)$$

де W_b – потужність випромінювання абсолютно чорного тіла (Вт/м^3),

λ – довжина хвилі (м),

Т – абсолютна температура (К),

h = 6,625 * 10^{-34} Дж·с - стала Планка,

c = 3 * 10^{8} м/с - швидкість світла,

k = 1,38 * 10^{-23} Дж/К – стала Больцмана.

3. Закон зміщення Віна

Даний закон показує зворотну залежність між довжиною хвилі піку розподілу випромінювання чорного тіла та його температурою [6, 7]. Тобто, чим гарячішим буде об’єкт, тим коротшою буде довжина хвилі, на якій він буде випромінювати більшу частину його випромінювання.

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

де λ_{max} – довжина хвилі, на яку припадає максимальна інтенсивність випромінювання для даної температури Т,

$b = 2{,}89 \cdot 10^{-3}$ м·К – стала Віна.

4. Закон Стефана-Больцмана

Загальній потік випромінювання q, що випромінює чорне тіло, пропорційний четвертому ступеню його абсолютної температури Т. Даний закон виглядає наступним чином:

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

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

Закони Планка та Стефана-Больцмана виведені з урахуванням властивостей чорного тіла, виходячи з цього, виміряна температура T_m трохи менше істинної температури *T*. Для опису різниці в поглинанні випромінювання звичайним об'єктом та чорним тіло вводиться коефіцієнт ε.

1.3. Сфери використання пірометрів

В нинішній час існує велике різноманіття пірометрів. Дані прилади безконтактного вимірювання температури поверхні об'єктів знайшли своє застосування в різних сферах. Такий попит обумовлений їх універсальністю, так як дані прилади мають можливість здійснювати вимірювання великих діапазонів температур, а саме від -50°С до +6000°С. Вони швидко проводять вимірювання та легкі у використанні, адже для цього потрібно просто направити прилад на вимірювальний об'єкт та затиснути кнопку, після чого буде отримано результат температурного вимірювання поверхні потрібного об'єкта [8]. Пірометри мають високу точність та безпечні для людини, вони компактні та легкі. Отже, розгладнемо більш детально деякі сфери використання пірометрів.

Однією з областей використання таких приладів, як пірометри є будівництво. За їх допомогою визначають місця пропускання тепла в стінах, дверях або вікнах житлових будинків (див рис. 1.5.) та промислових споруд. Також за допомогою даних приладів можна виявити наявність пошкоджень дахів, а саме тих частин які мають взаємодію з атмосферою. За рахунок чого, при своєчасному виявленні пошкоджень та витоків тепла, стає можливим зберегти фінансові витрати і витрати енергії. Крім того пірометри використовують для діагностики якості систем кондиціонування та

вентиляції приміщень. Застосовуються при аварійних ситуаціях на тепломережах для знаходження місць проривів теплоізоляційної оболонки.

Рис. 1.5. Вимірювання температури віконного отвору

Пірометри раціонально використовувати при контролі електричного обладнання, з’єднань, контактів та ін., адже дані об’єкти знаходяться під напругою, частини обладнання можуть бути в русі або обертатися, через це безпечно та доцільно використовувати прилади безконтактного вимірювання температур. Виміряні температурні дані дають змогу проаналізувати стан шин, що проводять струм, або дротів. Адже при подачі одного й того самого струму на різних ділянках може бути різна температура, точки з поганим з’єднанням будуть більше нагріватись, це буде свідчати про якість контактів та необхідності проведення ремонтних робіт.

Регулярно час від часу виникає необхідність використання пірометрів при ремонті автомобілів. Їх використовують для визначення температури радіатора, акумулятора, двигуна, системи охолодження двигуна та ін.. Наприклад, для перевірки справності роботи каталізатор, автомобіль слід гарно прогріти, після чого за допомогою пірометра виміряти температуру самого каталізатора та після нього, якщо показники будуть однаковими, або значення температури після каталізатора буде нижчим, то це свідчатиме, що

прилад для очищення вихлопних газів забитий та не працює. Ще одним прикладом застосування пірометрів є вимірювання температури акумулятора, що показано на рис. 1.6., для отримання інформації про батарею, а саме, як вона розігрівається піл капотом.

Рис. 1.6. Вимірювання температури акумулятора атомобіля

В науці використовують інфрачервоні термометри при проведені лабораторних досліджень та експериментів над активними речовинами в агресивному середовищі. Або у випадках коли об’єкт дослідження надто малий або крихкий для контактних методів вимірювання температури, для збереження цілісності експерименту та невтручання в його хід проведення та результати використовують пірометри.

Різноманітне застосування пірометри також знайшли й в побуті. Їх використовують для визначення температури розеток, проводів та інших електричних предметі, що допоможе розрахувати навантаження. Ними вимірюють температуру води та їжі, можна виміряти рівень жару в духовці при випікання. Також в сучасних умовах всесвітньої пандемії пірометри використовують для вимірювання тіла людини. Хоч дані прилади показують

тільки поверхневу температуру, наприклад лобу або зап’ястя, а не внутрішню температуру тіла, як це роблять професійні термометри, які створені спеціально для таких цілей [9, 10]. Але в умовах необхідності вимірювання температури у великої кількості людей за короткий час, інфрачервоні термометри можуть використовуватись для попереднього обстеження.

Також на багатьох виробництвах використання пірометрів є невід’ємною частиною процесів. Як приклад, постійний моніторинг та контроль температури матеріалів, що піддаються обробці та обладнання є важливою частиною процесу металургійного виробництва, що згодом впливає на якість продукції, допомагає покращити процес виробництва, зменшити затрати енергії та виникнення браку. Пірометричний контроль часто є єдиними можливим температурним контролем, який можна використовувати на всіх етапах ливарно-прокатного виробництва, а саме для вимірювання температури розплаву металу, кристалізаторів, температурного контролю на ділянках повторного нагріву заготовок та в різних зонах печей, на виході з печі та вимірювання температури прокату перед транспортуванням та його складуванням та ін. [11, 12].

Також дані прилади можуть використовувати пожежні для визначення температури палаючих ділянок, в космічній галузі для контролю та досліджень, в харчовій галузі для контролю умов зберігання та транспортування, в машинобудуванні для контролю процесів кування, зварювання та пресування, на виробництвах скляних виробів та пластмасових, в залізничній галузі, для контролю вузлів вагонів, на підприємствах, де необхідно проводити контроль рухомих об’єктів в режимі реального часу без їх зупинки, для сканування предметів з метою визначення на них найгарячіших або навпаки найхолодніших ділянок та ін.. Отже, є багато сфер, де можуть бути корисними у використанні пірометри.

1.4. Класифікація пірометрів

Як вже описувалось раніше, пірометри - це пристрої які визначають температурні значення поверхонь безконтактного типу. Вони реєструють та використовують видиме та невидиме випромінювання, що виділяють тіла, для вимірювання його температури без будь-якого фізичного контакту з ним. Вони застосовуються для вимірювання температурних значень поверхонь дуже гарячих тіл та віддалених об'єктів. Розглянемо класифікацію даних пристроїв вимірювання температури.

Пірометри можна поділити за основним принципом дії на три типи, а саме:

- Радіаційні пірометри. Мають повну назву – пірометри повного випромінювання. Вони сприймають теплове випромінювання від цільового гарячого тіла, а також зчитують і записують його температуру в залежності від інтенсивності випромінювання. Температурний діапазон контролю від -50°C до 3500°C.
- Яскравісні пірометри. Принцип їх роботи полягає в узгодженні яскравостей об'єкта контролю і нитки лампи розжарення, яка розміщена всередині конструкції приладу. Температурний діапазон контролю від 700°C до 6000°C.
- Колірні пірометри. Також можуть називатись пірометрами спектрального відношення або мультиспектральними пірометрами, в іноземній літературі – логометричні. Даний тип пірометрів визначає температуру поверхні по відношенню інтенсивностей її випромінювання на двох трохи відмінних довжинах хвиль (або в двох різних спектральних діапазонах). Температурний діапазон контролю від 300°C до 2800°C.

За температурним діапазоном поділяють на:

- Низькотемпературні. Застосовують для вимірювання поверхонь, які мають від'ємні значення температури (від -30°C), але можуть мати й досить великий температурний діапазон додатних значень.

- Високотемпературні. Застосовують для контролю тільки сильно нагрітих поверхонь об’єктів.

За прицілом на об’єкт:

- Прилади з лазерним прицілом.
- Прилади з оптичним прицілом.

За конструкційними особливостями:

- Стаціонарні. Використовуються на великих виробництвах для проведення більш точного постійного вимірювання температури поверхні об’єктів. Розташовують такі прилади у важкодоступні або небезпечні для робітників місця. Мають великі габарити та безпосереднє з’єднання з компотними пристроями.
- Переносні. Мають широкий спектр застосування у різних сферах, за рахунок малих габаритів, компактності та мобільності.

За коефіцієнтом випромінення:

- з фіксованим коефіцієнтом випромінення.
- з коефіцієнтом, що змінюється.

За способом візуалізації даних:

- Текстово-цифрові. На дисплей виводяться цифрові дані температури в градусах та допоміжну інформацію.
- Графічні. Виводять температурні дані у вигляді графіків. Різні температури виділено різними кольорами.

1.5. Принцип роботи пірометрів

Інфрачервоні термометри являються сучасними приладами для проведення безконтактного вимірювання температурних показників поверхні контрольованого об’єкта. Як вже розглядалось в попередньому розділі, в залежності від принципу дії дані прилади поділяють на три типи. За даною класифікацією кожний тип пірометрів має свої сильні та слабкі сторони. Виходячи з них та особливостей діяльності в конкретних сферах робітники з

різних галузей промисловості та науки визначають який саме пірометр підійде для їх діяльності. Нижче розглянуто принципи роботи кожного з типів пірометрів окремо, приклади сфер, де їх використовують та проаналізовано переваги та недоліки даних приладів.

1.5.1. Радіаційні пірометри

Радіаційні пірометри є безконтактними приладами, які вимірюють температуру об'єктів, реєструючи їх власне теплове випромінювання. Оптична система такого пірометру збирає інфрачервоний світловий потік від об'єкта (1), який проходить крізь лінзу об’єктива (2), потрапляє на дзеркало (3) та фокусує його на детекторі (5). Детектор перетворює зібрану енергію в електричний сигнал, який відображується на дисплеї (6) чи оброблюється для подальшого використання. Регульований окуляр (4) слугує засобом для візування пірометра з об’єктом контролю. Для більш зручного візуального наведення на об’єкт контроля у приладі також може бути оптичний канал з телескопічною системою та у рідких випадках вимірювальний і візуальний канали можуть бути суміщені (дивись рис. 1.7).

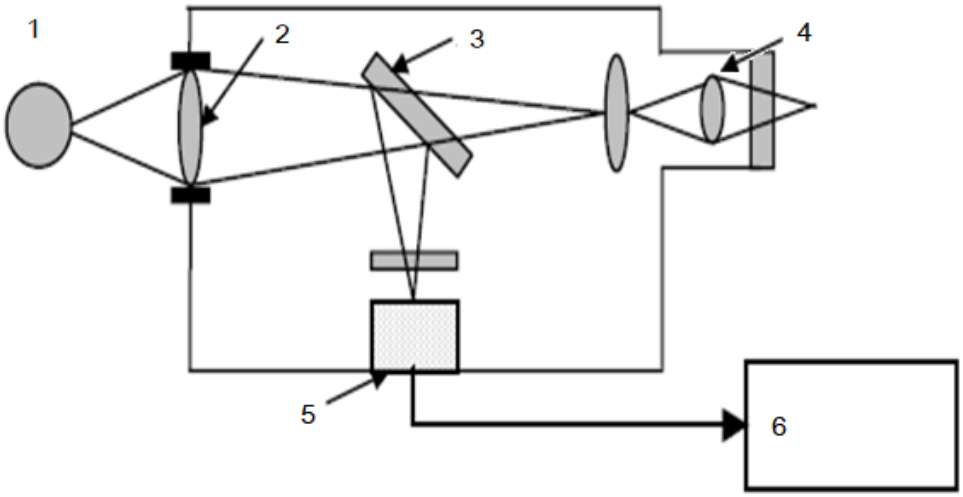

Рис. 1.7. Структурна схема радіаційного пірометра

1 – гарячий предмет; 2 – лінза; 3 – дзеркало; 4 – регульований окуляр; 5 – детектор; 6 – індикатор температури.

У таких пірометрах використовуються два види детекторів: тепловий (термобатарея) і фотонний (фотоелектронний помножувач). Варто відзначити, детектори фотонів працюють значно швидше в порівнянні з тепловими приймачами випромінювання. Виходячи з цього є можливість проводити температурні вимірювання використовуючи фотонний тип датчиків для невеликих за розміром об'єктів, які рухаються з високою швидкістю.

Радіаційні пірометри використовуються для вимірювання температури різноманітних поверхонь. Наприклад такими об’єктами які потребують подібного типу контролю можуть бути розплавлене скло та метали.

Однією з найбільш широких областей застосування інфрачервоних пірометрів радіаційного типу є металургійна промисловість. Температурний контроль в даній сфері важливий на багатьох етапах, необхідно слідкувати за температурою плавлення та обробки металів, контролювати і підтримувати температуру на інших етапах для забезпечення якісної продукції та зменшенню ймовірності виникнення дефектів у готової продукції. В металургійній промисловості проводиться вимірювання дуже високих температур, тож слід використовувати безконтактні прилади з високим верхнім порогом. Інші засоби, такі як термопара, не можуть надати можливість безпечного, швидкого та безперервного здійснення контролю температур на відміну від радіаційних пірометрів.

Вимірювання температури радіаційним пірометром має фактори, які знижують точність контролю. До таких факторів відноситься фізичний стан об’єкта, що має вплив на величину випромінювальної здатності. На неточність результатів може впливати фактура поверхні чи наявність на ній захисного покриття чи плівок, накипу, іржі та інших природних утворень. Наявність пилу або диму між приладом й об’єктом контролю також може слугувати причиною виникнення похибок.

1.5.2. Яскравісні пірометри

Яскравісні пірометри використовуються для визначення температури печей, розплавлених металів та інших перегрітих рідин чи матеріалів.

Загальна схема таких пірометра зображена на рис. 1.8.. Прилад складається з об’єктива (5), який фокусує випромінювану енергію від нагрітого предмета (6) та спрямовує її на електричну лампу розжарювання (3). Інтенсивність світіння нитки розжарювання залежить від струму, що проходить через неї. Лампа розжарення живиться від акумулятора (8).

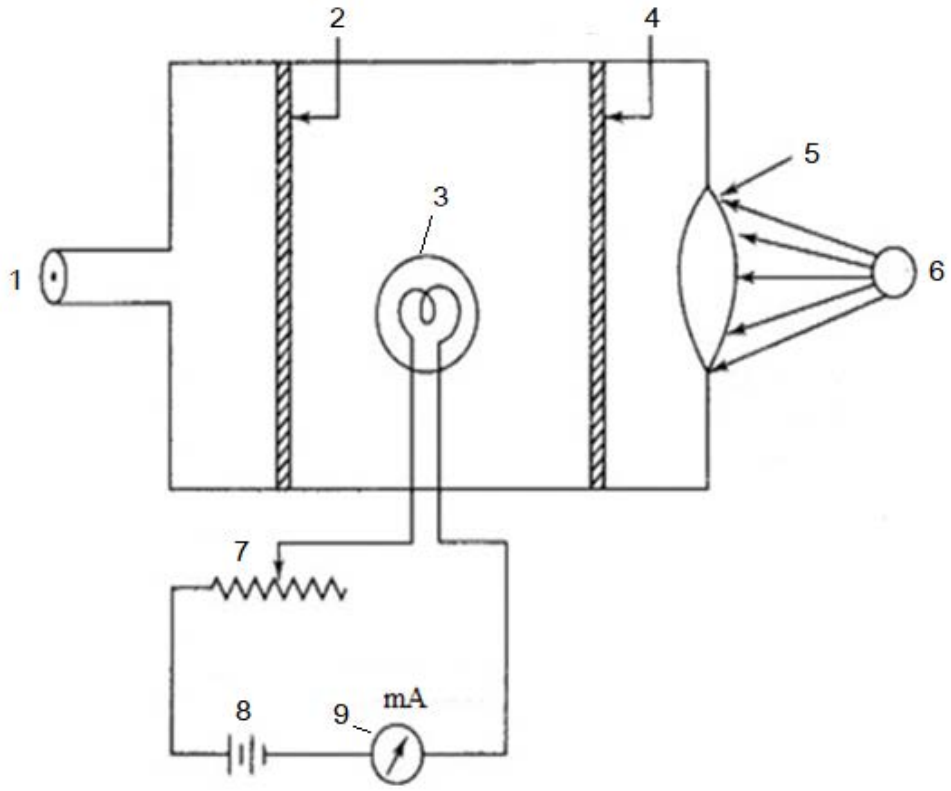

Рис. 1.8. Структурна схема яскравісного пірометра:
1 – окуляр; 2 – фільтр; 3 – лампа розжарення; 4 – екран поглинання;
5 – лінза об’єктива ; 6 – нагріте тіло; 7 – реостат; 8 – джерело струму;
9 – міліамперметр.

Реостатом (7) регулюється величина струму доти, поки яскравість нитки розжарювання не стане максимально подібною до яскравості об'єкта

контролю. Для збільшення діапазону температур, що можна виміряти, між оптичною лінзою (5) та еталонною лампою розжарення (3) розташовують екран поглинання (4). А червоний фільтр (2), що розташований між лінзою окуляра (1) та еталонною лампою, допомагає звузити діапазон хвиль. Контур розжарення повністю зникає, коли яскравість нитки розжарення і яскравість предмета однакові, і стає непомітним для людського ока (рис. 1.9.а). Коли температура нитки перевищує температуру поверхні об'єкта контролю, вона виглядає яскравою (рис. 1.9.б). Якщо її температура менше, ніж потрібна для однакової яскравості, вона здається темною (рис. 1.9.в).

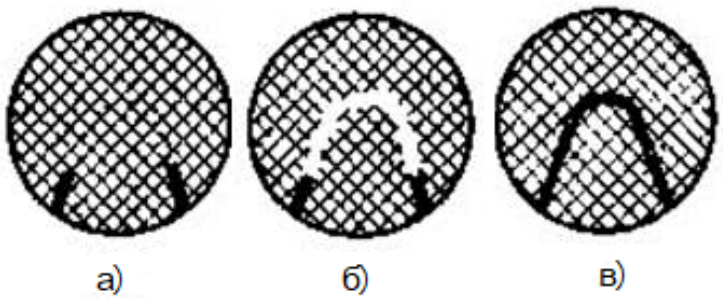

Рис. 1.9. Нитка яскравісного пірометра: а) температури нитки однакова з температурою об'єкта; б) температури нитки більше за температуру об'єкта; в) температури нитки менша за температуру об'єкта.

Такий прилад не може використовуватись з метою виконання неперервних зчитування температури за короткі проміжки часу. Метод реєструє інтенсивність світла, яке випромінюється нагрітим тілом у видимому діапазоні спектру, отже його можна застосовувати лише для вимірювання високих температур, як вже розглядалось при класифікації, вище 700 °С. На точність вимірювання яскравісного пірометра має вплив суб'єктивний людський фактор.

1.5.3. Пірометри спектрального відношення

Колірні пірометри використовують для вимірювання температури в різних областях промисловості, наприклад у металургійній, та в наукових дослідження. Вони використовують декілька датчиків випромінювання (від двох та більше), що працюють у двох чи більше різних спектральних діапазонах. Стосовно їх сигналів і визначається температура контрольованого об’єкта.

Випромінювання контрольованої поверхні об’єкта проходячи крізь захисне скло (1) та об’єктив (2) приладу потрапляє через обтюратор (3) на фотоелемент (4). Обтюратор являє собою диск з червоним та синім світофільтрами, котрий рухається за допомогою синхронного двигуна. Тобто випромінювання проходить через світофільтри обтюратора які обертаються один за одним. Логарифмічний пристрій (6) слугує для перетворення змінного струму, що спершу посилив підсилювач (5) та напруга котрого пропорційна відповідній інтенсивності випромінювання, у постійний струм. Сила струму, що виходить з пристрою (6) визначається мілівольтметром (7). Загальна схема мультиспектрального пірометра показана на рис. 1.10.

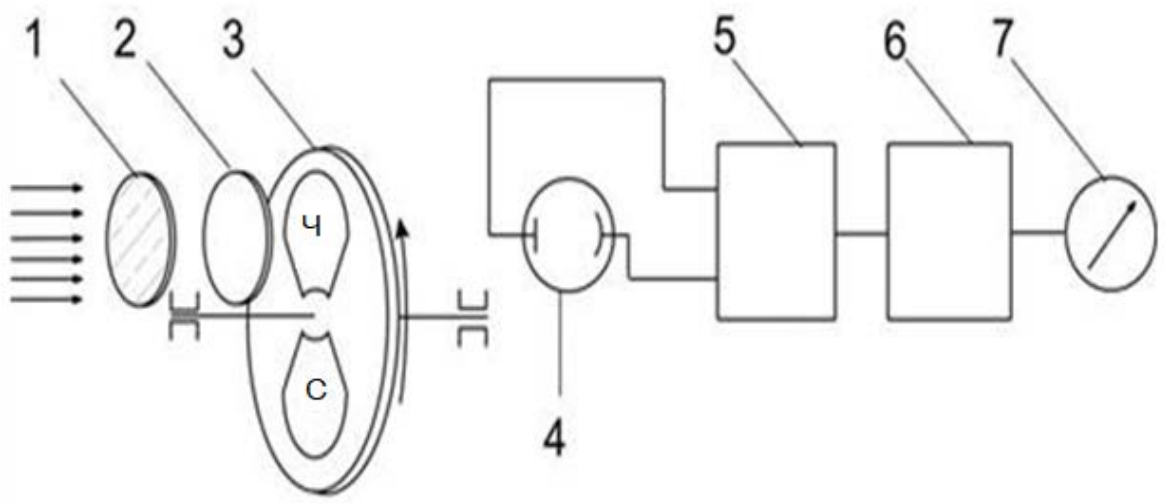

Рис. 1.10. Структурна схема мультиспектрального пірометра

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

5 – електронний підсилювач; 6 – логарифмічний пристрій; 7 – мілівольтметр.

Пірометри спектрального відношення важчі у конструкції за інші, вони мають більшу кількість елементів у собі, їх важче калібрувати. Тож вартість даних приладів безконтактного вимірювання температури вища. Але, не дивлячись на високу вартість таких пірометрів, завдяки їх точності, ці прилади використовують у багатьох галузях виробництва. Їх конструкційні особливості можуть відрізнятись, тож можливо їх використовувати з різними цілями [13].

Однією з багатьох сфер, де застосовуються мультиспектральні пірометри є ливарно-прокатне виробництво. Температурний контроль на якому є одним з важливих процесів під час виробничого процесу. Наприклад перед гарячою прокаткою температура нагріву заготовок повинна бути такою високою, щоб забезпечити пластичне деформування металу без його руйнування. Слід забезпечувати та слідкувати за рівномірним розподілом тепла вздовж усієї заготовки. Стежити, щоб не відбулось перенагріву металу, коли температура нагріву вище ніж потребує певна марка сталі. Адже це призводить до погіршення властивостей металу та до утворення тріщин в ньому. У випадках, коли заготовки не досягають потрібної температури нагріву чи були перегріті, відправляються в брак.

1.6. Обґрунтування вибору мультиспектрального пірометра

Усі типи пірометрів, яку були розглянуті у попередньому розділі, мають свої переваги та недоліки, повний порівняльний аналіз яких представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Порівняльний аналіз типів пірометрів

Класифікація	Переваги	Недоліки
1	2	3
Радіаційні	Проста конструкція; відносно невисока вартість; висока надійність; невеликі габарити;	Величина випромінювальної здатності залежить віл фізичного стану об'єкта, фактури поверхні (матова або гладка), наявності

1	2	3
	вимірює температури до 300-400 °С та трохи вище; може вимірювати низькі температури – до -50 °С.	захисних покриттів або плівок, іржі чи накипу та інших природних утворень. Такі фактори знижують точність вимірювання температури.
Яскравісні	Відстань від приладу до об’єкту контролю може бути досить великою; прилад зручний у використанні.	Реєструє інтенсивність світла, яке випромінює нагріте тіло у видимому діапазоні спектру, таким чином застосовується тільки для здійснення вимірювань високих температур (вище 700 °С); точність вимірювання залежить від суб’єктивного людського фактору; не використовується для вимірювання температури чистих газів.
Колірні	Відстань від приладу до об’єкта контролю або його випромінювальна здатність не впливає на точність .	Відносно складна конструкція ; висока вартість.

Проведемо більш детальний розгляд пірометрів спектрального відношення. В даний час такі прилади застосовуються в різних областях промисловості та науковій діяльності. Даний попит обумовлений рядом переваг, тож розглянемо їх детальніше.

За рахунок того, що даний метод безконтактного контролю температури, замість того щоб вимірювати кількість теплового випромінювання на певній одній довжині хвилі, визначає енергію на двох різних за довжиною хвилях та використовує їх відношення для отримання температурних показників об’єкта, будь-які зміни характеристики поверхні досліджуваного об’єкта будуть визначені двома датчиками в однаковій степені. Виходячи з цього відношення між двома сигналами, що виходять з датчиків, буде постійним, через це два показання температурних значень залишуться однаковими.

Також за допомогою даного методу можна проводити надійні вимірювання, що не будуть зменшувати точність, навіть в забруднених місцях та при таких перешкодах як пил чи пар, дим та інших. Двоколірні пірометри продовжують видавати надійні та точні температурні дані поверхні об'єктів навіть при ослабленні оптичного сигналу на 90%. Перешкоди, що можуть з’являться в зоні прямої видимості, а також пил і бруд на поверхні фокусної лінзи знижують кількість інфрачервоної енергії, яка потрапляє на датчик. Новочасні пірометри спектрального відношення оснащені спостерігаючим пристроєм за рівнем інтенсивності сигналу та функцією, котра сповіщає спеціаліста при перевищенні налаштованого допустимого порогу ослаблення корисного сигналу. Опція забезпечує надійність і достовірність результатів вимірювань. У систематичному моніторингу ступеня забруднення оптичної системи також зникає необхідність, оскільки пристрій автоматично визначає, коли поверхню лінзи надмірно брудна. Реалізувати подібну функцію для одноколірних пірометрів технічно неможливо [14].

При використанні мультиспектральних пірометрів на температурні показники не буде впливати відстань до об’єкта та обставини, коли досліджуваний об’єкт не повністю заповнюватиме цільову пляму та буде виникати послаблення сигналу. Використовуючи двоколірну техніку, прилад буде видавати все рівно точні температурні значення, навіть коли сам досліджуваний об’єкт на 80% менше за цільову пляму [15].

Як вже розглядалось в класифікації з попереднього розділу, такі безконтактні прилади можуть бути стаціонарними, їх встановлюють з метою проведення безперервного моніторингу. Також можуть використовуватись в якості переносних засобів, для можливості проведень порівнянь зі стаціонарними приладами та для перевірки цільового об’єкта у окремих вибіркових точках.

Але крім позитивних сторін прилад має недоліки. Як вже розглядалось раніше, пірометри спектрального випромінювання мають високу ціну. Також

при двокольорових вимірюваннях не сірих тіл виникають ускладнення. На рис. 1.11. показані приклади різних матеріалів, властивості випромінювання яких залежать від змін температури.

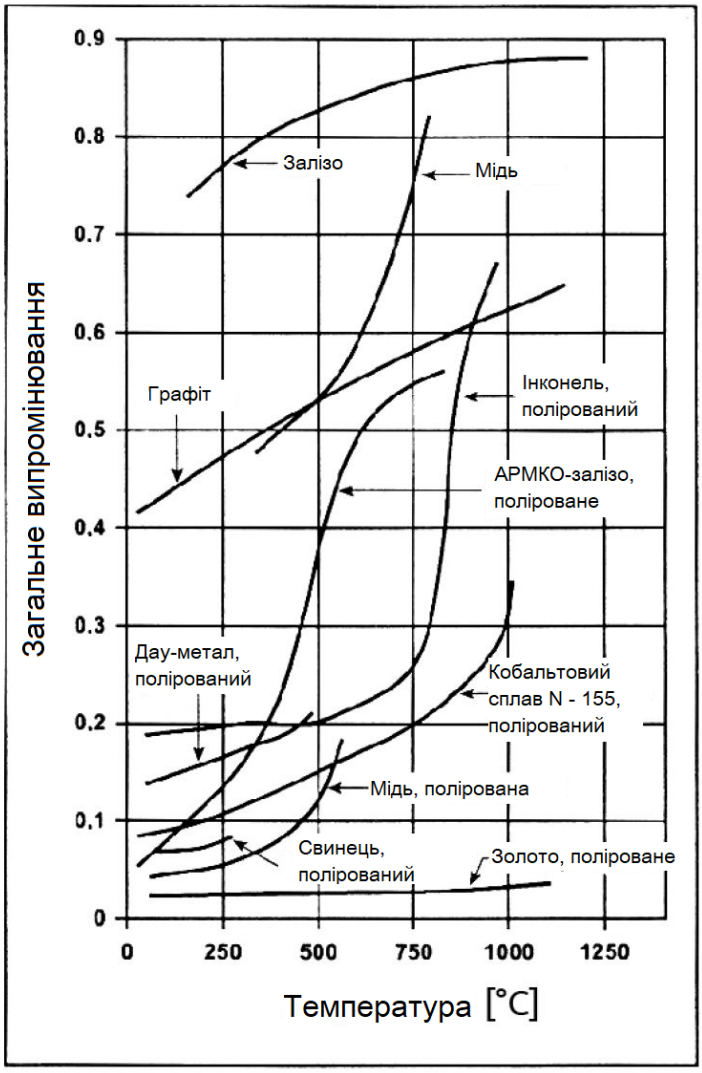

Рис. 1.11. Залежність коефіцієнту випромінювання від температури

Адже для проведення вимірювань об’єктів з таких матеріалів слід ретельно аналізувати характеристики поверхні вимірювального об’єкта, визначити за допомогою алгоритмів зв'язок між випромінювальною здатністю, температурою, довжиною хвилі та властивостями поверхні, для того щоб зробити ствердження про випромінювання на різних довжинах хвиль та температури матеріалів [16].

Також значення температурних показників може бути спотворено, якщо поле зору спектрального пірометра потрапить у середовище, в якому розмір частинок буде збігатись з довжиною використовуваної хвилі для випромінювання.

Не дивлячись на недоліки методу вимірювання відношення для отримання температурних значень, дані пірометри дуже гарно працюють у багатьох підприємствах з високою точністю. Для проведення деяких вимірювань даний метод являється кращим, а інколи і єдиним можливим, для забезпечення точності отриманих результатів показників температури.

1.7. Огляд аналогів

В нинішній день на ринку існую багато різноманітних пірометрів для різних цілей використання та сфер застосування. Вони відрізняться функціоналом, технічними характеристиками та особливостями, вартістю, дизайном, формами та габаритами та ін.. Розглянемо деякі з пірометрів, що представлені сьогодні на ринку.

Пірометр GM550 Benetech являє собою компактний пристрій, зовні нагадує форму пістолета, яка є класичною для пірометрів, з «курком» за допомогою якого здійснюються вимірювання. При натисканні даного «курка» відбуваються неперервні вимірювання з інтервалом пів хвилини. При віджиманні кнопки показання фіксуються. Даний прилад має можливість здійснювати температурні вимірювання по Цельсію та Фаренгейту. Має невеликий вбудований дисплей та три кнопки керування, одна з яких включає або виключає підсвічування, інша слугує перемикачем між шкалами °C/°F і третя включає та виключає лазер для вимірювання. Загальний вигляд GM550 Benetech показано на рис. 1.12.

Рис. 1.12. Загальний зовнішній вигляд пірометра GM550 Benetech

Роздільна оптична здатність даного пірометра становить 12:1, що дає можливість проводити вимірювання на досить безпечній відстані від гарячого об’єкта. Діапазон температур відповідає значенням від -50℃ до 550℃. Він відноситься до середнього класу пірометрів та має не високу вартість. Його використовують в автосервісах, для контролю тепломереж та в кулінарні справі.

Пірометр Flus IR-86 використовують для контролю систем охолодження, для відслідковування температур редукторів та електродвигунів, газових котлів, у залізничній області для контролю колісних пар. Дана модель має гарну збірку. Легко натискаються кнопки та фіксується «курок». Загальний вигляд Flus IR-86 показано на рис. 1.13.

Рис. 1.13. Загальний зовнішній вигляд пірометра Flus IR-86

Має вбудований кольоровий LCD дисплей, що є зручним, адже під час довготривалої роботи це допоможе спеціалісту фіксувати свій погляд саме на зчитаних показниках. Значення діапазону вимірювання температури становить від -50°С до 380°С. Роздільна оптична здатність даного пірометра становить 13:1. Має лазерне прицілювання, з точкою, яка відповідає центральній області в якій проходить вимірювання. Швидко зчитує та виводить на екран показання.

Більш докладні характеристики розглянутих пірометрів та їх порівняльний аналіз представлено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Огляд та порівняння технічних характеристик аналогів

Технічна характеристики	Пірометри	
	GM550 Benetech	Flus IR-86
1	2	3
Температурний діапазон	-50°С … 550°С	-50°С … 380°С
Оптична роздільна здатність	12:1	13:1
Робоча температура	0°С … 40°С	0°С … 50°С

1	2	3
Робоча вологість	10-95%	10-95%
Похибка	±1,5%	±2%
Коефіцієнт емісії	0,95	0,1-1
Час вимірювання	500 мс	1 с
Довжина хвилі	5-14 мкм	8-14 мкм
Розширення	0,1℃/℉	0,1℃
Дисплей	LCD	LCD
Вбудованій лазерний приціл	✓	✓
Живлення	9В, батарея тип «Крона»	9В, батарея тип «Крона»
Габарити	153x101x43 мм	145x75x39 мм
Вага	147 г	121 г

Порівнюючи дані приведені в табл. 1.2. можна зробити висновки, що за технічними характеристика дані пірометри схожі та більшість характеристик майже однакові. Недоліком таких пірометрів є невелике об’єктивне розширення, вони не в змозі виміряти температуру маленького за площею об’єкту на великій відстані та наявність 2% похибки.

Висновки до розділу 1

В першому розділі було розглянуто методи та засоби, що слугують для вимірювання показників температури об’єктів та зроблено вибір на користь безконтактного вимірювання температури, а саме за допомогою таких приладів як пірометри. Адже їх застосування дозволяє здійснювати вимірювання дистанційно з безпечної відстані, перш за все у тих випадках, коли фізичний контакт приладу з досліджуваною поверхнею неможливий через високі температури або об’єкт контролю знаходиться у важкодоступному місці. Використання пірометрів дає можливість отримати швидкі та точні показники, їх використовують спеціалісти у багатьох сферах, вони користуються попитом у споживачів для побутових цілей, що докладно було розглянуто у одному з підрозділів.

Розглянуто основи пірометрії та класифікацію даних приладів за

різними ознаками. За рахунок аналізу принципів роботи типів пірометрів, їх структурних схем, слабких та сильних сторін надано перевагу пірометру спектрального відношення, який в одному з розділів проаналізовано більш детально та розглянуто більш ґрунтовно.

Розглянуто аналоги пірометрів, що є на сучасному ринку. Розглянуто зовнішній вигляд кожного з них та представлено порівняльний огляд їх технічних характеристик. Зроблено висновки про їх недоліки, що потребують вдосконалення.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПІРОМЕТРА

2.1. Розробка функціональної схеми приладу

У попередньому розділі розглядалась загальна схема пірометра спектрального відношення (див. рис. 1.10), вона має один оптичний канал та синхронний двигун, за допомогою якого обертається обтюратор, за рахунок чого випромінювання проходить через світлофільтри, що змінюють один одного. Саме через наявність рухомих елементів термін служби безконтактного приладу знижується. Функціональні характеристики даної схеми є вузькими та без застосування сучасних можливостей. Тож було розроблено новітню функціональну схему мультиспектрального пірометра з доданням різних функцій та можливостей (див. рис. 2.1.).

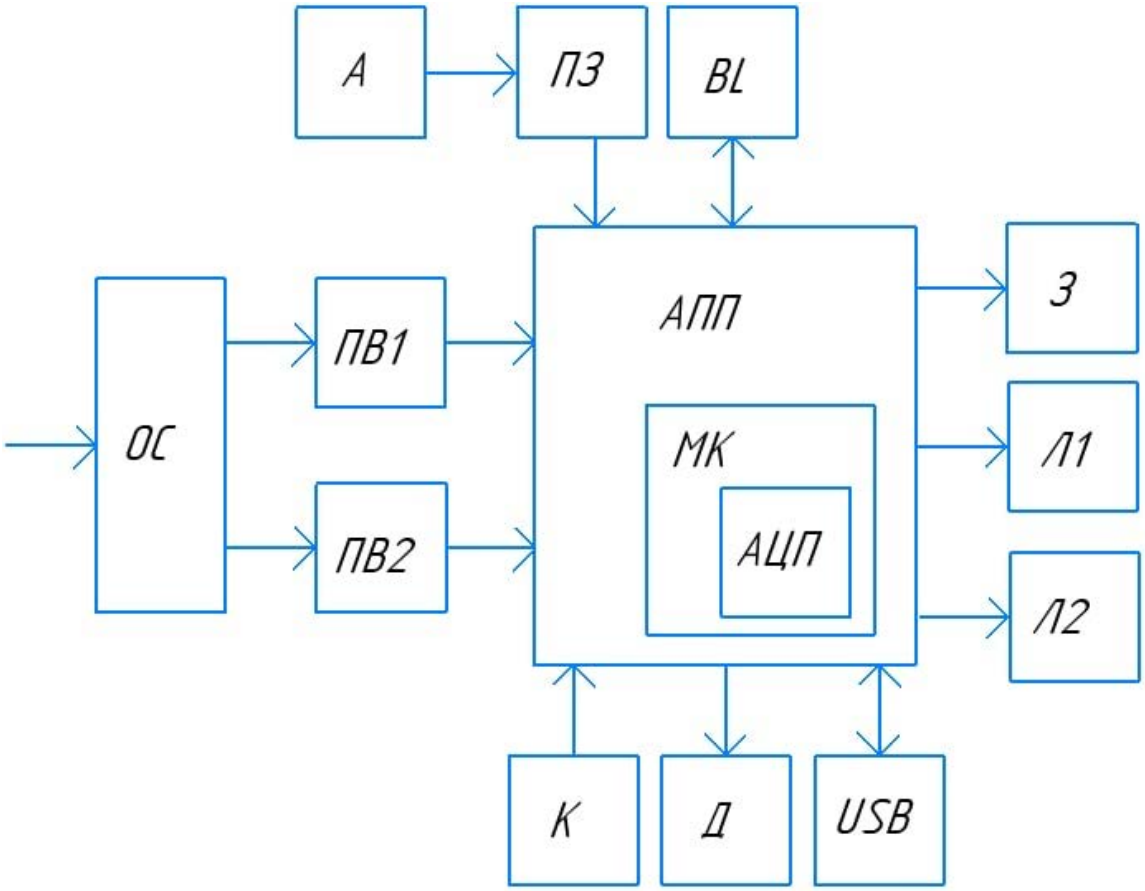

Рис. 2.1. Функціональна схема мультиспектрального пірометра

- ОС – оптична система
- АПП – апаратно-програмна платформа
- МК – мікроконтролер
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- К – кнопки
- Д – дисплей
- USB – USB-порт
- З – модуль звукової індикації
- Л1, Л2 – лазерні вказівники
- BL – Bluetooth-модуль
- А – акумулятор
- ПЗ – плата зарядки

За даною схемою пірометр має двоканальну ОС, через яку проходить теплове випромінювання поверхні об’єкта, який досліджується, та потрапляє на ПВ [17, 18]. Далі сигнал потрапляє для подальшої обробки на АПП з МК з вбудованим АЦП. Управління роботою приладу здійснюється за допомогою К. Виміряні температурні данні виводяться на вбудований Д. Вимірювання супроводжуються звуковим сповіщенням за допомогою З, з метою повідомлення користувача про перевищення певної встановленої граничної температури. Прилад оснащений системою крос-лазера Л. Дана система являє собою два схрещених промені, що розходяться та підсвічують краї площадки поверхні, з якої відбувається зняття температурних показників. Така система забезпечить можливість навести прилад на контрольований об’єкт з оптимальної відстані, так щоб у поле зору об’єктиву потрапила виключно контрольована поверхня об’єкта, що покращує точність пірометра у порівняні з однопроменевим лазером [19, 20]. Для можливості проведення бездротового обміну інформації з ПК, смартфоном або планшетом використовується BL та для дротового USB [21]. За допомогою даного модуля можна керувати приладом дистанційно, дивитись отримані

вимірювальні данні у зручній формі, відображати інформацію у вигляді таблиць або графіків та зберігати її. Джерелом живлення інфрачервоного термометра є А з ПЗ. Перевагами використання А над батарейками є портативність приладу та відсутність необхідності купувати витратні елементи живлення.

2.2. Проектування оптичної системи приладу

Як вже розглянуто у попередньому розділі, розроблений прилад складається з двоканальної оптичної системи. У даній системі відсутній рухомий елемент, такий як двигун, що використовується у стандартній схемі безконтактного приладу вимірювання температури, що значно підвищує строк служби пірометра.

Моделювання оптичної системи було проведено у середовищі Zemax. Так як розроблювальна система має два приймачі випромінювання, було побудовано два канали системи окремо, які мають один спільний об’єктив. Розглянемо більш детально кожен із каналів.

Для побудови першого оптичного каналу до таблиці конструктивних параметрів було задано наступні значення (див. рис. 2.2.):

Surf:Type		Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter		Conic	P
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity		0.000	
STO	Standard		Infinity	5.000		7.000		0.000	
2	Standard		17.000	3.000	ALON	7.032		0.000	
3	Standard		26.000	15.000		6.591		0.000	
4#	Standard		Infinity	-12.000	MIRROR	5.200	U	0.000	
5#	Standard		Infinity	7.000	MIRROR	3.600	U	0.000	
6#	Standard		Infinity	1.100	CALCITE	2.500	U	0.000	
7*	Standard		Infinity	12.380		2.500	U	0.000	
8#	Standard		Infinity	7.960		0.241		0.000	
IMA	Standard		Infinity	-		1.250		0.000	

Рис. 2.2. Конструктивні параметри першого каналу оптичної системи мультиспектрального пірометра

В результаті отримали систему в лінзу об’єктива (1) якої падає теплове випромінювання від об’єкту контролю, далі потрапляє на половину призми

(5), а саме на зміщене в сторону (вверх) відносно центра оптичної осі дзеркало, відбивається та потрапляє на дзеркало (2), після чого потрапляє на фільтр (3) та приймач випромінювання (4). Загальну схему двоканальної оптичної системи пірометра показано на рис. 2.3.

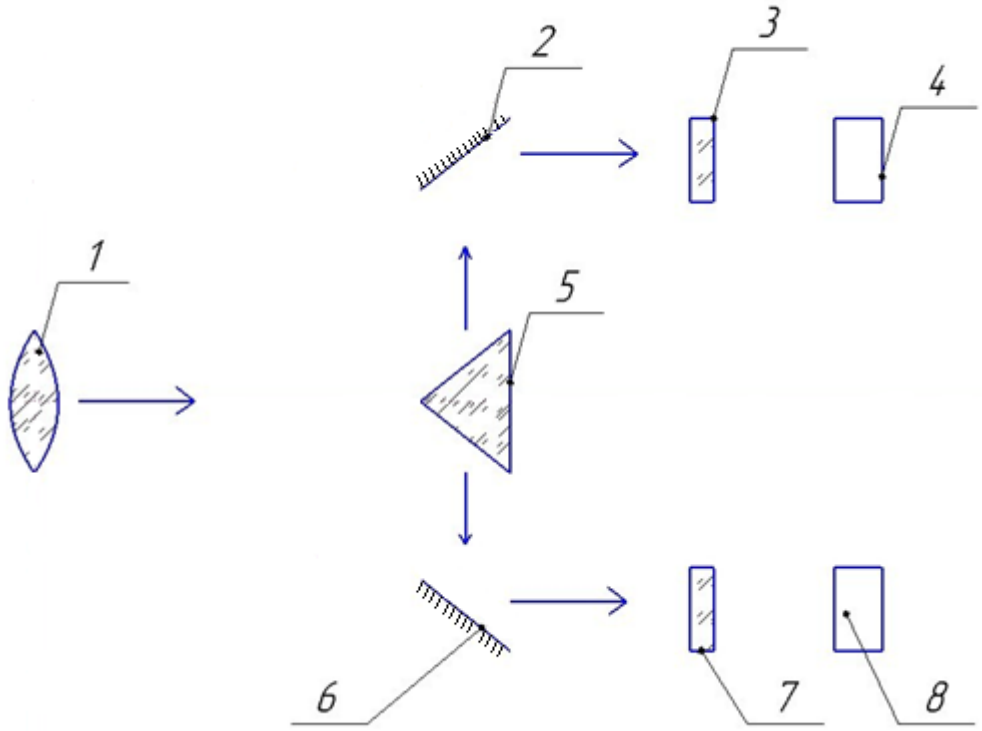

Рис. 2.3. Загальна схема оптичної системи мультиспектрального пірометра
1 – лінза об’єктиву; 2, 6 –дзеркало першого та другого оптичних каналів відповідно; 3, 4 – фільтри першого та другого каналів відповідно; 4, 8 – приймач випромінювання першого та другого каналів відповідно; 5 – призма з дзеркальними сторонами.

Зовнішній вигляд спроектованого каналу оптичної системи у вигляді пустотілого тривимірного зображення представлений на рис. 2.4. та тіньова модель на рис. 2.5.

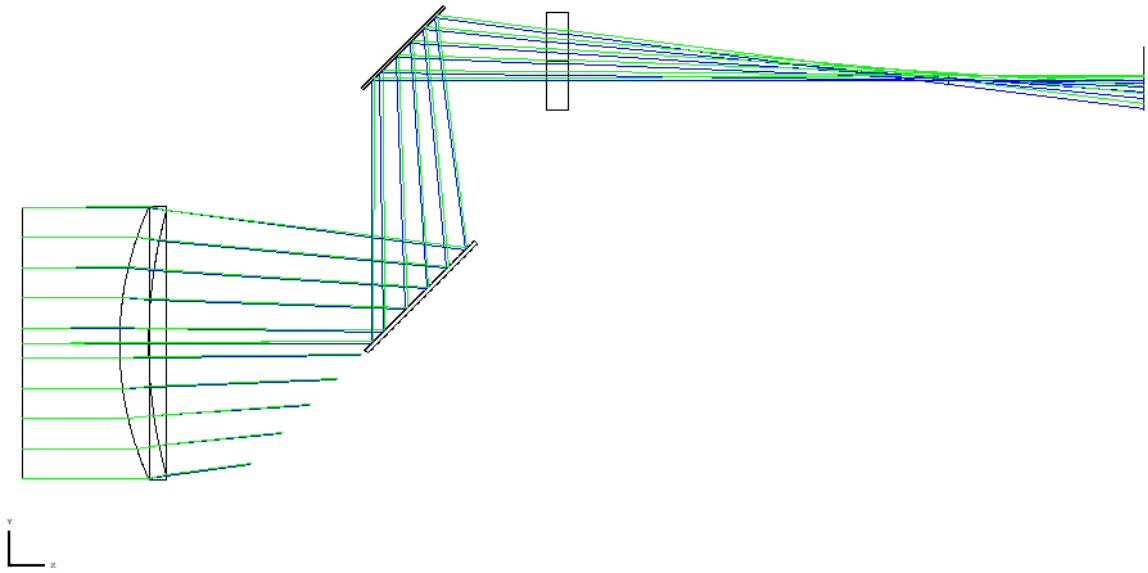

Рис. 2.4. Тривимірне пустотіле зображення першого каналу оптичної системи

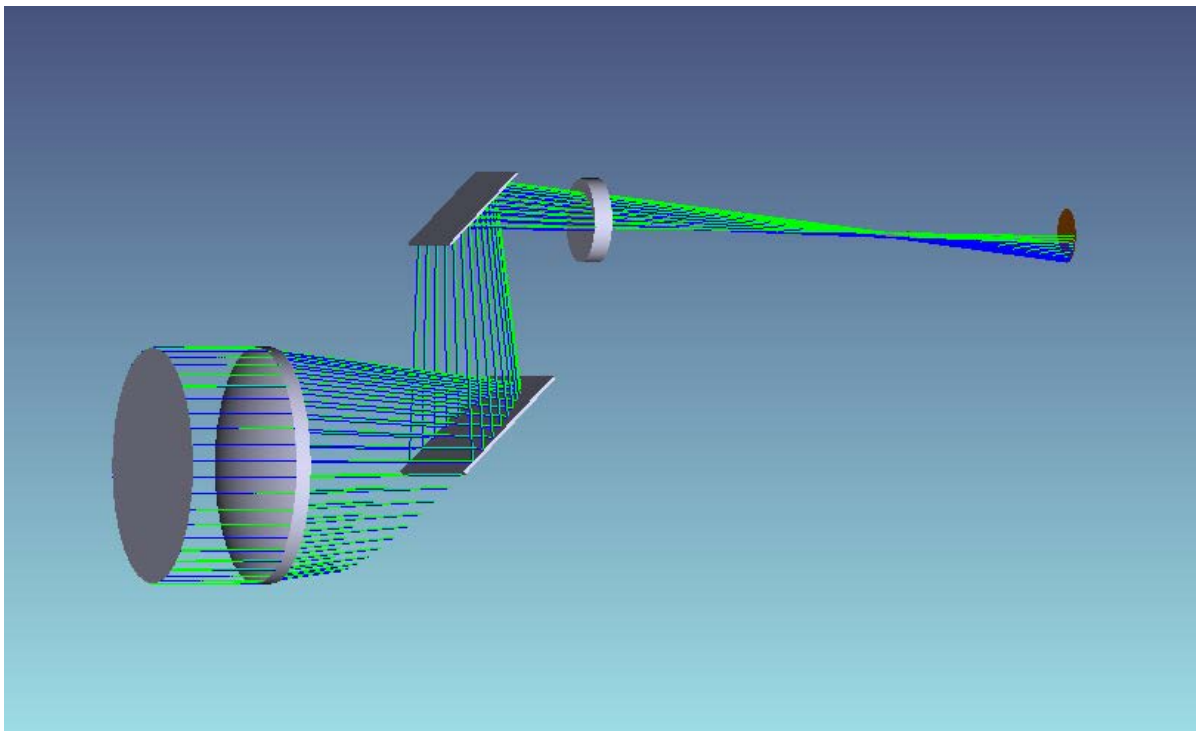

Рис. 2.5. Тіньова модель першого каналу оптичної системи

Перший канал має робочу довжину хвилі 1575 нм. Графік пропускання фільтру показано на рис. 2.6.

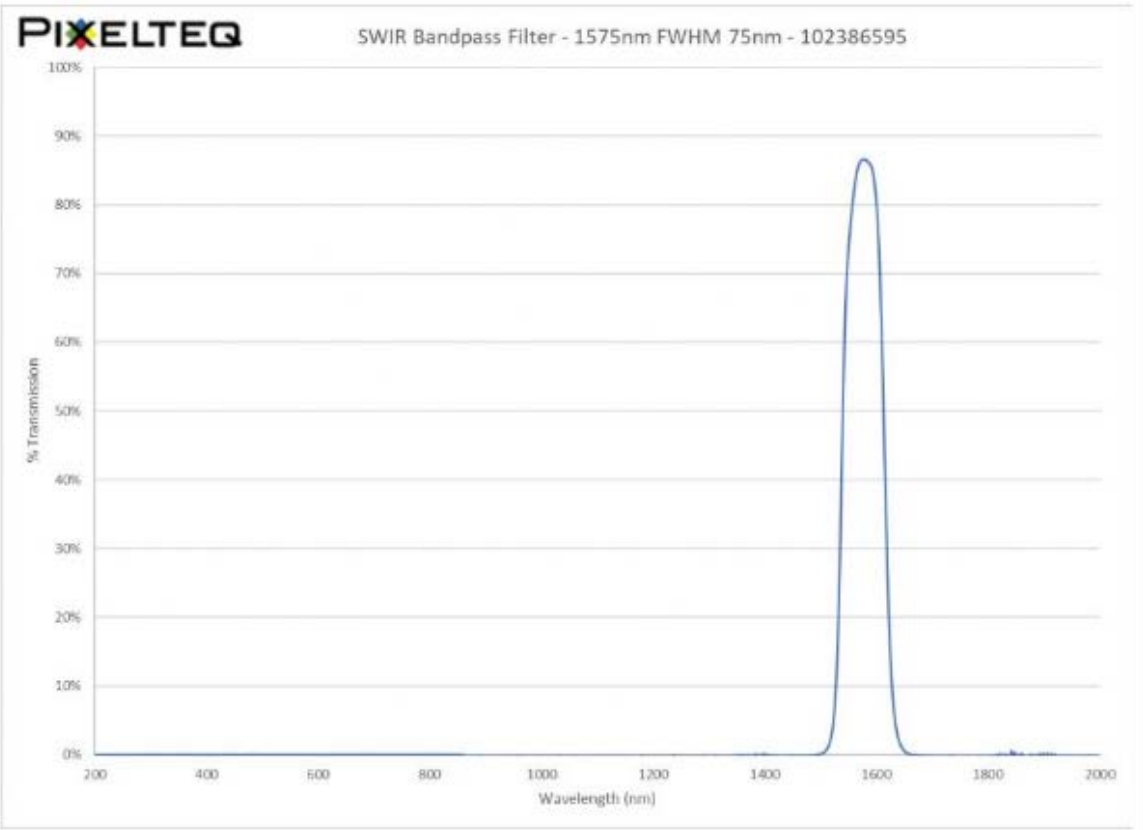

Рис. 2.6. Графік пропускання фільтру першого каналу

Згідно з рис. 2.2. світовий радіус, який знаходиться на відстані 7,960 мм від останньої оптичної поверхні системи, дорівнює 1,25 мм. Помноживши дане число на два отримаємо повний діаметр світлового пучка в площині зображення, який складає 2,5 мм. Розмір чутливої площадки вибраного приймача випромінювання G8931-04 для першого каналу розроблюваної системи точно відповідає даному розміру. Спектральний діапазон даного фотодіоду відповідає довжинам хвиль від 0,95 мкм до 1,7 мкм. Фільтр, що стоїть перед даним приймачем працює на довжині хвилі, де чутливість приймача максимальна (див. рис. 2.6.). Графік чутливості фотодіоду в залежності від довжини хвилі показано на рис. 2.7.

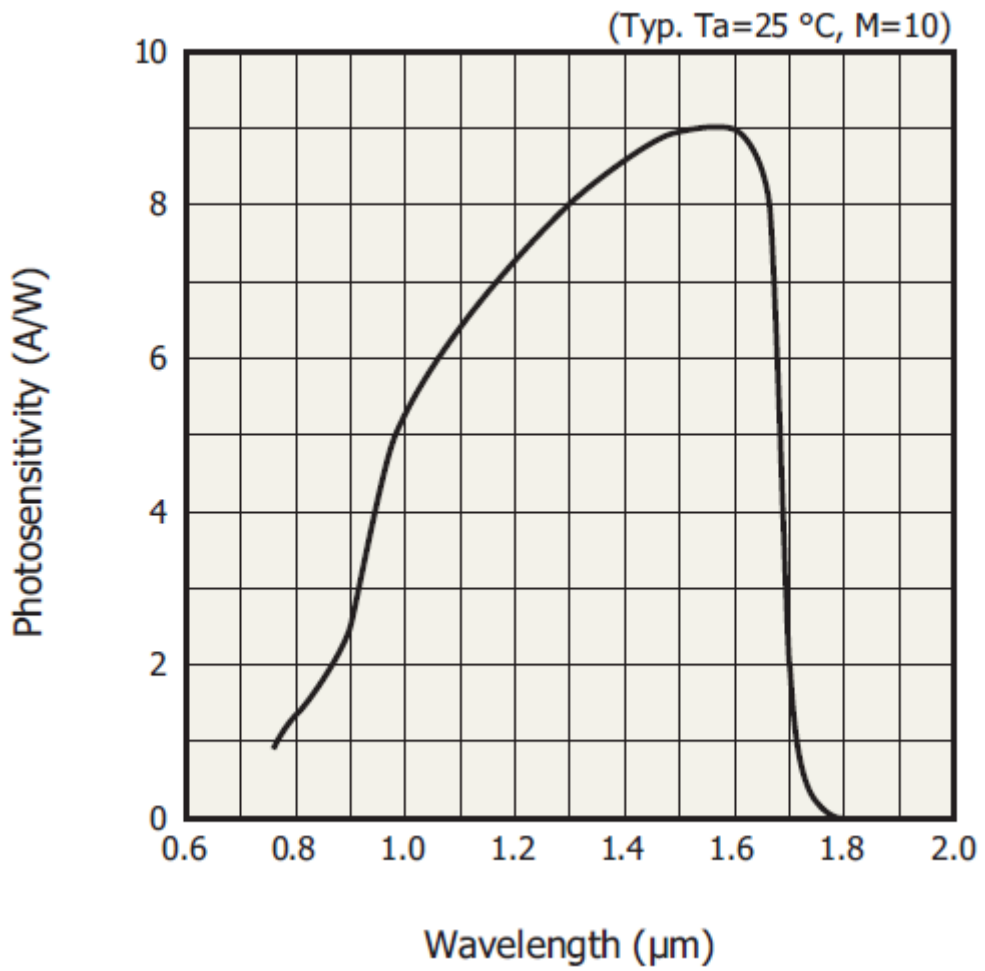

Рис.2.7. Графік чутливості фотодіоду G8931-04 в залежності від довжини хвилі

Використовуючи функцію «Illumination XY Scan» можемо провести оцінку залежності рівня концентрації випромінювання від розміру ділянки приймача в площині зображення, на яку потрапляє теплове випромінювання досліджуваного об’єкта (див. рис. 2.8.). Використовуючи функцію «Illumination 2D Surface» побудуємо зображення двомірної площини рівня концентрації випромінювання, що має колірну індикацію (див. рис. 2.9.) або тривимірного графіку (див. рис. 2.10.).

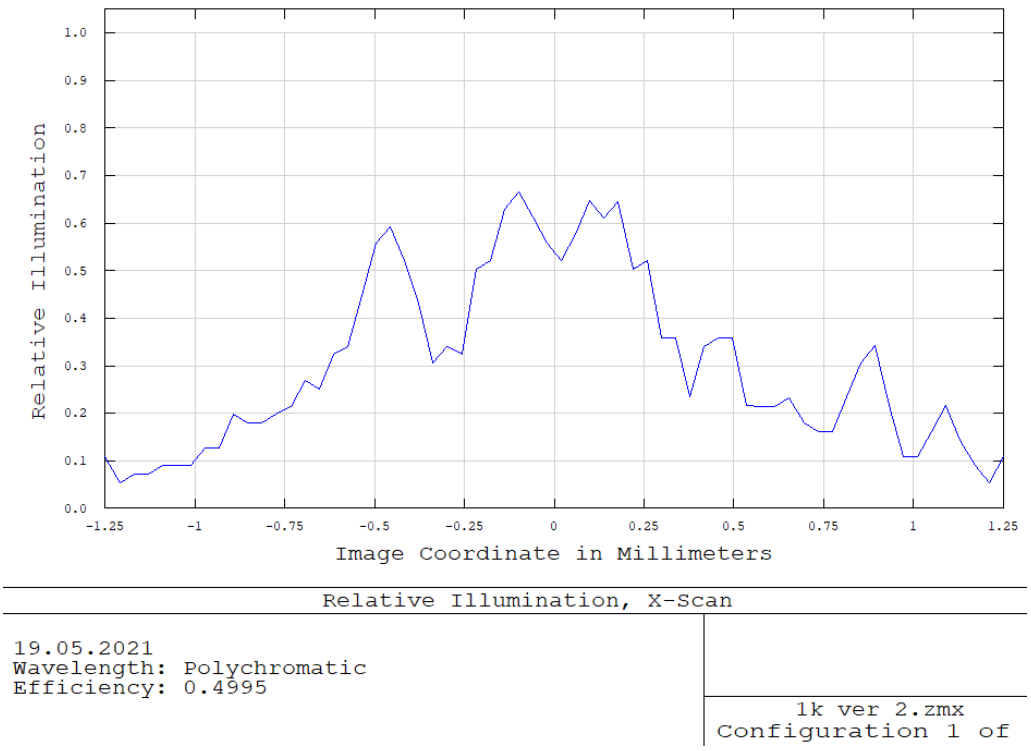

Рис. 2.8. Графік фокусування випромінювання на приймачі першого каналу оптичної системи

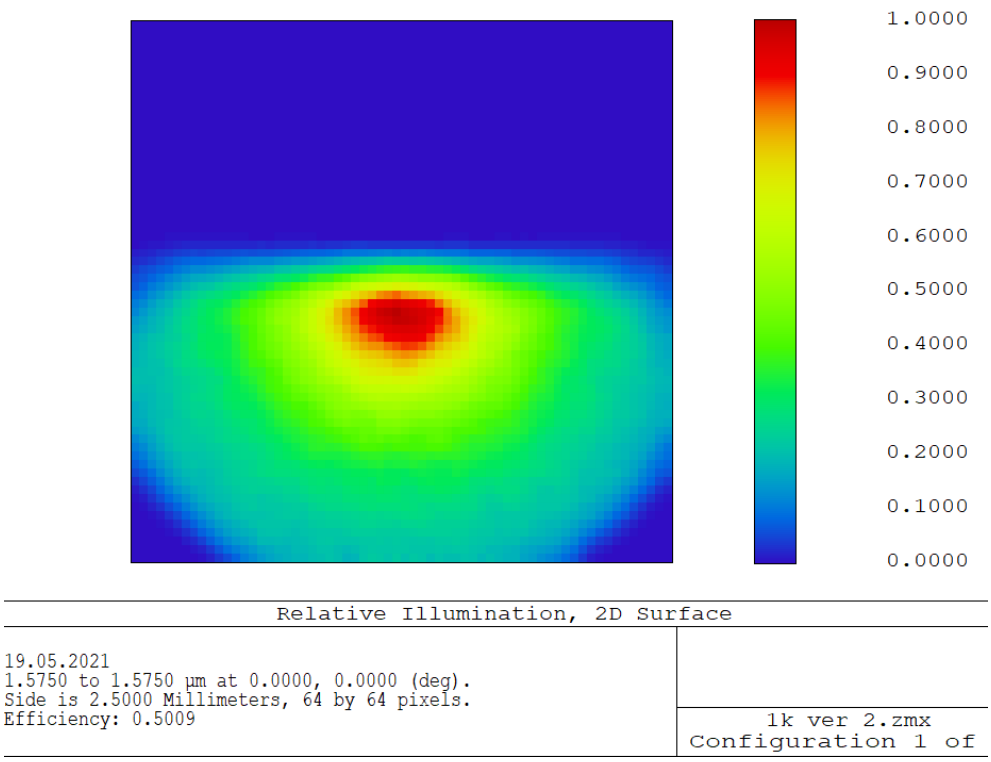

Рис. 2.9. Двомірна діаграма рівня концентрації випромінювання першого каналу оптичної системи

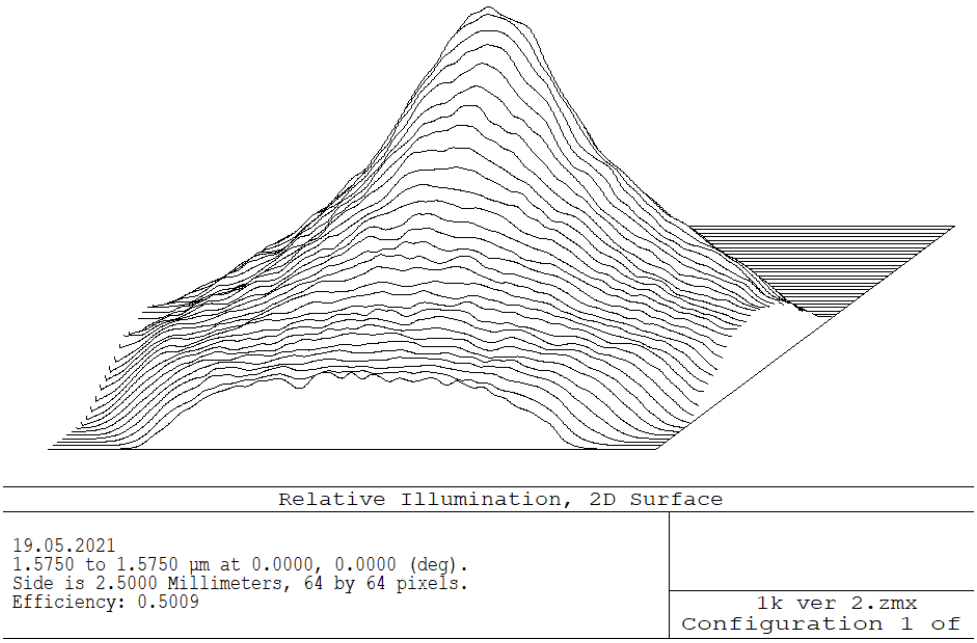

Рис. 2.10. Тривимірна діаграма рівня концентрації випромінювання першого каналу оптичної системи

Знизу кожного графіка показано значення ефективності концентрації випромінювання («Efficiency») для розміру приймальної площадки, яке становить 2,5 мм. Як бачимо, рівень ефективності даного оптичного каналу становить 50%, що якраз є половиною вхідного об’єкту пучка теплового випромінювання.

У тому числі для отримання характеристик оптичної системи використовуємо функцію «Sys» (рис. 2.11.). За даною таблицею можемо побачити наступну інформацію: задня фокусна відстань системи становить 59,89 мм, загальна довжина системи, тобто відстань від першої оптичної поверхні системи до площини зображення, становить 47,18 мм.

```
GENERAL LENS DATA:

Surfaces                  :                9
Stop                      :                1
System Aperture           : Entrance Pupil Diameter = 14
Glass Catalogs            : SCHOTT INFRARED
Ray Aiming                : Off
Apodization               : Uniform, factor =   0.00000E+000
Temperature (C)           :    2.00000E+001
Pressure (ATM)            :    1.00000E+000
Adjust Index Data To Environment  : Off
Effective Focal Length    :        59.89029 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length    :        59.89029 (in image space)
Back Focal Length         :        22.92673
Total Track               :           47.18
Image Space F/#           :        4.277878
Paraxial Working F/#      :        4.277878
Working F/#               :        3.860683
Image Space NA            :       0.1160901
Object Space NA           :          7e-010
Stop Radius               :               7
Paraxial Image Height     :       0.2926815
Paraxial Magnification    :               0
Entrance Pupil Diameter   :              14
Entrance Pupil Position   :               0
Exit Pupil Diameter       :        14.86965
Exit Pupil Position       :        -70.2638
Field Type                : Angle in degrees
Maximum Radial Field      :            0.28
Primary Wavelength        :           1.575 µm
Lens Units                :   Millimeters
Angular Magnification     :       0.9415154

Fields          : 2
Field Type                : Angle in degrees
 #        X-Value        Y-Value         Weight
 1       0.000000       0.000000       1.000000
 2       0.000000       0.280000       1.000000

Vignetting Factors
 #       VDX       VDY       VCX       VCY       VAN
 1  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000
 2  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000
```

Рис. 2.11. Загальні характеристики першого каналу оптичної системи

Для побудови другого оптичного каналу до таблиці конструктивних параметрів було задано наступні значення (див. рис. 2.12.):

Surf:Type		Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter		Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity		0.000
STO	Standard		Infinity	5.000		7.000		0.000
2	Standard		17.000	1.500	ALON	7.032		0.000
3	Standard		26.000	15.000		6.861		0.000
4#	Standard		Infinity	-12.000	MIRROR	5.200	U	0.000
5#	Standard		Infinity	7.000	MIRROR	3.600	U	0.000
6#	Standard		Infinity	1.000	CALCITE	2.500	U	0.000
7*	Standard		Infinity	19.580		2.500	U	0.000
8#	Standard		Infinity	6.740		0.292		0.000
IMA	Standard		Infinity	-		1.200		0.000

Рис. 2.12. Конструктивні параметри другого каналу оптичної системи мультиспектрального пірометра

В результаті проектування отримали другий канал оптичної системи, що працює аналогічно першому, на вигляд є дзеркальним відносно першого

каналу та складається з лінзи об’єктива (1), другої дзеркальної сторони призми (5), дзеркала (6), фільтру (7), приймача випромінювання (8) (див. рис. 2.3.).

Зовнішній вигляд спроектованого другого оптичного каналу системи безконтактного приладу вимірювання температури у вигляді пустотілого тривимірного зображення представлений на рис. 2.13. та тіньова модель на рис. 2.14.

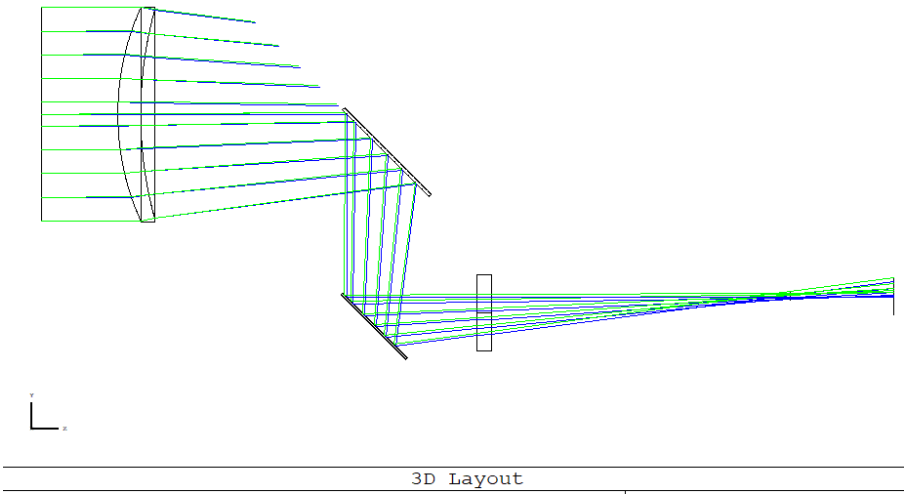

Рис. 2.13. Тривимірне пустотіле зображення другого каналу оптичної системи

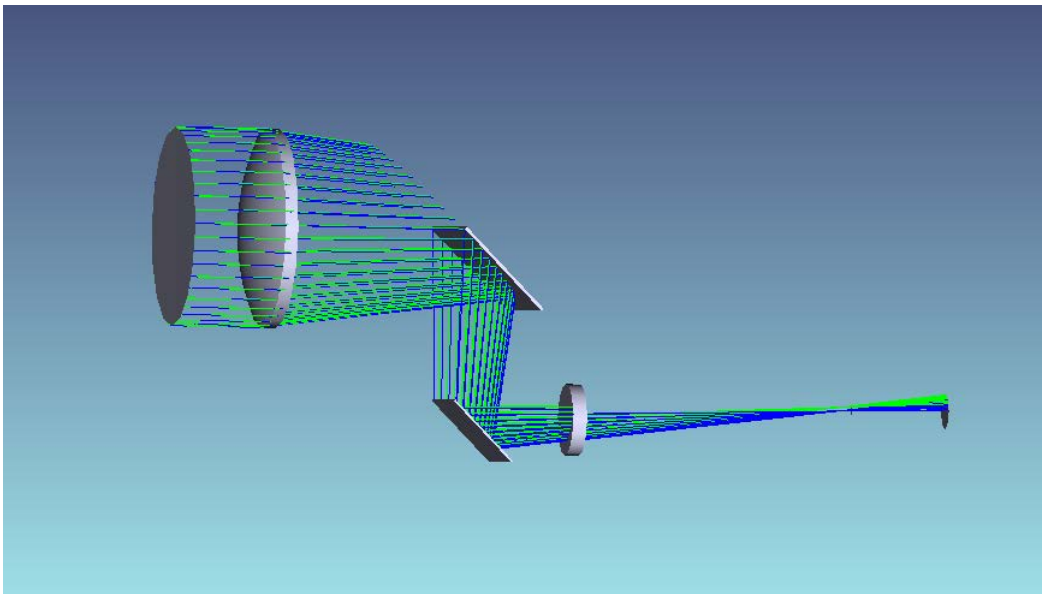

Рис. 2.14. Тіньова модель другого каналу оптичної системи

Другий оптичний канал має робочу довжину хвилі 940 нм. Графік пропускання встановленого фільтру показано на рис. 2.15.

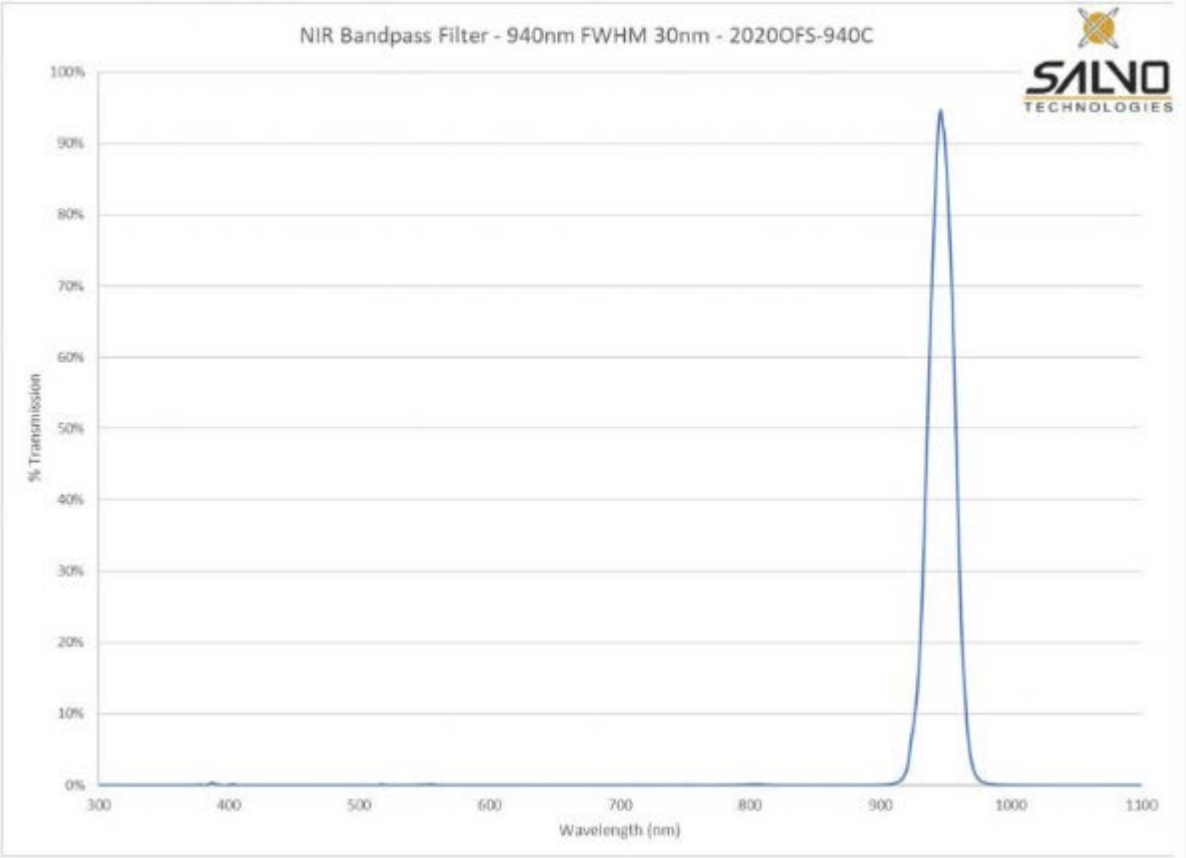

Рис. 2.15. Графік пропускання фільтру другого каналу

Згідно з рис. 2.12. світовий радіус, який знаходиться на відстані 6,740 мм від останньої оптичної поверхні системи складає 1,2 мм. Помноживши дане число на два отримаємо повний діаметр світлового пучка в площині зображення, який складає 2,4 мм. Розмір чутливої площадки вибраного приймача випромінювання S2386-5K для другого каналу розроблюваної системи точно відповідає даному розміру. Спектральний діапазон даного фотодіоду відповідає довжинам хвиль від 0,32 мкм до 1,1 мкм. Фільтр, що стоїть перед даним приймачем працює на довжині хвилі, де чутливість приймача максимальна (див. рис. 2.15.). Графік чутливості фотодіоду в залежності від довжини хвилі показано на рис. 2.16.

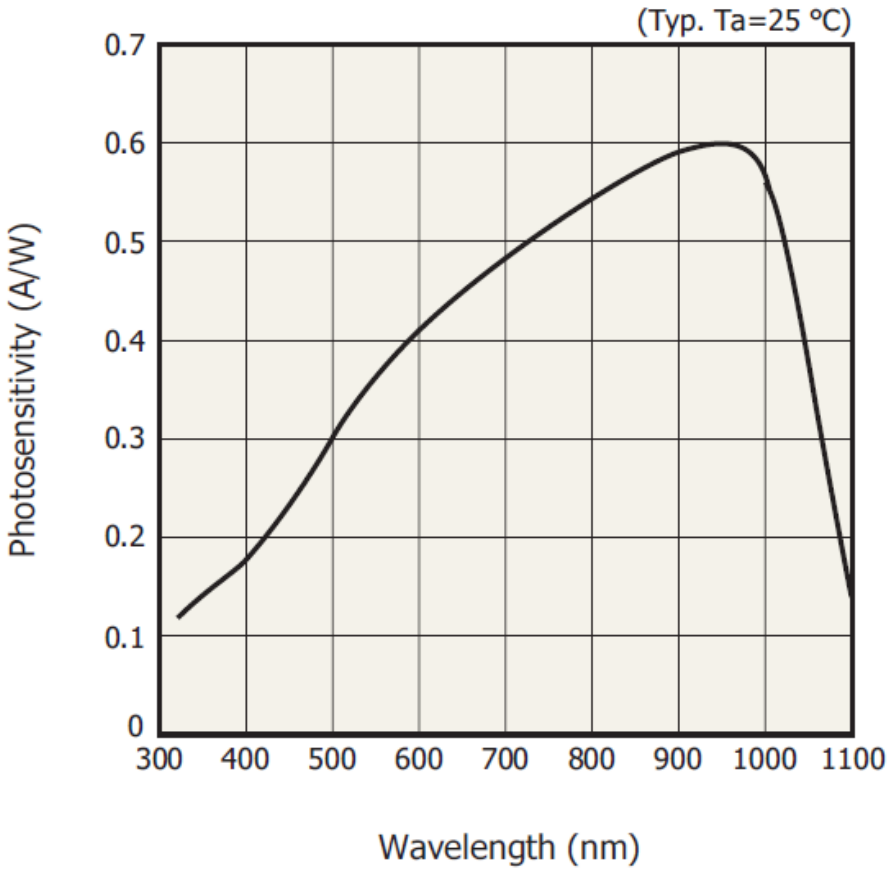

Рис.2.16. Графік чутливості фотодіоду S2386-5K в залежності від довжини хвилі

Згідно закону Планка (графічно представленого на рис. 1.3) і робочим довжинам хвиль оптичних каналів мінімальна температура, що буде реєструватись приладом становить 350°C. Максимальне значення температури, що буде реєструватись пірометром до того, як він надішле на дисплей повідомлення ERROR, що станеться при повному засвічені фотоприймачів, це відбудеться коли світовий потік на їх чутливому майданчику набуде значення, при якому електричний сигнал на виході буде максимально можливим, становить приблизно 2500°C.

Виходячи з діапазону реєстрованих розробленим пірометром температур даний прилад можна буде застосовувати на ливарному виробництві, для формування, зварювання, безперервному литті та термічній обробці металів та гарячій штамповці. Для контролю температури в

індукційних та електронно-променевих системах нагріву, при вакуумному плавленні, склоплавильних печах та термічній обробці напівпровідникових пластин. Як бачимо, високотемпературний короткохвильовий пірометр використовують для безконтактного вимірювання температури для багатьох задач на підприємствах та фабриках.

Використовуючи функцію «Illumination XY Scan» проведено оцінку залежності рівня концентрації випромінювання від розміру ділянки приймача в площині зображення, на яку падає теплове випромінювання досліджуваного об’єкта (див. рис. 2.17.). Використовуючи функцю «Illumination 2D Surface» побудуємо зображення двомірної площини рівня концентрації випромінювання, що має колірну індикацію (див. рис. 2.18.) або тривимірного графіку (див. рис. 2.19.).

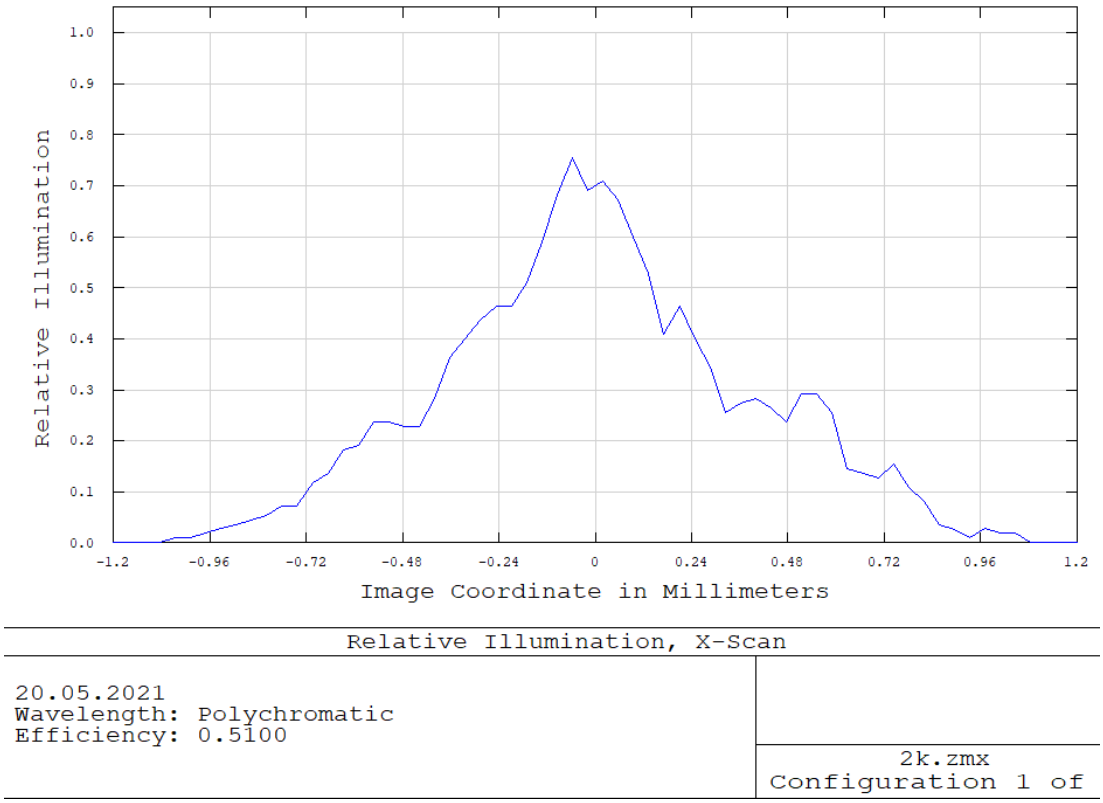

Рис. 2.17. Графік фокусування випромінювання на приймачі другого каналу оптичної системи

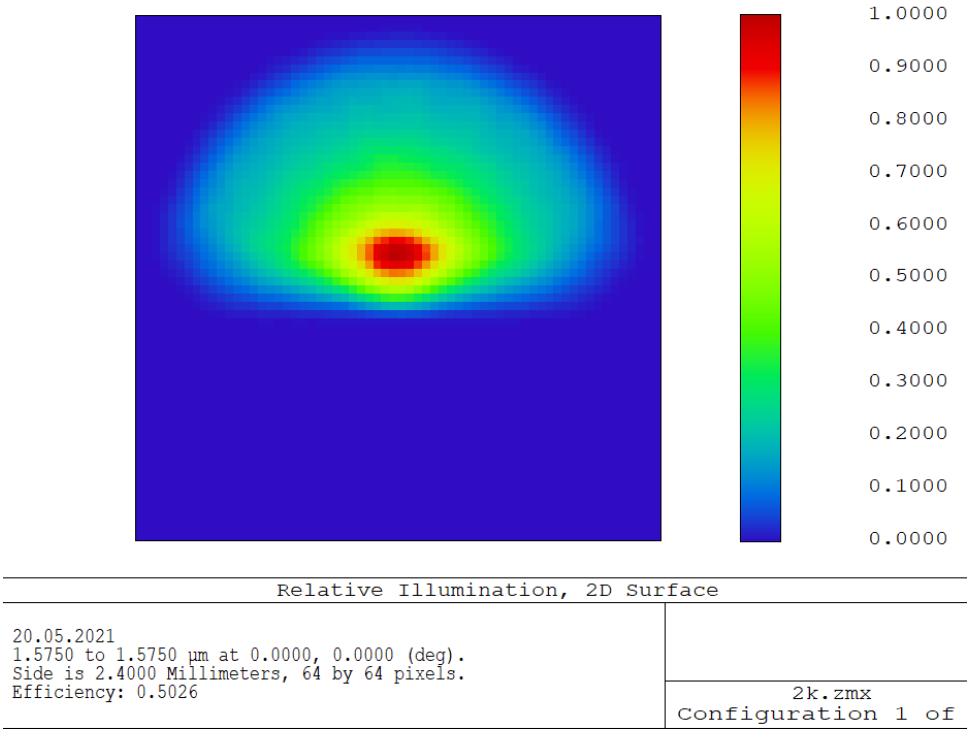

Рис. 2.18. Двомірна діаграма рівня концентрації випромінювання другого каналу оптичної системи

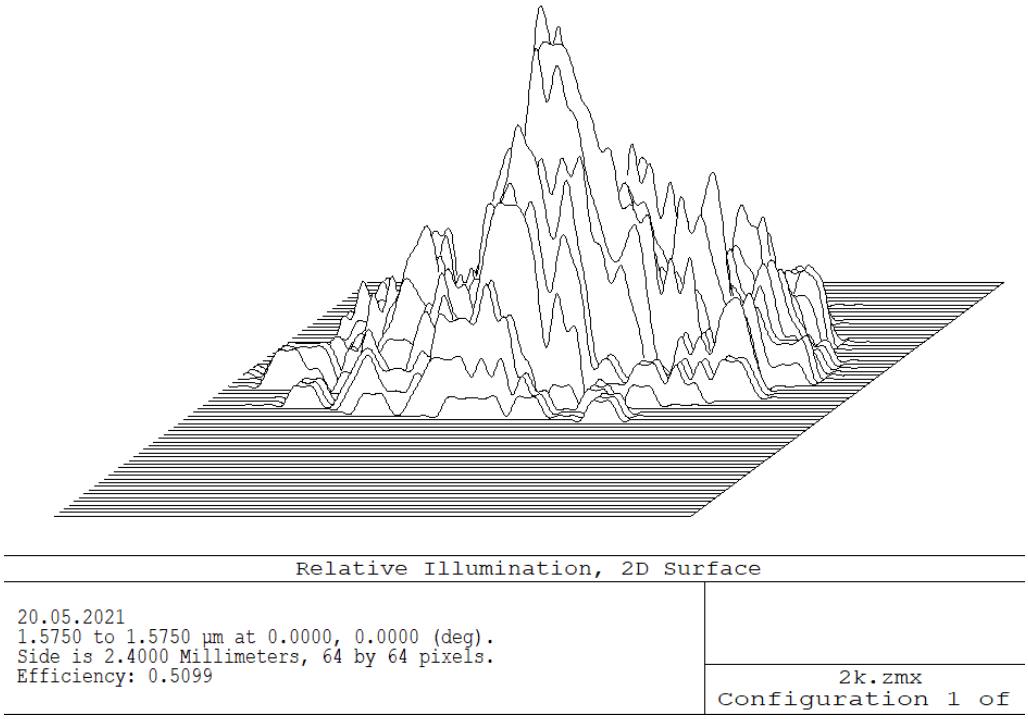

Рис. 2.19. Тривимірна діаграма рівня концентрації випромінювання другого каналу оптичної системи

Знизу кожного графіка показано значення ефективності концентрації випромінювання («Efficiency») для розміру приймальної площадки, який становить 2,4 мм. Як видно, рівень ефективності даного оптичного каналу складає 50%, що якраз становить половину розміру вхідного пучка теплового випромінювання від об’єкту контролю. Як вже розглядалось, даний параметр для першого каналу також складає 50%, отже ефективність концентрації випромінювання всієї системи складає 100%.

Також для отримання характеристик оптичної системи використовуємо функцію «Sys» (рис. 2.20.). За даною таблицею можемо побачити наступну інформацію: задня фокусна відстань системи складає 59,89 мм, загальна довжина системи, тобто відстань від першої оптичної поверхні системи до площини зображення, становить 43,82 мм.

```
GENERAL LENS DATA:

Surfaces                  :                 9
Stop                      :                 1
System Aperture           : Entrance Pupil Diameter = 14
Glass Catalogs            : SCHOTT INFRARED
Ray Aiming                : Off
Apodization               : Uniform, factor =   0.00000E+000
Temperature (C)           :    2.00000E+001
Pressure (ATM)            :    1.00000E+000
Adjust Index Data To Environment  : Off
Effective Focal Length    :        59.89029 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length    :        59.89029 (in image space)
Back Focal Length         :        22.98796
Total Track               :           43.82
Image Space F/#           :        4.277878
Paraxial Working F/#      :        4.277878
Working F/#               :        3.860683
Image Space NA            :       0.1160901
Object Space NA           :          7e-010
Stop Radius               :               7
Paraxial Image Height     :       0.2926815
Paraxial Magnification    :               0
Entrance Pupil Diameter   :              14
Entrance Pupil Position   :               0
Exit Pupil Diameter       :        14.86965
Exit Pupil Position       :       -66.94257
Field Type                : Angle in degrees
Maximum Radial Field      :            0.28
Primary Wavelength        :           1.575 µm
Lens Units                :   Millimeters
Angular Magnification     :       0.9415154

Fields          : 2
Field Type                : Angle in degrees
 #        X-Value         Y-Value         Weight
 1       0.000000        0.000000        1.000000
 2       0.000000        0.280000        1.000000

Vignetting Factors
 #       VDX       VDY       VCX       VCY       VAN
 1  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000
 2  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000
```

Рис. 2.20. Загальні характеристики другого каналу оптичної системи

В даній двоканальній оптичній системі маємо три діафрагми. Одна з них апертурна (АД), яка завжди є присутньою в оптичних системах та обмежує розміри осьового пучка променів випромінювання. Розмір АД складає 14 мм. Другою та третьою діафрагмами є польові, вона розташовані у першому та другому каналах системи відповідно, між фільтром і площиною зображення та обмежують поле зору оптичної системи.

Для отриманої двоканальної оптичної системи кут поля зору становить $2\omega = 0{,}58°$. При задані в Zemax кута ω більше ніж $0{,}29°$, польові діафрагми будуть зрізати пучок променів і він не потрапить на приймач. Проведемо розрахунок оптичної роздільної здатністі пірометра (рис. 2.21.).

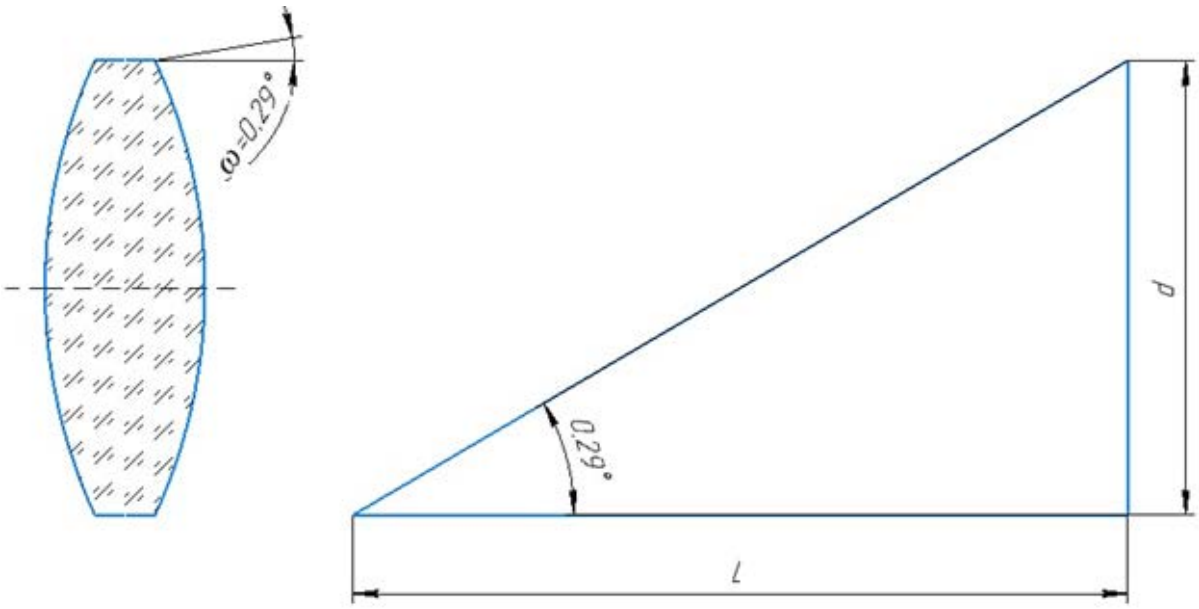

Рис. 2.21. Розрахунок оптичної роздільної здатності мультиспектрального пірометра: L – відстань від об’єкта; d – половина випромінюючої площадки (2d = S, де S – розмір площадки)

Виходячи зі співвідношення сторін і кутів трикутника з прямим кутом отримаємо:

$$d = L \cdot tg(0{,}29°) \Rightarrow tg(0{,}29°) \approx 0{,}005 \Rightarrow d = 00{,}05L \Rightarrow 2d = 0{,}01L = S \Rightarrow$$

$$\frac{L}{S} = \frac{1}{0{,}01} = 100:1$$

З отриманих розрахунків бачимо, що оптична роздільна здатність пірометра становить 100:1. Отже при вимірюванні температури поверхні, розташованій від приладу на відстані 1 м (100см), розмір площадки об'єкта, з якої буде реєструватися температура, рівний 100 см / 100 = 1 см.

2.3. Аналітичний розрахунок шуму на виході фотоприймача

Як вже зазначалось в попередньому розділі, для даної схеми, а саме для першого каналу оптичної системи приладу використовується приймач випромінювання G8931-04. До основних видів шумів відносять радіаційний, струмовий, тепловий та дробовий. Загальний шум визначається останніми двома. Це зумовлено тим, що радіаційний шум має невеликий вклад у загальний шум, а струмовий представляє собою великий внесок тільки в ситуаціях коли є на низьких частотах. Отже, середньоквадратичне значення теплового й дробового шумів обчислюється за наступними формулами:

- тепловий шум:

$$I_T^2 = 4 \cdot k \cdot T_{\text{п}} \cdot \Delta f \cdot \frac{1}{R} \tag{2.1}$$

- дробовий шум:

$$I_{\text{др}}^2 = 2 \cdot e \cdot I \cdot \Delta f \tag{2.2}$$

де: k = 1,38 * 10^{-23} Дж/К – стала Больцмана;

$T_{\text{п}}$ – температура приймача;

Δf – сума частот;

R – активний опір приймача;

e = 1,6 * 10^{-19} – заряд електрона;

I – темновий струм приймача.

Загальне середньоквадратичне значення шуму приймача системи обчислюється за наступною формулою:

$$I_{ш}^2 = I_T^2 + I_{др}^2 = 2 \cdot e \cdot I \cdot \Delta f + 4 \cdot k \cdot T_п \cdot \Delta f \cdot \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

Опромінення, що створюється площадкою досліджуваного об’єкта, на вхідній зіниці об’єктива системи обчислюється за наступною формулою:

$$E = \frac{\int_0^\infty \Phi(\lambda)}{A_0} \quad (2.4)$$

де: $\Phi(\lambda)$ - потік, що приходить на вхідну зіницю об'єктива;

A_0 - площа вхідної зіниці об'єктива.

Потік, що приходить на вхідну зіницю об'єктива системи, можна представити у наступному вигляді:

$$\Phi(\lambda) = \Phi^0(\lambda) \cdot \Phi_{\lambda_{max}} \Rightarrow \Phi^0(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_{\lambda_{max}}} \quad (2.5)$$

де: $\Phi^0(\lambda)$ - відносний потік випромінювання;

$\Phi_{\lambda_{max}}$ - максимальний спектральний потік випромінювання.

Вважаючи об’єкт випромінювання Ламбертовим випромінювачем, тобто випромінювачем, яскравість якого постійна та не залежить від напрямку, потік, що приходить на вхідну зіницю об'єктива можна записати наступним чином:

$$\Phi(\lambda) = M(\lambda) \cdot A_1 \quad (2.6)$$

де: $M(\lambda)$ - поверхнева щільність випромінювання;

A_1 - площа випромінювача.

Тоді враз (2.5) можна записати наступним чином:

$$\Phi^0(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_{\lambda_{max}}} = \frac{M(\lambda)\cdot A_1}{M_{\lambda_{max}}\cdot A_1} = \frac{M(\lambda)}{M_{\lambda_{max}}} \quad (2.7)$$

При підстановці формули (2.5) та (2.7) у формулу (2.4), отримаємо:

$$E = \frac{\int_0^\infty \Phi^0(\lambda)\cdot\Phi_{\lambda_{max}}\, d\lambda}{A_0\cdot l^2} = \frac{\int_0^\infty \frac{M(\lambda)}{M_{\lambda_{max}}}\cdot\Phi_{\lambda_{max}}\, d\lambda}{A_0} = \frac{\Phi_{\lambda_{max}}}{A_0\cdot M_{\lambda_{max}}}\cdot\int_0^\infty M(\lambda)d\lambda \quad (2.8)$$

Відомо, що:

$$\int_0^\infty M(\lambda)d\lambda = \sigma\cdot T^4 \quad (2.9)$$

$$M_{\lambda_{max}} = C_з\cdot T^4 \quad (2.10)$$

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

$C_з$= 1,2865*10^{-15} Вт·см^2·мкм$^{-1}$·К$^{-5}$;

T – температура випромінювача;

l – дистанція до випромінювача.

Підставивши формули (2.9), (2.10) у формулу (2.8) ті виразивши звідти максимальний спектральний потік випромінювання $\Phi_{\lambda_{max}}$, отримаємо:

$$\Phi_{\lambda_{max}} = \frac{E\cdot A_0\cdot C_з\cdot T}{\sigma} \quad (2.11)$$

Потік, що надходить на фотоприймач, буде дорівнювати:

$$\Phi_п = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)\cdot\tau_0(\lambda)d\lambda \quad (2.12)$$

де: $\tau_0(\lambda)$ - сумарний коефіцієнт пропускання (атмосфери та оптичного тракту).

Підставивши формули (2.5), (2.7), (2.9), (2.10) та (2.11) у формулу (2.12), отримаємо:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A_0}{\sigma \cdot T^4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) d\lambda \tag{2.13}$$

враховуючи те, що:

$$M(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1\right]}$$

отримаємо:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A_0}{\sigma \cdot T^4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1\right]} \cdot \tau_0(\lambda) d\lambda \tag{2.14}$$

де: C_1, C_2 – константи;

T - температура об'єкта;

E - освітленість, яку створює об'єкт випромінювання;

l – дистанція до об'єкта.

Сигнал на виході фотоприймача, визначається наступним чином:

$$I_C = \Phi_{\text{п}} \cdot S_i \tag{2.15}$$

де: S_i - струмова чутливість фотоприймача.

Відношення сигнал/шум з врахуванням формул (2.14), (2.15) та (2.3) визначається наступним чином:

$$\mu = \frac{I_C}{\sqrt{I_{Ш}^2}} = \frac{\left(\frac{E \cdot A_0}{\sigma \cdot T^4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1\right]} \cdot \tau_0(\lambda) d\lambda\right) \cdot S_i}{\sqrt{2 \cdot e \cdot I \cdot \Delta f + 4 \cdot k \cdot T_П \cdot \Delta f \cdot \frac{1}{R}}} \quad (2.16)$$

Параметри даного приймача випромінювання першого каналу оптичної системи наступні:

- темновий струм I=40 нА;
- температура приймача $T_П$= 25°C;
- смуга частот Δf = 4 ГГц;
- активний опір приймача R=50ГОм;
- інтегральна струмова чутливість S=0,9 А/Вт.

При підстановці даних параметрів у формулу (2.3) отримаємо загальне середньоквадратичне значення шуму приймача:

$$I_{Ш}^2 = 53.04 * 10^{-18} \text{ А}.$$

Звідси значення шуму: $\sqrt{I_{Ш}^2} = 7.28 * 10^{-9}$(А).

Знайдемо мінімальний потік, який необхідний, щоб отримати значення відношення сигнал/шум рівне μ=2.923*10^5 при умові, що весь потік падає на приймач та дистанція до площини досліджуваного об’єкта становить 1000 мм:

$$\Phi_{min} = \frac{\sqrt{I_{Ш}^2}}{S} \cdot \mu \quad (2.17)$$

де μ=2.923*10^3 при відстані до об'єкта 1 м.

Φ=5.579*10^{-2} Вт.

При відстані до об’єкта 150 м маємо:

Φ=9.157*10^{-4} Вт при μ=1.

2.4. Розрахунок кута установки лазерних модулів

Як було зазначено в попередньому розділі при описі функціональної схеми, безконтактний прилад вимірювання температури оснащений системою крос-лазеру для зручного підсвічення площадки поверхні об'єкта контролю, з якої здійснюється зняття температурних значень. Вибрано лазерний модуль Laser Module 5mW 650nm Red. Два лазерні вказівники встановлені з різних сторін від об'єктива. Для розрахунку кута установки лазерів було побудовано прямокутний трикутник ABC (див. рис. 2.22.).

Рис. 2.22. Загальна схема установки крос-лазерної системи

Відрізки BD=AC=30мм, відстань між точками B та C становить 3000мм. Знаючи дві сторони в прямокутному трикутнику можемо знайти значення кута B, яке розраховується наступним чином:

$$\mathrm{tg}(B) = \frac{AC}{BC} = 0.01$$

Звідси отримуємо значення кута B, що становить ~0.573°.

Отже, обидва лазерні модулі слід встановить під кутом 0.573°.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено проектування вузлів мультиспетрального пірометра. А саме розроблено функціональну схему

приладу безконтактного вимірювання температури, розглянуто принцип її роботи, описано переваги в порівняні з класичною схемою та її можливості.

За допомогою середовища Zemax синтезовано оптичні системи двох каналів пірометру, розглянуто принцип роботи оптичного тракту та опис елементів, що входять до нього. Проаналізовано характеристики отриманої системи та приймачів випромінювання, що були обрані для використання в даному пірометрі спектрального відношення. Підібрано фільтри для обох каналів та розглянуто графіки їх пропускання. Визначено робочу довжину хвилі для кожного з двох каналів. Розраховано оптичну роздільну здатність пірометра.

Здійснено аналітичний розрахунок шуму на виході фотоприймача, максимальної робочої дистанції пристрою та розрахунок кута установки лазерних модулів, так щоб промені спочатку перетинались, а потім падали на краї контрольованої площадки поверхні досліджуваного об’єкту під кутом поля зору оптичної системи приладу.

РОЗДІЛ 3. ПІДБІР КОМПЛЕКТУЮЧИХ ДЛЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПІРОМЕТРА

3.1. Апаратно-програмна платформа та мікроконтролер

Для обробки сигналу для розроблювального приладу безконтактного вимірювання температури вибрано Arduino Nano v 3.0. Дана плата відноситься до однієї з найбільш популярних та мініатюрних плат. У версії 3.0. використовується чіп ATmega328P, на якому працює пристрій. Виходячи з економічних міркувань дана платформа має невисоку вартість, що також має значення при виборі того чи іншого приладу.

Загальний зовнішній вигляд платформи Arduino Nano v 3.0 наведено на рис. 3.1.

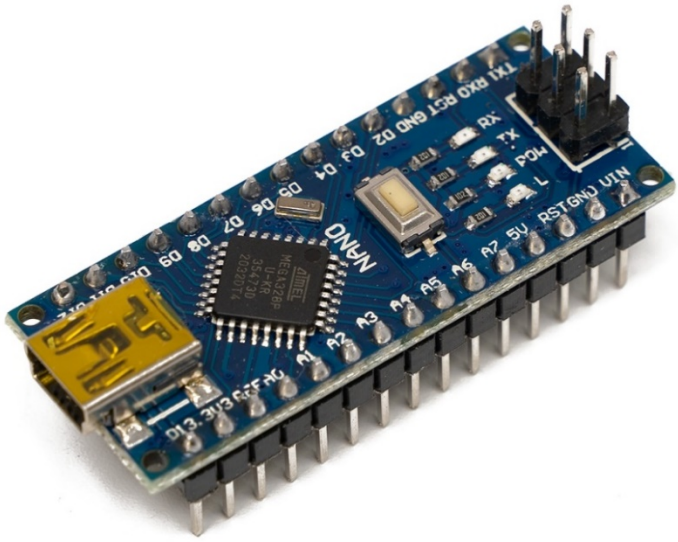

Рис. 3.1. Загальний вигляд платформи Arduino Nano v 3.0

Як вже описувалось вище якості мікроконтролера використовується високопродуктивний контролер ATmega328P. Дана мікросхема відноситься до найбільш популярних серій виробничої лінії AVR, використовуючись у різних областях та добре проявляючи себе. Вона заснована на модернізованому 8-мибітному RISC-процесорі з гарвардською архітектурою,

завдяки чому програми виконуються швидко. Має вбудований 10-тибітний аналого-цифровий перетворювач.

Загальний зовнішній вигляд ATmega328P наведено на рис. 3.2.

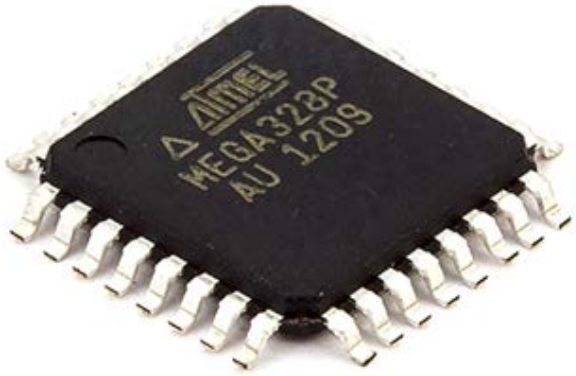

Рис. 3.2. Загальний вигляд мікроконтролера ATmega328P

Даний мікропроцесор має 32 виводи у чотирьохконтактному корпусі TQFP-32. Мікросхема працює в діапазоні від 1,8 до 5,5 вольт. Робоча температура приладу становить від -40°C до +105°C. Включає в себе 32 КБ Flash-пам’яті. Оперативна пам'ять SRAM становить 2 КБ. Енергонезалежна пам'ять EEPROM становить 1 КБ. До комунікаційних інтерфейсів, що можуть використовуватись для програмування контролера відноситься інтерфейс SPI Master / Slave, I2C та послідовний інтерфейс USART.

Більш докладно технічні характеристики розглянутого мікропроцесора ATmega328P представлено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Технічні характеристики мікропроцесора ATmega328P

Характеристики	Параметри
1	2
Корпус	TQFP-32
Ядро	AVR
Робоча напруга	1,8 … 5,5 В
Струм споживання	40мА

1	2
Продуктивність	0-4 МГц при 1,8 В до 5,5 В 0-10 МГц при 2,7 В до 5,5 В 0-20 МГц при 4,5 В до 5,5 В
Об'єм пам'яті програм	32 КБ
Тип пам'яті програм	Flash
Об'єм EEPROM пам'яті	1КБ
Об'єм оперативної пам'яті	2КБ
Кількість контактів	32
Максимальна робоча частота	20МГц
Кількість сенсорних каналів	16
Максимальна кількість контактів введення / виведення	23
Роздільна здатність АЦП	10 біт
Кількість каналів АЦП	8
Канали ШІМ	6
Тип інтерфейсу	SPI, I2C, USART
Таймери	2 x 8 біт, 1 x 16 біт
Робоча температура	-40°C … +105°C.

Технічні характеристики платформи Arduino Nano v 3.0 представлено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Технічні характеристики платформи Arduino Nano v 3.0

Характеристики	Параметри
Мікроконтролер	ATmega328P
Робоча напруга	5 В
Сила струму	40 мА
Вхідна напруга	7-12 В
Кількість цифрових входів / виходів	14
ШІМ піни	6
Пам'ять типу Flash	32 кБ
SRAM	2 кБ
EEPROM	1 кБ
Частота	16 МГц
Габаритні розміри	45 мм x 18 мм
Вага	7 г

3.2. Дисплей

Для виводу виміряних температурних даних вибрано сучасний OLED-дисплей з розширенням 128 x 64 (0.96 дюйма). Для підключення та роботи з даним модулем використовується інтерфейс I2C. В порівнянні з LCD дисплеєм, який також може бути використаний для приладів безконтактного вимірювання температури, OLED не потребує допоміжного підсвічення, так як світлодіоди самі випромінюють власне підсвічування, за рахунок чого зменшується енергоспоживання.

Загальний зовнішній вигляд OLED-дисплея наведено на рис. 3.3.

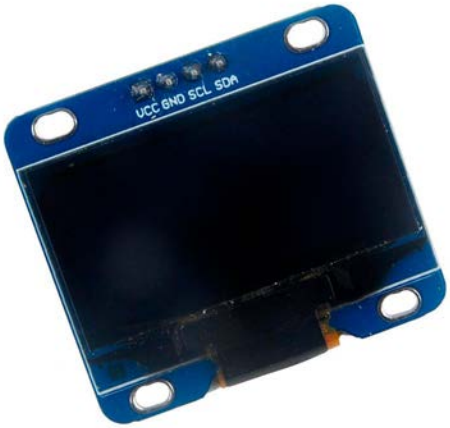

Рис. 3.3. Загальний вигляд OLED-дисплея

Даний дисплей має насичену контрастність, що навіть при великій яскравості освітленості є можливість зчитувати відображені дані. Невеликі габарити дозволяють зручно використовувати прилад для пристроїв невеликих розмірів та обумовлює його популярність. Такий прилад, що відображає дані має широкий кут огляду, значення якого становить 160° та високу межу робочої температури, що відповідає 70°C. Для взаємодії використовується схема контролера SSD1306. Ще одною перевагою, що дає можливість зробити вибір на користь даного дисплею, є економічна складова, адже вартість за такий прилад є невеликою [22, 23].

Більш докладно технічні характеристики OLED-дисплея представлено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Технічні характеристики OLED-дисплея

Характеристики	Параметри
Формат відображення	128 x 64 пікселів
Інтерфейс	I2C
Кут огляду	>160°
Розмір діагоналі	0.96 дюйма
Колір	монохромний (біле на чорному)
З'єднання	FPC-пайка
Розмір пікселя	0,154 x 0,154 мм
Шаг пікселей	0,17 x 0,17 мм
Яскравість	120 кд/м^2
Коефіцієнт контрастності	2000:1
Напруга живлення	3 … 5 В
Драйвер	SSD1306
Енергоспоживання (при повному світінні екрана)	0,08 Вт
Габаритні розміри	ширина: 27 мм висота: 27 мм товщина: 11 мм
Вага	4 г
Робоча температура	-30°С … +80°С

3.3. Bluetooth-модуль

Для можливості проведення бездротового обміну даними з інформаційною технікою було обрано Bluetooth-модуль HM-10. Даний модуль створений на основі мікросхеми CC2541F128RHAT компанії Texas Instruments. За рахунок наявності інтерфейсу I2C є змогу підключатись до датчиків різного типу.

Загальний зовнішній вигляд вибраного Bluetooth-модуля HM-10 наведено на рис. 3.4.

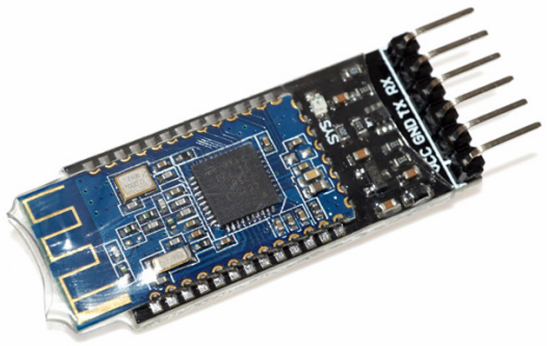

Рис. 3.4. Загальний вигляд Bluetooth-модуля HM-10

Більш докладно технічні характеристики Bluetooth-модуля HM-10 представлено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Технічні характеристики Bluetooth-модуля HM-10

Характеристики	Параметри
Bluetooth-протокол	Bluetooth V4.0 BLE
Використовувана мікросхема	CC2541
Робоча частота	2,4 ГГц
Напруга живлення	3,3 … 5 В
Споживаний струм при підключені	до 40 мА
Споживаний струм при передачі даних	0,2 … 8 мА
Потужність передатчика	0 дБм
Чутливість приймача	-94 дБм
Профілі	SMP, GAP, L2CAP, GATT
Дальність зв’язку	до 10 м
Швидкість передачі даних	1 Мбіт/с
Габаритні розміри	27 мм х 13 мм х 2,2 мм
Вага	4 г
Робоча температура	-40°С … +90°С

3.4. Плата зарядки

В якості плати зарядки для розроблювального пірометра спектрального відношення було обрано модуль Powerbank на базі мікросхеми HT4928S. Даний прилад має низьку ціну та малі габарити, високу ефективність. Модуль містить індикатор заряду червоного кольору, котрій блимає поки відбувається зарядка й світиться у випадку повної зарядки. Має захист від перенагріву та коротких замикань.

Загальний зовнішній вигляд обраного модуля зарядки наведено на рис. 3.5.

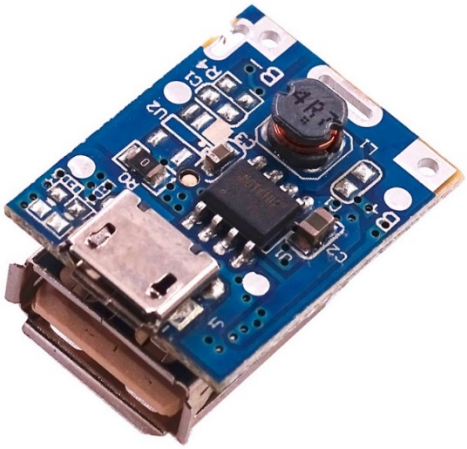

Рис. 3.5. Загальний вигляд модуля зарядки на базі мікросхеми HT4928S

Більш докладно технічні характеристики модуля зарядки представлено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Технічні характеристики модуля зарядки на базі мікросхеми HT4928S

Характеристики	Параметри
1	2
Напруга живлення	3,7 – 4,2 В
Вихідна напруга	5 В
Максимальний струм виходу	0,8 А

1	2
Ефективність при розряді	85%
Максимальний струм в режимі очікування	8 мкА
Габаритні розміри	21 мм х 17 мм х 11 мм
Вага	4 г

3.5. Датчик дотику

Для здійснення управління роботою приладу безконтактного вимірювання температури вибрано датчик дотику TTP223. Даний модуль замінює звичайні кнопки, управління відбувається звичайним доторканням. У модуля малі габарити й низьку вартість.

Загальний зовнішній вигляд датчика дотику TTP223 на рис. 3.6.

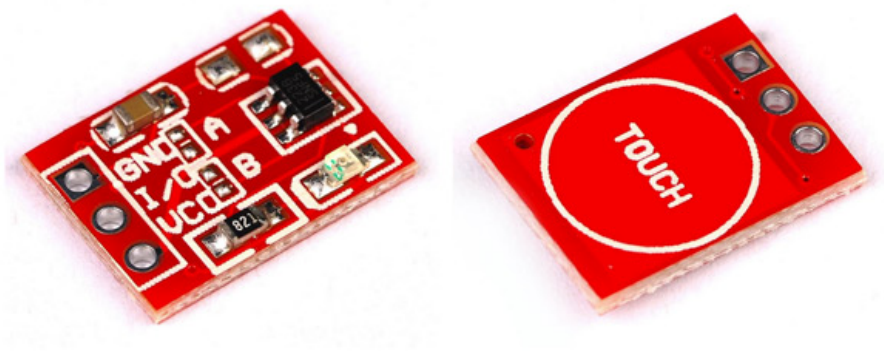

Рис. 3.6. Загальний вигляд датчика дотику TTP223

Більш докладно технічні характеристики датчика дотику представлено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Технічні характеристики датчика дотику TTP223

Характеристики	Параметри
1	2
Напруга живлення	2 – 5,5 В
Вихідна напруга	5 В
Час відгуку	220 мс

1	2
Відстань спрацювання датчику	до 3 мм
Час відгуку (при активному режимі)	60 мс
Габаритні розміри	24 мм х 24 мм
Вага	3 г

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було підібрано комплектуючі для розроблювального мультиспектрального пірометра. А саме було вибрано апаратно-програмну платформу, таку як Arduino Nano версії 3.0, яка є дуже простою в програмуванні, недорогою та дозволяє виконувати велику кількість різних операцій. Підібрано OLED-дисплей та Bluetooth-модуль. З урахуванням того, що для розроблювального приладу було зроблено вибір використовувати акумулятора з зарядною платою, яку було підібрано в даному розділі, відпадає необхідність купувати змінні елементи живлення, такі як батарейки, тобто це зменшить витрати при експлуатації приладу. З екологічної точки зору також даний варіант є кращим, адже акумулятор є неодноразовим пристроєм, тобто його можна заряджати. Обраний датчик дотику є значно зручнішим у використанні в порівняні зі звичайними механічними кнопками. Розглянуто основні технічні характеристики кожного з електронних компонентів, їх особливості та зовнішній вигляд.

Усі підібрані компоненти мають сучасні характеристики, невеликі габаритні розміри й вагу, що є необхідним для конструювання компактного приладу безконтактного вимірювання температурних значень. Виходячи економічної складової вартість усіх вибраних елементів є невеликою, що також є перевагою.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проекту, а саме у першому розділі розглядались засоби та методи, що застосовують для контролю температурних показників досліджуваних об’єктів. Було розглянуто переваги безконтактного вимірювання температури. Це дало можливість зробити вибір на користь саме цього методу, а саме шляхом використання таких приладів як пірометри. Розглянуто фізичні основи пірометричних вимірювань та сфери застосування даних приладів. Проведено класифікацію пірометрів за різними критеріями, один з них, а саме характеристика за принципом дії, був проаналізований більш детально, що допомогло обрати для подальшої розробки саме пірометр спектрального відношення. Для даного типу інфрачервоних термометрів на результати вимірювання ніякого впливу не має дистанція до контрольованої поверхні об’єкта за умови, що хоча б частина випромінювання потрапляє на фотоприймачі, та перешкоди в повітрі у вигляді пилу, диму та ін. Це зумовлено тим, що результати вимірювання отримуються шляхом порівняння сигналів двох різних за робочою довжиною хвиль оптичних каналів.

У другому розділі було проведено проектування функціональної схеми пірометра спектрального відношення. Описано всі складові, що входять до структури пристрою та їх призначення. Розглянуто принцип роботи, переваги запропонованої схеми та її можливості. Було обрано приймачі випромінювання та світлофільтри для оптичної системи та проаналізовано їх характеристики. Також було синтезовано оптичну систему безконтактного приладу визначення температурних значень, яка складається з двох оптичних каналів та описано принцип її роботи. Розглянуто кожен з каналів системи, параметри, що були задані для їх побудови, зовнішній вигляд обох систем та проаналізовано отримані характеристики. Крім цього було проведено розрахунки оптичної роздільної здатності мультиспектрального пірометра, розрахунок шуму на виході фотоприймача та кута установки лазерних

модулів. Для розроблюваного приладу була обрана система крос-лазерів, так як вона є самою ефективною для підсвічування об’єкта контролю. Адже, при використанні та установці тільки одного лазеру, його точка не потрапляє саме у центр поля зору пірометра, це зумовлено тим що просторова вісь об’єктива та лазерного модуля зміщені, тобто між ними є відстань, хоч навіть й маленька, що створює певні незручності. На відмінку від одного лазеру, система крос-лазерів завжди буде підсвічувати двома точками краї площадки поверхні, з якої проводиться зчитування температурних значень, що робить прилад зручнішим для використання користувачем.

У третьому розділі було проведено вибір електронних компонентів для розроблювального пірометра. Досліджено технічні характеристики кожного з вибраних компонентів та розглянуто їх зовнішній вигляд, проаналізовано їх переваги, що дало можливість зробити вибір саме на користь даних комплектуючих.

У результаті проведеної роботи розроблено сучасний, ефективний, з гарною точністю визначення температурних показників, компактний та недорогий мультиспектральний пірометр відносно простої конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Наконечна А. В. Аналіз методів пірометрії та актуальність їх застосування / А. В. Наконечна // Ефективність та автоматизація інжинерих рішень у приладобудуванні. – 2020. – С. 218–221.

2. 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. Муравьёв, А.С. Томашук // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій (матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції), 2019. – С. 169-171.

3. Неделько А.Ю. Преимущества и недостатки бесконтактного измерения температуры [Текст] / А.Ю. Неделько // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – N 7. – С. 29-30.

4. Поскачей А.А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 246 с.

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

6. Скорик Б.И. К вопросу применения бесконтактных методов измерения температуры нагретых тел / Б.И. Скорик, А.В. Гейко // Системи оброб. інформації. – 2007. – Вип. 9. – С. 129-132.

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

8. Живкович, А. В. Современные технологии бесконтактного измерения температуры / А. В. Живкович, А. В. Муравьёв // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных

исследований - 2020», 07-15 июля 2020, Пшемысль, Польша. – Przemyśl : Nauka i studia, 2020. – Vol. 7. – С. 110-115.

9. Povshenko, O. Portable Ultrasound Flaw Detector / O. Povshenko, V. Petryk, A. Protasov // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі : матеріали 2-ої науково-технічної конференції, Польща, м. Люблін, 15-19 жовтня 2018 року. – Люблін, Польща, 2018. – С. 34-36.

10. 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.

11. Протасов А.Г. Многоканальный стенд для контроля температуры / А.Г. Протасов // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, 2015. – № 49(1) . – С. 61-68.

12. Protasov A. Application of FEMLAB Software for Simulation of the Thermal Method for Nondestructive Testing. / A. Protasov //American Society for Engineering Education. Annual conference and Exposition. Austin, Texas, USA. June 14-17 2009, pp. 182-191.

13. Фрунзе А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения / А.В. Фрунзе // Фотоника, 2009. – № 4 – С.32-37.

14. Наконечна А. В. Автоматизований пірометричний контроль температури на ливарно-прокатному виробництві / А. В. Наконечна // Ефективність та автоматизація інжинерих рішень у приладобудуванні. – 2020. – С. 222–224.

15. Наконечная, А. В. Автоматизированные системы пирометрического контроля на литейно-прокатном производстве / А. В. Наконечная, А. В. Муравьёв // 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.

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

17. Безымянный Ю.Г., Богдан Г.А., Колесников А.Н. и др. Использование ультразвука при отработке технологии получения порошкового материала // КОНСОНАНС-2011. Акустический симпозиум – 2011– С. 28-33.

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

19. Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.

20. Муравьёв А.В. Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники / А.В. Муравьёв // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі: матеріали 2-гої науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Польща, Люблін, 2018. – С. 10-11.

21. Petryk V.F. Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices / V.F. Petryk, A.G. Protasov, R.M. Galagan, A.V. Muraviov, I.I. Lysenko // Приборы и методы измерений, 2020. – Т. 11, № 4. – С. 272-278.

22. Муравьёв А. В. Перспективы применения нанотехнологий в микроэлектронике при производстве дисплеев / А. В. Муравьёв // Приборостроение – 2018: материалы 11-й Международной научнотехнической конференции. – Минск, Белоруссия, 2018. – С. 311-313.

23. Протасов, А. Г. Технології теплового неруйнівного контролю / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Технічне завдання

1. Найменування приладу.

„ Мультиспектральний пірометр ”.

2. Мета виконання дипломного проекту та призначення приладу.

Розробка приладу безконтактного вимірювання температури спектрального відношення, що може використовуватись в промисловості.

3. Передумови для розробки приладу.

Розробка даного приладу виконується згідно тематики дипломного проєктування, затвердженої кафедрою приладів і систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

4. Вимоги до технічних характеристик.

Основні параметри:

- Кут поля зору $2\omega = 0{,}58^{o}$;
- Робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda = 940 – 1557$ нм;
- Діапазон вимірюваних температур 350...2500°С.

5. Робочі умови експлуатації приладу.

Номінальне значення кліматичних факторів відповідно до ДСТУ 12.005-88:

- температура навколишнього середовища -10...50°С;
- відносна вологість 65% при температурі навколишнього середовища 20 ± 5°С;
- атмосферний тиск 750±30 мм.рт.ст.

6. Вимоги до конструкції приладу.

Прилад повинен зберігати працездатність та свої параметри відповідно до ДСТУ 17516-72.

6.1. Конструкція приладу повинна забезпечувати зручний доступ до всіх елементів, вузлів та блоків, які потребують замін в процесі експлуатації.

6.2. Прилад повинен мати мінімальну необхідну кількість органів управління, регулювання та керування:

6.2.1. органи багаторазового або частого використання повинні знаходитись на передній панелі керування приладом;

6.2.2. органи, які використовуються для одноразового налагодження приладу або зміна положення яких є небажаною, мають бути розташовані всередині загального корпусу приладу або на задній малодоступній панелі.

6.3. Використані покупні вироби та матеріали, під час випробування приладу повинні мати невикористаний ресурс, термін служби та термін схоронності яких не менше ресурсу й терміну служби приладу.

7. Техніко-економічні вимоги.

7.1. Передбачається виготовлення одного дослідного зразка приладу.

7.2. Орієнтовна ціна дослідного зразка приладу повинна бути розрахована до початку проведення робіт.

8. Вимоги до упаковки.

8.1. Транспортна упаковка повинна забезпечувати збереження приладу при транспортуванні та збереженні.

8.2. Коробку з приладом розміщують в транспортному ящику: простір між стінками ящика і коробки заповнюють пакувальним амортизаційним матеріалом.

9. Стандартизація та уніфікація.

До приладу повинна бути прикладена експлуатаційна документація відповідно ДСТУ 25565-94.

10. Вимоги до техніки безпеки.

10.1. Вимоги до безпеки конструкції, електробезпеки керування та обслуговування приладу повинні відповідати ДСТ 122007-75 та ДСТУ 123019-80.

10.2. Середній час без відмовлень роботи приладу повинен бути не менше 500 год.

11. Строк зберігання, служби та технічний ресурс.

11.1. Прилад повинен витримувати зберігання протягом 3 років.

11.2. Строк служби 5 років.

11.3. Технічний ресурс 1000 год.

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
				Документація		
A1			ПК71.12.03.000 СК	Складальне креслення	1	
				Деталі		
		1		Лінза об'єктиву	1	
		3		Корпус	1	
		4		Дзеркало	2	
		5		Фільтр	2	
		6		Польова діафрагма	2	
		8		Оправа	1	
		9		Кришка	1	
		10		Монтажна пластина	1	
		16		Втулка	4	
		17		Різьбова втулка	4	
		18		Призма	1	
		20		Фіксатор	4	
				Стандартні вироби		
		15		Гвинт М4х10 ГОСТ 17473-	4	15
				Гвинт М3х10 по ГОСТ	3	

Зм.	Лист.	№ докум.	Підп.	Дата	ПК7112.03.000 СК		
Розроб.		Кассиненко А.В.			Мультиспектральний пірометр Специфікація	Літ.	Лист 1 / Листів 2
Пров.		Богдан Г.А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ	
Н.контр.							
Утв.		Муромцев					

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
				Куплені вироби		
		2		Лазерний модуль	2	
		7		Приймач випромінювання	2	
		11		Дисплей	1	
		12		Сенсорна кнопка	2	
		13		Плата зарядки	1	
		14		Акумулятор	1	
		19		Тумблер	1	

Поз.	Найменування	Кіл.	Примітка
	Мікросхеми		
DA1,DA2	TTP223	2	
DA3	HT4926S	1	
DD1	Arduino nano v3	1	
DD2	Bluetooth HM-10	1	
DD4	Display SSD1306	1	
	Фотодіоди		
DD3	G5931-04	1	
DD5	S2386-5K	1	
	Резистори		
R1,R2	120 Ом (121) 0603, ± 6% SMD	2	
R3,R4, R5,R6	10 кОм ± 1% 0.25 Вт	4	
R7,R8	2.2 кОм (222), 0603, ± 5% SMD	2	
R9,R10 ,R11,R	4.7 кОм (472), 0603, ± 5% SMD	4	
	Світлодіоди		
LED1,L ED2,LE	SMD 3528 BIN1, red	3	
LED3	SMD 3528 BIN1, blue	1	
LASER 1,LASE	Laser Module 5mW 650 nm Red	2	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ПК7112.02.000 ЕП		
Розроб.		Нижнична А.В			Мультиспектральний пірометр Специфікація	Літ.	Арк. 1 / Аркушів 2
Перевір.		Бакалов В.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ кафедра ПСНК	
Н.контр.							
Затверд.		Муравйов О.В					

Поз.	Найменування	Кіл.	Примітк.
	Конденсатори		
C1,C2,	SMD конденсатор 0603 0.1 мкФ 50 В X7R 10%	4	
C5	SMD конденсатор 0805 2.2 мкФ 10 В Y5V 20%	1	
C4, C7	SMD конденсатор 0805 1 мкФ 50 В X7R 10%	2	
	Кнопки		
K1,K2	TTP223 TOUCH KEY	2	
K3	Кнопка тактова 6x6x6mm DIP 4pin	1	
K4	SMD кнопка тактова 4x3x3мм 4pin	1	
K5	Тумблер 3-контактний	1	
	Звуковий елемент		
B1	Active buzzer 2 кГц	1	
	Котушки Індуктивності		
L1	SMD Дроссель силовий 4.7 мкГн 3.7A (SR0805-4R7)	1	
	Інше		
G	Акумулятор 18650 Li-Ion LG INR18650 MF1 (LGDAMF11865)	1	
USB-IN	Вхід microUSB	1	
USB-	Вихід USB-type A	1	
JACK	3.5 мм Jack вхід	1	
A1,A2,B1	Перемички	6	

Змн.	Арк.	№докум.	Підп.	Дата	ПК7112.02.000 ЕП	Арк. 2