

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

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«___» _____ 2021 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології неруйнівного контролю і діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Смарт-тепловізор»**

Виконав:

Студент ІV курсу, групи ПК-71

Складчиков Іван Олександрович _____

Керівник:

Доктор філософії

Момот Андрій Сергійович _____

Рецензент: _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломну роботу	2	
2	A4	ДР 71.17.0000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	82	

				ДР ПК71.17.0000.000		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Складчиков І.О.			Відомість дипломної роботи	Лист	Листів
Керівн.	Момот А.С.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71	
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.					

**Пояснювальна записка
до дипломної роботи
на тему: «Смарт-тепловізор»**

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 і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Складчиков Іван Олександрович

1. Тема роботи «Смарт-тепловізор», керівник роботи Момот Андрій Сергійович, доктор філософії, затверджені наказом по університету від «26» травня 2021 р. №1347-с

2. Термін подання студентом роботи 11.06.2021

3. Вихідні дані до роботи: Розробити промисловий бездротовий смарт-тепловізор з передачею даних на сервер.

4. Зміст роботи:

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Підбір та розрахунок вузлів функціональної схеми

3. Програмна частина

4. Експериментальна частина

Висновок

Список використаних джерел

Додатки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням обов'язкових плакатів, презентацій тощо):

Три плакати:

1. Тепловізійний контроль електрообладнання
2. Смарт-тепловізори
3. Конструкція та алгоритм роботи приладу

6. Консультанти розділів роботи*

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

7. Дата видачі завдання 11.03.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання	12.03.2021	
2	Проведення аналітичного огляду	18.04.2020	
3	Розрахунок компонентів	15.05.2021	
4	Створення пристрою	20.05.2021	
5	Оформлення пояснювальної записки	25.05.2020	
6	Розробка плакатів	31.05.2020	

Студент

Іван СКЛАДЧИКОВ

Керівник

Андрій МОМОТ

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

Анотація

На дипломну роботу студента четвертого курсу групи ПК-71 Складчикова Івана з теми: «Смарт-тепловізор».

Дипломна робота складається із пояснювальної записки обсягом 79 сторінки, включає 35 ілюстрацій, 2 таблиці, 25 посилань та 42 формул.

У даній дипломній роботі було розроблено смарт-тепловізор за принципом інтернету речей для використання у виробництві.

У першому розділі дипломної роботи представлено теоретичні відомості теплового контролю. Наведено теоретичні відомості про застосування тепловізорів, їх переваги та недоліки в певних галузях.

У другому розділі приведено вибір елементів для смарт-тепловізора та та обґрунтування їх вибору; розраховано основні параметри датчика та всієї системи смарт-тепловізора.

В третьому розділі описано програмний алгоритм даної системи, розглянуто основні функції програми та в додатках приведено програмний код системи.

В четвертому розділі приведено експериментальну частину. Описано роботу приладу на експериментальних зразках. Проаналізовано переваги та недоліки даного пристрою, та розглянуто перспективи вдосконалення та розвитку даної розробки.

Ключові слова: тепловий контроль, сервер, смарт-тепловізор, датчики, мікроконтролери.

Annotation

On a bachelor's thesis "Smart Thermal Imaging Camera" written by Skladchikov Ivan, a fourth-year student of group PC-71.

Thesis consists of an explanatory note of 82 pages, includes 30 illustrations, 2 tables, 22 literary sources and 39 formulas.

In this thesis, a smart thermal imaging camera was developed on the basis of the IoT principle for use in the production.

The first part of the thesis presents theoretical information concerning thermal control. Theoretical information on the usage of thermal imaging cameras, their advantages and disadvantages in certain areas is also provided.

The second part of the thesis presents a process of identifying elements for the smart thermal imaging camera and a reason of such choice; the basic parameters of a sensor and all system of the smart thermal imaging camera are calculated.

The third part describes a software algorithm of this system. It considers main functions of the program and the appendices contain a program code of the system.

The fourth part presents a part of the pilot. The operation of the device is described on experimental versions. All advantages and disadvantages of the smart thermal imaging camera are analyzed. Prospects for improvement and development of this device are also considered.

Key words: thermal control, server, smart thermal imager, sensors, microcontrollers.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	9
1.1. Інфрачервоний спектр випромінювання	9
1.2. Прилади для тепловізорів	17
1.3. Класифікація тепловізорів	18
1.3.1. Скануючі тепловізори	19
1.3.2. Матричні тепловізори.....	22
1.4. Типи інфрачервоних матричних детекторів	23
1.4.1. Охолоджувальні детектори.....	24
1.4.2. Неохолоджувальні (теплові) детектори.....	25
1.4.3. Типи теплових інфрачервоних детекторів	26
1.4.3.1. Резистивні мікроболометричні детектори	27
1.4.3.2. Піроелектричні та сегнетоелектричні детектори	29
1.4.3.3. Термоелектричні детектори.....	30
1.4.3.4. Мікроболометри діодного типу	31
1.5. Смарт-тепловізор в Індустрії 4.0	33
1.6. Синтез структурної схеми смарт-тепловізора	36
РОЗДІЛ 2. ПІДБІР ТА РОЗРАХУНОК ВУЗЛІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	38
2.1. Вибір інфрачервоного датчика	39
2.2. Вибір мікроконтролера.....	43
2.3. Розрахунок параметрів тепловізора	48

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>							
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Смарт-тепловізор</i>			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Складчиков І.О.</i>								6	79	
<i>Перевір.</i>		<i>Момот А.С.</i>						<i>ПБФ, ПК-71</i>				
<i>Н. Контр.</i>												
<i>Затверд.</i>		<i>Момот А.С.</i>										

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА ЧАСТИНА.....	54
3.1.Написання скетчу для мікроконтролера ESP8266 та датчика AMG8833	55
3.2. Програмний код для отримання та обробки даних на сервері....	60
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	63
4.1.Опис експерименту	63
4.2.Аналіз експериментальних даних	65
4.3.Рекомендації по роботі з приладом.....	68
ВИСНОВОК.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
Додаток А.....	74
Додаток Б	75
Додаток В.....	76
Додаток Г	77
Додаток Д.....	78
Додаток Е	80

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Дослідження сучасного стану рівня розвитку та потреби неруйнівного контролю показали, що визначення та оцінка якості, безпеки, надійності експлуатації великого класу матеріалів, виробів та конструкцій в різних сферах промисловості можливо ефективно проводити аналізом їх температурних полів. Це обумовлено тим, що функціонування багатьох об'єктів пов'язано з температурними навантаженнями, при цьому їх внутрішня структура надає помітний вплив на характер випромінюваного теплового поля, що дозволяє по аналізу його аномалій судити про зміну властивостей матеріалу, його теплотехнічних характеристик в цілому, або його окремих зон.

Температурне поле поверхні об'єкта, використане в тепловому методі контролю, є джерелом інформації про особливості процесу теплопередачі, який, в свою чергу, залежить від конструкції та матеріалу об'єкта, технології його функціонування та наявності дефектів. Під дефектами розуміють невідповідність продукції вимогам нормативно технічної документації, що виявляється у вигляді локального температурного перепаду на поверхні контрольованого об'єкта внаслідок різних теплофізичних властивостей якісних та дефектних ділянок об'єкта.

На сьогоднішній день, як було сказано вище, неруйнівний контроль в епоху Індустрії 4.0 набирає значні обороти розвитку, тому темою дипломної роботи було обрано «Смарт-тепловізор». Смарт-тепловізор – це прилад для відображення, передачі та зберігання теплового випромінювання від контрольованого об'єкта. В роботі приведено розрахунки приймача випромінювання та запропоновано використання оптичної системи об'єктива смарт-тепловізора [1].

Метою дипломної роботи є розробка бездротового смарт-тепловізора з передачею даних на сервер та з їх подальшою обробкою. Проаналізовано недоліки та переваги даної роботи, описано перспективні області використання пристрою та подальше вдосконалення даної розробки.

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Інфрачервоний спектр випромінювання

Інфрачервона-термографія це метод дистанційної реєстрації, візуалізації і аналізу теплових (температурних) полів об'єктів. Електромагнітне (теплове, або інфрачервоне) випромінювання виникає у твердих тілах, рідинах та газах за рахунок коливань атомів в кристалічних решітках. Інфрачервоне випромінювання займає широкий діапазон електромагнітного спектру с довжинами хвиль від 1 мкм до 1000мкм, знаходячись між видимим світлом та радіохвильовим. На рис.1.1 показаний повний електромагнітний спектр світла з важливими спектральними областями. В науково-технічній літературі можна знайти різні розбиття ІЧ-діапазону на субдіапазони, а саме:

- Близній інфрачервоний діапазон довжин хвиль такого випромінювання лежить в межах від 0,76 мкм до 3 мкм;
- Середній діапазон від 3 мкм до 6 мкм;
- Довгохвильовий інфрачервоний діапазон знаходиться у межах від 6 мкм до 15 мкм;
- Дальній інфрачервоний діапазон має довжину хвилі більше ніж 15 мкм.

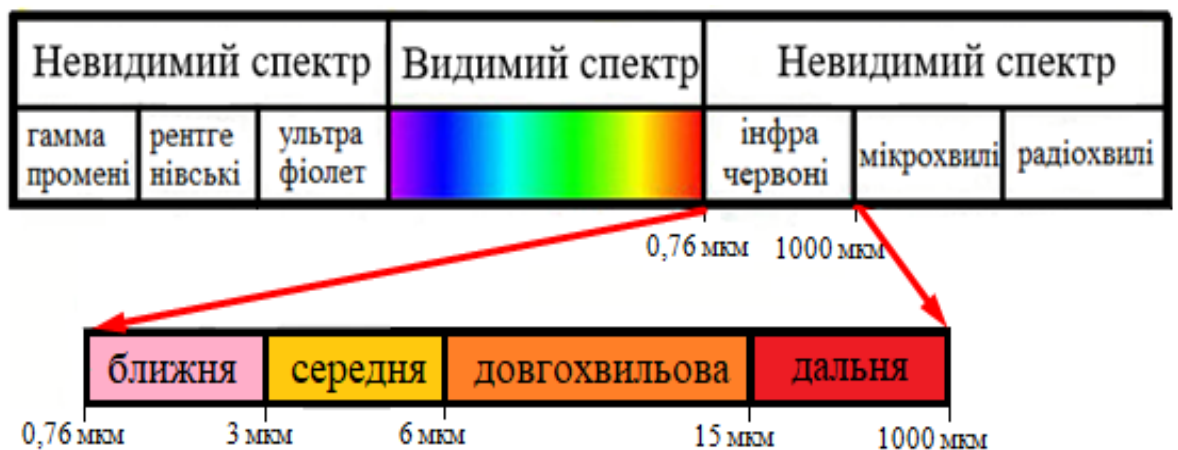


Рис. 1.1. Електромагнітний спектр випромінювання.

В таблиці 1.1 приведено основні енергетичні величини та одиниці їх вимірювання, використанні в теорії інфрачервоного випромінювання.

Табл.1.1 Основні енергетичні величини та одиниці їх вимірювання

Найменування (синоніми)	Визначальний вираз	Основна одиниця вимірювання
Потік випромінювання (променистий потік, потужність випромінювання)	$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda$	[Вт]
Енергія випромінювання (промениста енергія)	$W = \int_0^{\tau} \Phi(\tau) d\tau$	[Дж]
Енергетична сила світла (сила випромінювання)	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	$\left[\frac{\text{Вт}}{\text{ср}^1} \right]$
Енергетична світимість (поверхнева щільність потоку випромінювання)	$R = \frac{d\Phi}{dF}$	$\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$
Енергетична освітленість (опромінення, щільність потужності, щільність дози, радіація)	$E = \frac{d\Phi}{dF}$	$\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$
Енергетична яскравість	$L = \frac{I}{dF \cos\theta}$	$\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{ср}^1} \right]$

Всі тіла в тій чи іншій мірі випромінюють електромагнітні хвилі. Тіла, нагріті до досить високих температур, світяться, а при звичайних температурах є джерелами інфрачервоного (ІЧ) випромінювання.

Теплове випромінювання - електромагнітне випромінювання, що виникає за рахунок його внутрішньої енергії. Це одне з базових видів перенесення теплової енергії.

Властивості теплового випромінювання :

- суцільний спектр;
- положення максимуму спектра залежить від температури:

- випромінювання коротких хвиль (видиме світло, ультрафіолет);
- переважно довгі хвилі(інфрачервоні).
- рівновага, тобто в одиницю часу тіло буде поглинати стільки ж енергії, скільки і випромінювати:
 - якщо поглинає менше, ніж випромінює, то - остигає;
 - якщо випромінює менше, ніж поглинає, то - нагрівається.

Теплове випромінювання в основному оцінюється такими поняттями як спектральна щільність енергетичної світимості та енергетична світимість.

Енергетична світимість – це кількість енергії електромагнітного випромінювання у всьому діапазоні довжин хвиль теплового випромінювання , яке випромінюється деякою ділянкою тіла в усіх напрямках з одиниці площі за одиницю часу.

$$M = \frac{E}{St} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} \right] \quad (1.1)$$

В реальності енергетична світимість залежить від багатьох факторів, а саме:

- природи тіла;
- температури тіла;
- стану поверхні тіла;
- довжини хвилі випромінювання.

Отже для коректної оцінки ці фактори треба враховувати, застосовуючи спектральну енергетичну світимість, що є енергетичною світимістю для заданих довжин хвиль $M_{\lambda T}$.

Закон Кірхгофа встановлює, що в точці поверхні теплового випромінювання при будь-якій температурі та довжині хвилі спектральний коефіцієнт випромінювання для заданого напрямлення дорівнює спектральному коефіцієнту поглинання для протилежно направленою неполяризованого випромінювання. Практично, цей закон встановлює взаємозв'язок між коефіцієнтом поглинання та випроміненням тіл [2].

$$\alpha_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \quad (1.2)$$

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

Закон Кірхгофа виражає той факт, що на певній довжині хвилі тіло здатне поглинути та віддати однакову кількість енергії. Для ІЧ- термографії це має першорядне значення, оскільки дозволяє легше інтерпретувати ефекти поглинання/випромінення та коректно трактувати показання ІЧ-термометрів та тепловізорів, які калібруються по еталонним джерелам (моделям АЧТ).

Згідно закону Планка, спектральна поверхнева щільність потоку випромінювання фізичного об'єкта визначається його температурою T та спектральної випромінюваної здатністю (коефіцієнтом випромінення) ϵ_λ :

$$R_\lambda(T, \epsilon_\lambda) = \frac{\epsilon_\lambda C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (1.3)$$

Даний математичний вираз першочергово був отриманий для абсолютного чорного тіла (АЧТ), яке поглинає максимум можливої енергії при даній температурі енергії, що має місце при $\epsilon_\lambda^{\text{АЧТ}}$, тому класичний запис закону Планка має вигляд:

$$R_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (1.4)$$

Для $\lambda T < 5000$ (мкм×К) справедлива формула Віна:

$$R_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} \quad (1.5)$$

Для $\lambda T > 10^5$ (мкм×К) має місце наближення Релея - Джинса:

$$R_\lambda(T) = 2C_1 T / (C_2 \lambda^4) \quad (1.6)$$

В тепловому контролі величина λT зазвичай змінюється від 800 до 5000 (мкм×К), що відповідає спектральному діапазону 3-14 мкм та температурі об'єктів 0-100°С, отже, можливо використання формули (1.5).

Закон Віна для довжини хвилі λ_{max} , характерне максимальному значенню функції Планка $R_{\lambda_{max}}$, виражається в наступному вигляді:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T}, \quad (1.7)$$

де, λ_{max} виражена в мкм, а T - в Кельвінах. Наприклад, якщо прийняти, що поверхність тіла людини (в одязі) має температуру близько 300 К, то довжина хвилі максимальної потужності випромінення становить близько 10 мкм.

						Арк.А
						12
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата	ПК71.17.0000.000 ПЗ	

Практичні розрахунки по загальній формулі Планка зручно проводити, якщо розглянути її безрозмірну форму запису:

$$y = 142,32x^{-5} \left(e^{\frac{4,9561}{x}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1.8)$$

$$x = \frac{\lambda}{\lambda_{max}}; \quad y = R_{\lambda}^{AЧТ} / R_{\lambda_{max}}$$

Графік функції Планка $R_{\lambda}^{AЧТ}$ для різних температур АЧТ відповідно формулам (1.4) та (1.8) показані на рисунку 1.2 та рисунку 1.3 відповідно, звідки випливає, що:

- 1) для кожної температури максимум випромінювання має місце на певній довжині хвилі, яка підвищується з зменшенням температури;
- 2) потужність випромінювання різко падає зі зменшенням температури.

Згадані особливості теплового випромінювання тіл виражаються відповідно до закону Віна та Стефана-Больцмана.

В діапазоні всіх довжин хвиль $0 \dots \infty$ поверхнева щільність потоку випромінювання виражається законом Стефана-Больцмана:

1. для АЧТ

$$R^{AЧТ}(T, \lambda = 0 \dots \infty) = \sigma T^4, \quad (1.9)$$

2. Для сірого тіла

$$3. R(T, \varepsilon, \lambda = 0 \dots \infty) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1.10)$$

де, $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 * \text{К}^4$ – постійна Стефана – Больцмана.

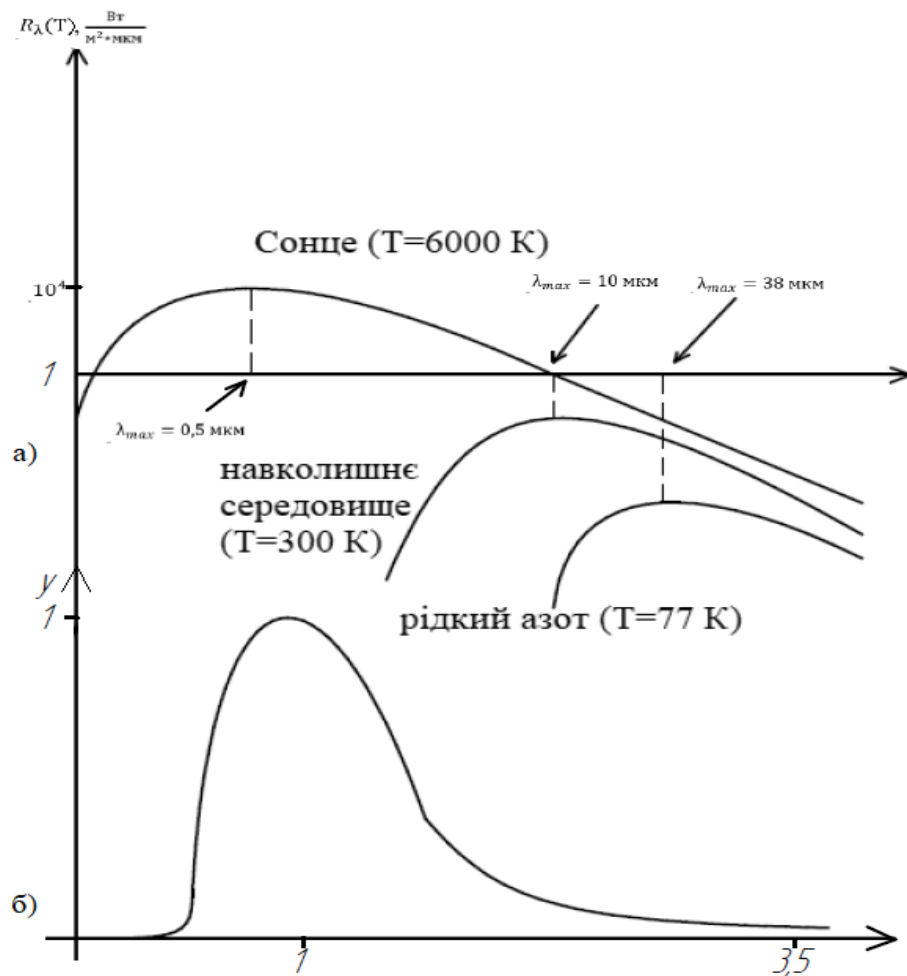


Рис. 1.2. Закон Планка для АЧТ:

а) в абсолютних величинах; б) одинична ізотермічна крива.

При падінні випромінювання на тіло (рис.1.3) має місце наступні оптичні феномени:

- 1) поглинання з коефіцієнтом α_λ ;
- 2) відображення з коефіцієнтом ρ_λ ;
- 3) пропускання з коефіцієнтом τ_λ .

Певно, що на різній довжині хвилі

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad (1.11)$$

що виражає закон збереження енергії.

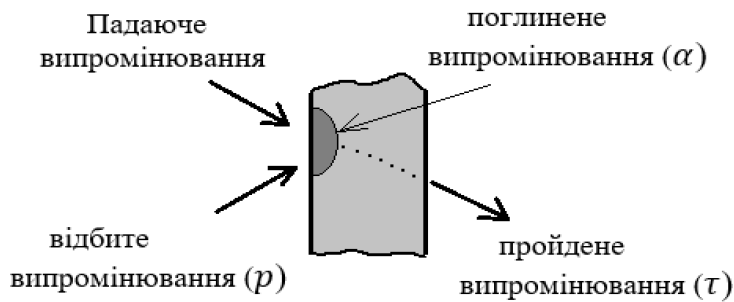


Рис. 1.3. Взаємодія випромінювання з тілом.

Яскравість об'єкта визначається сумою пропускання власного випромінювання, а також випромінювання від інших теплових джерел, відбитого від даного об'єкта. Власне випромінювання є функцією температури об'єкта, та можна впевнитись, як змінюється W_λ зі зміною температури [3].

$$\frac{\partial W_\lambda}{\partial T} = \frac{c_1 c_2 e^{\frac{c_2}{\lambda T}}}{\lambda^6 T^2 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^2} = W_\lambda \frac{c_2 e^{\frac{c_2}{\lambda T}}}{\lambda T^2 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}, \quad (1.11)$$

де $e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \gg 1$

$$\frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \sim W_\lambda \frac{c_2}{\lambda T^2} \quad (1.11)$$

Залежність значення $\frac{\partial W_\lambda}{\partial T}$ від довжини хвилі для температур приведено на рис.1.4.

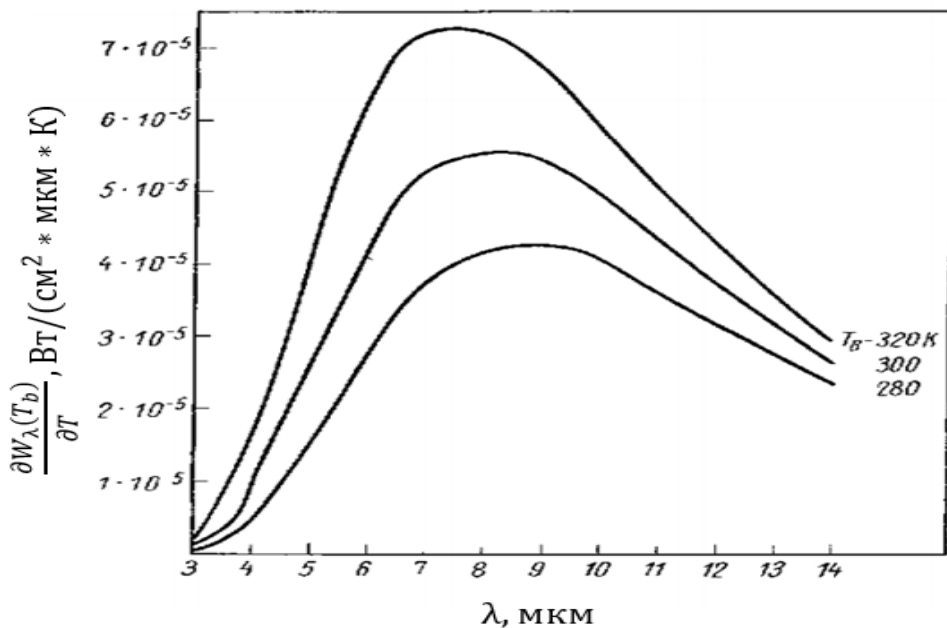


Рис. 1.4. Значення похідної спектральної щільності потоку випромінення, згідно закону Планка, по температурі для трьох значень температури фону T_B

В електромагнітному спектрі інфрачервоні датчики чутливі до певних діапазонів довжин хвиль. Підбір певного детектора та вибір певного діапазону хвиль, визначається характеристикою пропускання атмосфери та температурою об'єктів контролю.

Атмосфера землі не пропускає весь діапазон випромінювання, воно розсіюється та затримується в залежності від складу атмосфери. В повітрі різні речовини поглинають, розсіюють та випромінюють довжини хвиль. Експериментально було виявлено наявні так звані вікна пропускання, певні діапазони довжин хвиль, які краще проходять крізь атмосферу. На рис.1.5. показано діаграму пропускання, яка показує існування вікон пропускання.

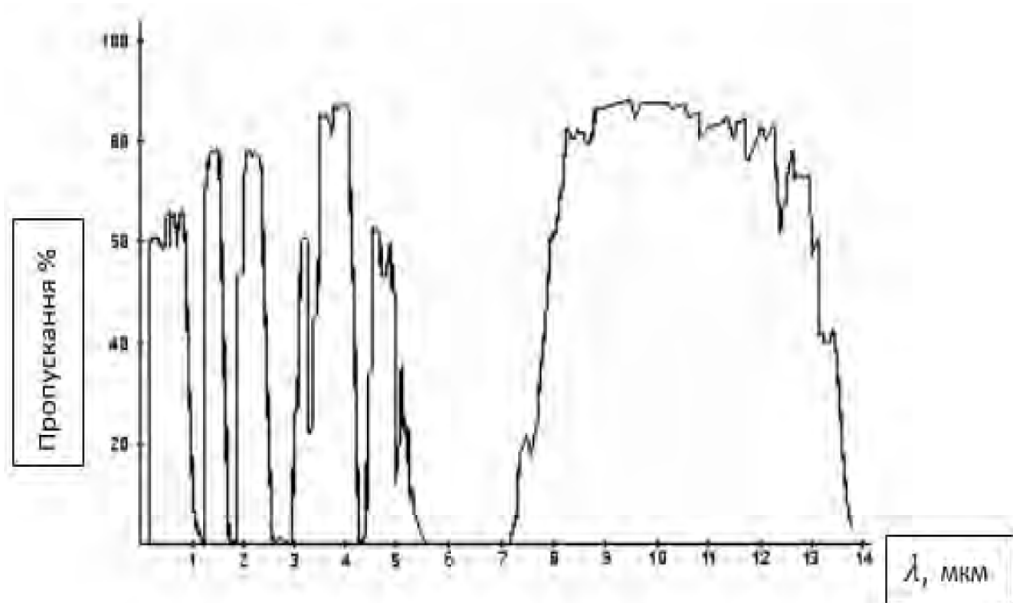


Рис. 1.5. Діаграма вікон пропускання випромінювання.

Сучасні детектори працюють зазвичай в діапазонах 3 мкм-5 мкм та 8 мкм – 14 мкм, що призводить до мінімального атмосферного поглинання. На сьогоднішній день, сучасні інфрачервоні датчики сконструйовані таким чином, що їх спектральна чутливість включають хоча б одну з цих смуг.

Отже, для певних температур треба підібрати певний діапазон хвиль випромінювання. Наприклад, в ракетній техніці використовується дальній інфрачервоний діапазон, через великі температури, що властиві цілям, на які наводиться зброя.

1.2 Прилади для тепловізорів

Інфрачервоне випромінювання і видиме світло є частиною електромагнітного спектра, але, на відміну від видимого світла, інфрачервоне випромінювання не може сприйматися людськими очима безпосередньо. Це пояснює, чому на тепловізійну камеру не впливає світло, і вона може дати чітке зображення об'єкта навіть у темряві. Інфрачервона камера (також відома як тепловізор) виявляє і вимірює інфрачервону енергію об'єктів. Камера перетворює ці інфрачервоні дані в електронне зображення, яке показує видиму температуру поверхні вимірюваного об'єкта.

Інфрачервона камера містить оптичну систему, яка фокусує інфрачервону енергію на спеціальну мікросхему детектора (матрицю датчиків), яка містить тисячі пікселів детектора, розташованих у вигляді сітки. Оптична система є однією з головних частин будь-якого тепловізора, тому як вона відводиться для фокусування від об'єктів теплового випромінювання, на чутливий датчик для цього випромінювання. На рис.1.6 представлена спрощена схема приладу для теплобачення.

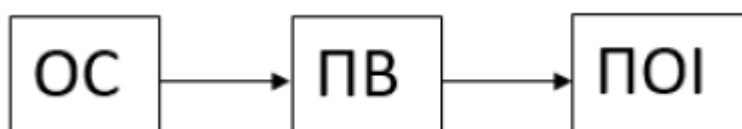


Рис. 1.6. Структурна схема приладу для теплобачення. ОС – оптична система, ПВ – приймач випромінювання, ПОІ - первинна обробка інформації

Кожен піксель в матриці сенсорів реагує на сфокусовану на ньому інфрачервону енергію і видає електронний сигнал. Процесор камери приймає сигнал від кожного пікселя і застосовує до нього математичний розрахунок для створення колірної карти видимої температури об'єкта. Кожному значенню температури призначається окремий колір. Отримана матриця кольорів відправляється в пам'ять і на дисплей камери у вигляді температурного зображення (теплового зображення) цього об'єкта.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		17

Існують різні типи тепловізійних пристроїв для всіх цих завдань, але кожна камера ґрунтується на одному і тому ж наборі принципів для роботи. Багато інфрачервоних камер також включають в себе камеру видимого світла, яка автоматично захоплює стандартне цифрове зображення при кожному натисканні на спусковий гачок. Змішуючи ці зображення, легше зіставити проблемні області на інфрачервоному зображенні з реальним обладнанням або областю, яку ви перевіряєте.

1.3 Класифікація тепловізорів

Дослідження просторових розподілів температури по одній або двох координатах вимагає сканування поверхні об'єкта, яке здійснюють або механічно, або електронним способом. Тепловізори для реєстрації теплового випромінювання діляться на два основних класи побудови зображення:

- Сканування зображення. Для формування зображення, отримують точкове значення температури и записують у пам'ять. Точність зображення з тепловізора прямо залежить від швидкості побудови такого зображення. В скануючих системах теплобачення використовуються різні типи сканування, а саме:
 - одноелементне;
 - паралельне;
 - послідовне.

Насамперед, сканування проводиться, як у просторі об'єктів, так і в їх зображеннях. Розрізняють типи сканування по закону сканування, траєкторії сканування та низкою інших ознак.

- Проектування зображення. Реєстрація теплового зображення це миттєвий знімок теплової картинки, який переводиться у двовимірне зображення, що в свою чергу і є температурною картинкою. Проектування зображення це зображення, яке реєструється поширення теплового випромінювання в діапазонах інфрачервоного спектра та переводить його у видимий.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		18

На сьогоднішній день, розроблено дуже багато систем тепловізійного бачення. Але за принципом роботи тепловізори залишилися незмінними. Кожен вид та тип тепловізійного обладнання представляє собою різноманітні рішення різних проблем сьогодення [4].

1.3.1 Скануючі тепловізори

Для отримання видимого зображення з випромінюваного об'єкта скануючим тепловізором здійснюється розгортка об'єкта на деякі елементарні майданчики. Кожен майданчик, ще називають елементом розкладання, є найменшою деталлю, яку може відтворити дана система. Приймач випромінювання (ПВ) аналізує потужність теплового випромінювання окремих розкладених елементів об'єкта. Послідовно з часом знімаються сигнали з ПВ, які зберігають інформацію про тепловипромінюючий об'єкт та навколишній фон. На рис 1.7 представлена спрощена структурна схема скануючого тепловізора.

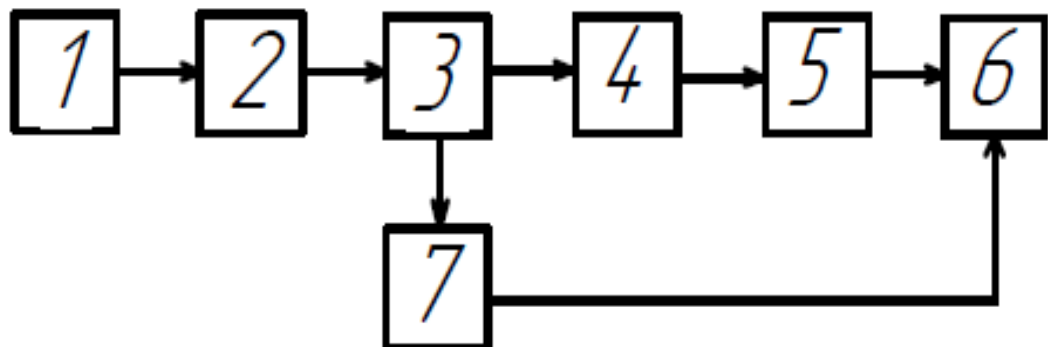


Рис.1.7. Спрощена структурна схема скануючого тепловізора. 1- ОК;2 - оптична система; 3 - блок сканування; 4- приймач випромінювання (ПВ); 5 – охолоджуюча система та підсилювач; 6 – відео-контрольний пристрій(ВКП);7 – пристрій синхронізації.

Алгоритмічний опис роботи тепловізора з оптико-механічним скануванням включає три пункти, а саме:

- 1) теплове випромінювання об'єкта контролю(1) та навколишній фон, пройшовши через шари атмосфери, віддалений тепловізором та спостережуваним об'єктом, фокусується оптичною системою(2);
- 2) скануючий пристрій(3) здійснює розгортку об'єкта та послідовно направляє на ПВ(4) зображення різних елементів об'єкта;
- 3) Після підсилення та перетворення тепловізійного сигналу підсилювачем 5, сигнал потрапляє на відео-контрольний пристрій(6), де формується зображення видиме зображення об'єкта та записується сигнал будь-яким реєстратором. В даному пункті алгоритму на ВКП надходять сигнали від пристрою(7), який в свою чергу синхронізує сигнали ВКП зі скануючим пристроєм.

На рис.1.8. представлено методи сканування, що застосовуються в скануючих тепловізорах.



Рис.1.8.Методи сканування. Паралельне сканування, послідовно-одноелементне, послідовно-лінійне, послідовно-паралельне.

Окрім самих методів сканування, тепловізори поділяються по представленню та обробки сигналів.

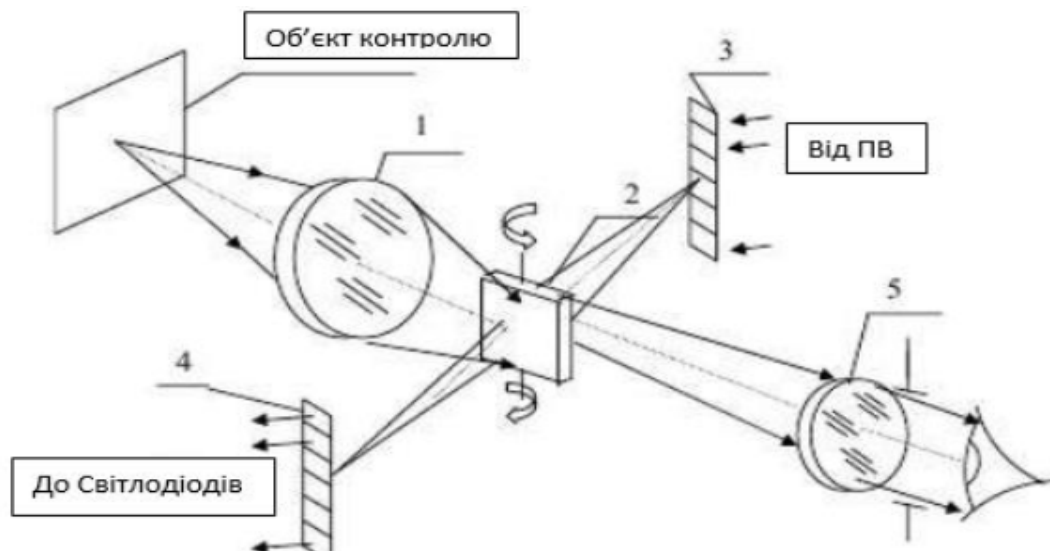


Рис. 1.9 - Тепловізор з паралельним скануванням та паралельною розгорткою зображення: 1 – оптична система; 2 – оптико-механічна скануюча система; 3 – лінійні світлодіоди; 4 - лінійний приймач випромінювання; 5 – окуляр.

На рис.1.9. представлено тепловізор с паралельним скануванням та паралельною розгорткою зображення , принцип роботи якого дуже простий. Випромінювання від об'єкта контролю потрапляє на скануючи систему, яка направляє його на ПВ, знімаючи по черзі значення одного пікселя, в подальшому сигнал з інформативною частиною про координати пікселя і інтенсивність випромінення об'єкта, подається на масив світлодіодів, які загоряються відповідно положенню сприйнятого пікселя, яскравість даного світло діоду напряму залежить від інтенсивності випромінювання від детектора. Дана система з легкістю може проєціювати зображення на око людини.

Недоліком даної системи є повільна та не чітка реєстрація швидкоплинних процесів, але дуже добре підходить використання такої системи для реєстрації статичних теплових зображень.

На сьогодні, тепловізори з оптико-механічним скануванням у більшості випадків не застосовуються, тому як поступаються місцем матричним тепловізорам, але в деяких особливих випадках, отримання якісного теплового зображення без скануючого тепловізора майже неможливо. Наприклад, для

сканування навколишнього середовища або широких кутів огляду не можливо без тепловізори з оптико-механічним скануванням зображення. При чому в таких випадках вони мають більшу точність отриманого зображення, задача сканування повністю лежить на механічних засобах переміщення детектора тепловізора у просторі. Оптико-механічні системи містять більшу кількість рухливих деталей, тоді як матричні тепловізори фактично є передавальними тепловізійними системами ІЧ-діапазону [5].

1.3.2 Матричні тепловізори

На сьогоднішній день, сучасна тепловізія знаходиться на межі двох етапів свого розвитку, коли існують тепловізори 3-го покоління з матричними детекторами замінюють тепловізори 2-го покоління на оптико-механічні системи сканування. Технічні характеристики тепловізорів 2-го і 3-го поколінь подібні, але тепловізори 2-го покоління значно поступаються візуаторам 3-го покоління за вартістю, розміром та енергоспоживанням. Тому перспективи розвитку тепловізійних систем, як правило, пов'язані з матричним детектором.

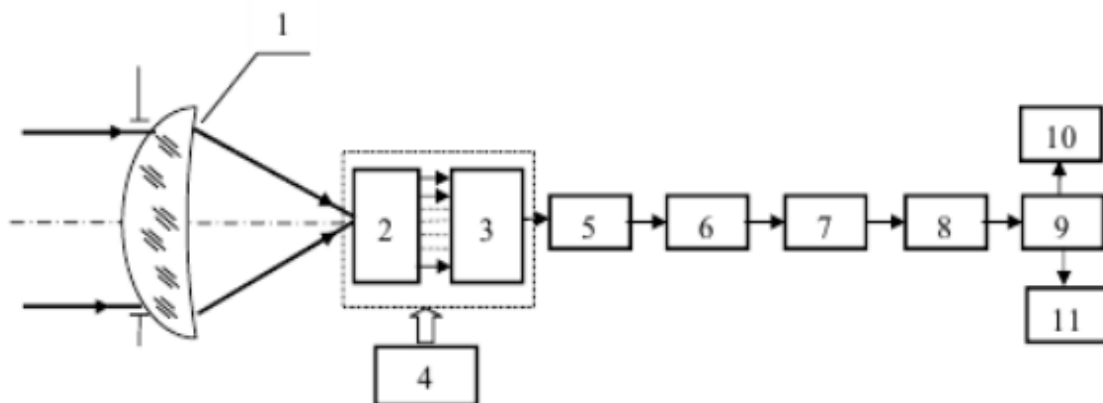


Рис.1.10. Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею. 1 - оптична система; 2 - ФРА; 3 - мультиплексор; 4 – охолоджуючий пристрій; 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор непрацюючих елементів; 9 – формувач зображення; 10 - дисплей; 11 – інтерфейс для підключення зовнішніх пристроїв введення/виведення

На рис.1.9. представлено функціональну схему тепловізора з фокальною матрицею, який включає в склад охолоджуючі пристрої, мультиплексом, підсилювачі, коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач, блоки цифрової обробки та формувачі вихідних сигналів. З виходу сигнал інфрачервоного випромінювання може надходити до мікроконтролера, або процесора, для наступних маніпуляцій над зображенням, а також виведення отриманих значень температури кожної елементарної частинки на дисплей або збереження даних на окремому сервері.

Загалом тепловізори третього покоління в однакових умовах використання виграють у скануючих систем теплобачення, але недоліком обмежена ефективність дискретизації зображення матрицею детектора, що призводить до спотворення зображення.

1.4. Типи інфрачервоних матричних детекторів

Отже, щоб отримати найбільш якісне зображення використовуються матричні детектори, які чутливі до інфрачервоного випромінювання. На сьогоднішній день, існує велика кількість різних типів інфрачервоних детекторів. Розподіл інфрачервоних детекторів найбільш інформативно можна поділити за матеріалом, із якого був виготовлений детектор. Дані пристрої засновані на роботі мікроскопічних елементів, які мають свій хімічний склад, речовину та інше. Чутливий елемент не заповнює всю поверхність матриці, тому одним з важливих параметрів таких детекторів є коефіцієнт заповнення. Чим вище коефіцієнт заповнення, тим якісніше зображення, особливо при моніторингу температур, близьких до температур навколишнього середовища, а також при аналізі слабких температурних градієнтів. В найкращих матрицях коефіцієнт заповнення може досягнути 90%. За технологією виробництва приймачів інфрачервоного випромінювання можна поділити на дві основні категорії:

- Охолоджувальні;
- Неохолоджувальні.

						<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			23

1.4.1. Охолоджувальні детектори

Охолоджувані матриці в основному засновані на фотоефекті, кожної елементарної чутливої частинки приймача матриці інфрачервоного випромінювання. В даних детекторах фотони, яка поглинаються чутливим елементом, генерують вільні діркові пари, які в подальшому збираються послідовно [6].

Перевагою охолоджувальних інфрачервоних детекторів над неохолоджувальними є отримання більш чіткого та якісного зображення. Але, на жаль, дані матриці мають ряд недоліків, що призводить до звуження їх використання.

Проаналізувавши інфрачервоний спектр пропускання випромінювання на рисунку 1.4, можна зробити висновок, що дані детектори мають чутливість до близького та середнього ІЧ-діапазону. В даних межах діапазону можна спостерігати неоднорідність коефіцієнта пропускання атмосферою інфрачервоного випромінювання. Даний факт стверджує про високу чутливість даних детекторів до погодних умов.

Однією з головних проблем охолоджувальних детекторів є те, що з підвищенням температури в них автоматично генеруються термічно індуковані пари електронів. Даний ефект викликає появу шуму при визначенні температури об'єкта, так як похибку побудови термограми вносить сам детектор. Тому в таких детекторах будується система охолодження, що веде за собою ряд інших недоліків. Для охолодження використовуються спеціальні та дорогі охолоджувачі. На сьогоднішній день, використовують охолоджувальні детектори, які виготовлені з використання антимоніду індію(InSb), телуриду кадмію(HgCdTe) або технологія Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP). За рахунок необхідності охолодження детекторів збільшується їх вартість та робить всю систему масивну та неповоротну, що призводить до звуження області їх застосування.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		24

Метод охолодження матриці призводить до підвищення дії тепловізійної системи, але ускладнює систему, підвищує її енерговитратність та собівартість. Дані детектори використовуються в астрономії, військовій справ або медицині, щоб максимально зменшити дію негативних факторів та підвищити продуктивність всієї системи.

1.4.2. Неохолоджувальні (теплові) детектори

Принцип дії болометра засновано на зміні електричного опору напівпровідника або металу при нагріванні чутливого елемента поглиненим тепловим випроміненням. Історично болометри були одними з найперших видів ІЧ детекторів, проте їх використання в тепловізорах протягом тривалого часу стримувалось їх значною інерційністю. В кінці ХХ-го століття з'явилися мало інерційні мікроболометричні матриці, на основі яких було створено неохолоджувальні матричні тепловізори, отримавши на сьогоднішній час велике поширення.

Неохолоджувальні детектори відчують зміну електричних параметрів після зміни температури самого пристрою, який пов'язаний напряду з кількістю поглиненої інфрачервоної енергії. Тому теплове виявлення є непрямим способом виявлення інфрачервоного діапазону, та час відгуку в даних детекторах більше, ніж у охолоджувальних. Дані детектори мають меншу відображальну здатність та відношення сигнал/шум, ніж у фотонних. Як наслідок, Продуктивність даних детекторів менше, ніж у охолоджувальних фотонних детекторів.

Теплові датчики набагато простіші в виготовленні, ніж охолоджувальні фотонні. Проблеми чіткості термограм та відношення сигнал/шум цілком можливо усунути оптимізацією систем та програмною частиною. Проаналізувавши данні факти, охолоджувальні датчики все більш якісні та продуктивніші, але різниця продуктивності між тепловими та фотонними детекторами з кожним днем стає меншою, якщо порівняти дані термограмні зображення на піксельні основі.

									Арк.А
									25
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата					

Найбільш значною перевагою теплових датчиків над фотонними є те, що вони можуть працювати при температурах навколишнього середовища 0-40°C, не використовуючи обладнання для охолодження детектора. Підсумувавши, використання неохолоджувальних детекторів на сьогоднішній день мають ряд переваг над іншими, а саме:

1. менший розмір системи;
2. менша вартість;
3. низьке енергоспоживання;
4. тривалість роботи.

Завдяки перевагам описаним вище, дані теплові детектори використовуються в медицині, авіації, ракетобудуванні та комерційних справах, наприклад для прицілів нічного бачення, виявлення корисних копалин, промисловості, а також для знаходження, детектування та аналіз небезпечних ситуацій в навколишньому середовищі.

1.4.3. Типи теплових інфрачервоних детекторів

Принцип роботи всіх теплових детекторів заснований на зміні електричних характеристик матеріалу приймача за рахунок енергії поглиненого теплового випромінювання. Технології виготовлення теплових детекторів досягли певного ступеня досконалості і визначили ряд переваг, завдяки яким сенсори цього типу займають домінуюче становище на ринку в кількісному відношенні. Їх переваги добре відомі. У найзагальнішому вигляді - це простота конструкції і відсутність необхідності в охолоджувачі, що призводить до значно менших енерговитратах по живленню [7]. На сьогоднішній день, використовуються всього чотири основні категорії теплових інфрачервоних детекторів :

- 1) резистивні мікроболометри;
- 2) сегнетоелектричні та піроелектричні детектори;
- 3) діодні мікроболометри;
- 4) термоелектричні детектори.

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>26</i>

1.4.3.1 Резистивні мікроболометричні детектори

Резистивні мікроболометричні детектори зайняли значне місце в підходах формувань теплових зображень. Основою роботи яких є використання резистивних болометрів, які реалізовані на основі над поверхневих мостів на КМОП пластинах. На рисунку 1.11 представлено схематичне зображення напівпровідникового болометра на основі двох термісторів. ІЧ-випромінювання попадає на термістор, який змінює свою температуру та відповідно змінює електричні характеристики (у нашому випадку опір), що після зафіксується електричною схемою та відображається у вигляді термографічного зображення.

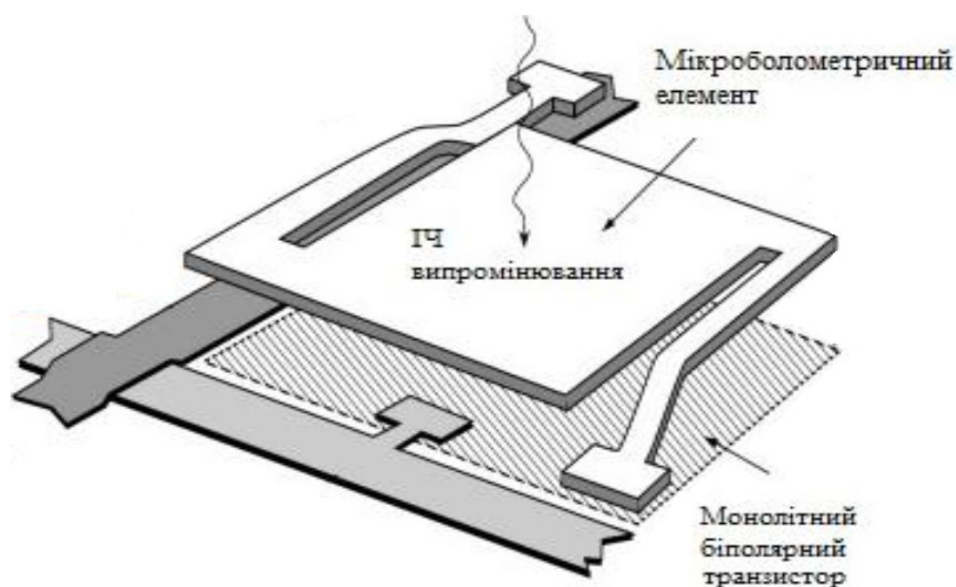


Рис.1.11. Схематичне зображення напівпровідникового болометра на основі двох термісторів.

Метод поверхневої обробки дозволяє обробляти та наносити термочутливі шари з малою масою, малою товщиною та хорошою теплоізоляцією на мости над зчитувальними мікросхемами.

Дані матриці виготовляються з використанням аморфу кремнію (a-Si), оксид міді барію ітрію (YBaCuO) та оксиду ванадію (VOx). Головним недоліком системи с оксидом ванадію є те, що він майже не сумісний с лінією CMOS, та за рахунок цього виготовляють окрему лінію, щоб лінія CMOS не була забруднена.

									Арк.А
									27
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата					

На жаль, через використання VOx ми отримуємо значно більше значення шуму, що в подальшому призводить до зменшення продуктивності всієї системи. A-Si сумісне з CMOS, але через високотемпературний відпал (досягання стабільності мікроструктури), ускладнюється інтеграція моноліту CMOS.

У неохолоджувальних мікроболометрах значне місце займає електроніка зчитування, вона призводить до кінцевого етапу продуктивності детектора. Опір детектора, а саме інфрачервоне випромінювання, вимірюється за допомогою простої мостової схеми.

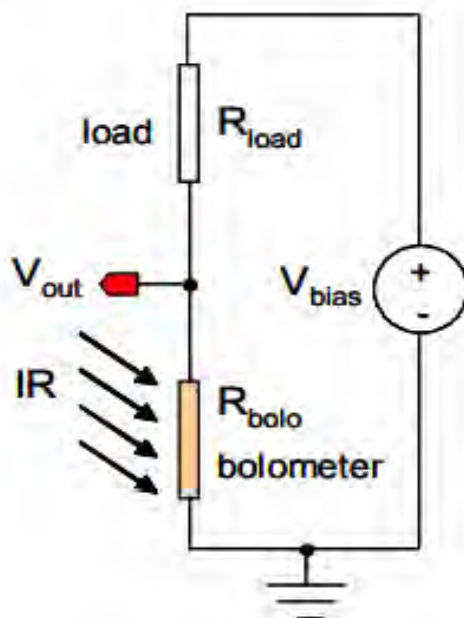


Рис.1.12. Електрична схема мікроболометра.

Зміна опору мікроболометра напряму пов'язана зі значенням TCR та зміни поглинання інфрачервоного випромінювання, що в подальшому призведе до зміни вихідної напруги напівмосту.

Вихідна напруга схеми визначається наступним чином:

$$V_{out} = V_{bias} \left(1 - \frac{R_{load}}{R_{bolo}(1+\alpha\Delta T) + R_{load}} \right), \quad (1.12)$$

де, V_{bias} – напруга зсуву, R_{load} та R_{bolo} – опір болометра та навантаження при заданій температурі, α – коефіцієнт опору мікроболометра, ΔT – збільшення температури пікселя за рахунок поглиненого інфрачервоного випромінювання.

1.4.3.2 Піроелектричні та сегнетоелектричні детектори

Піроелектричний ефект, який проявляється у деяких сегнетоелектричних матеріалів - це зміна поверхневого заряду з температурою. Ця властивість використовується в піроелектричному детекторі, який здатний високошвидкісно працювати і реагувати лише на зміни вхідного сигналу. Піроелектричними приймачами випромінювання виробляють з матеріалів, називаються сегнетоелектриками, наприклад титана барія. На сьогоднішній день, існує велика кількість матеріалів, які показують електричну поляризацію при різній та швидкій зміні температур. Дані матеріали володіють постійною електричною поляризацією, що є сильною функцією температури. Протягом довгого часу розробляли недорогі ІЧ-тепловізори на базі піроелектричних видикомів, але в даний час вони практично повністю витіснили тепловізори з матричними детекторами. Відповідність напруги піроелектричного детектори – це функція як теплової, так і електричної частоти, піроелектричний коефіцієнт, теплові опір і навантаження. На рис1.13 представлено еквівалентну схему піроелектричного елемента [8].

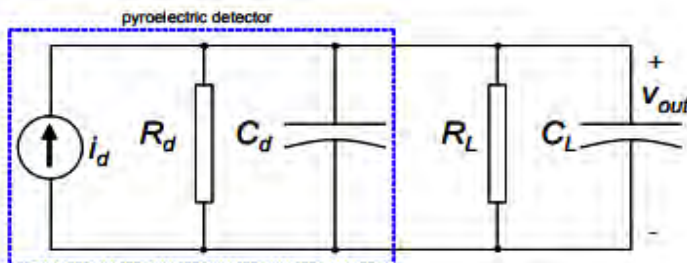


Рис. 1.13. Еквівалентна електрична схема піроелектричного елемента.

Сегнетоелектричний ефект – це поліпшена версія піроелектричного ефекту, але напруга зміщення в даному варіанті використовується задля

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		29

встановлення внутрішнього поля всередині матеріалу самого детектора, що напряму залежить від чутливості пристрою. На сьогодні, вони не вимагають використання стабілізаторів температури, на відміну від піроелектричного. Для сегнетоелектричних мікроболометрів можуть будувати використанні такі ж схеми зчитування, як і для піроелектричних.

1.4.3.3 Термоелектричні детектори

Термоелектричні детектори працюють відповідно до термоелектричного ефекту, в якому різниця температур виробляє різницю напруги (і навпаки). На рисунку 1.14 представлено дві несхожі метали, з'єднані послідовно (термопара) і розміщені в ланцюзі, тече струм (вказано напрямом), зазначено, що температура T_2 в металі 2 більша ніж T_1 в металі 1. Розмикання ланцюга для перевірки напруги внаслідок потоку струму утворює коефіцієнт Зеєбека або термоелектрична потужність.

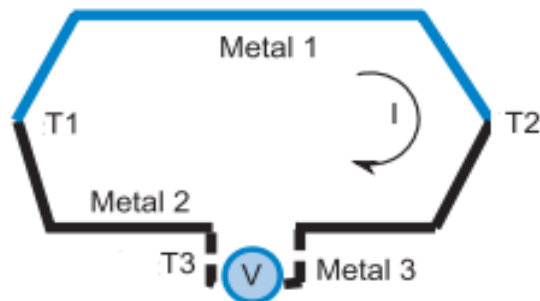


Рис. 1.14. Еквівалентна електрична схема термопари.

Вихідна напруга термопари:

$$V_{AB} = (\alpha_A - \alpha_B)\Delta T_{hc} \quad (1.13)$$

де, α_A і α_B - коефіцієнти Зеєбека різних матеріалів, а ΔT_{hc} - температурна різниця між спайками. Для детектування використовують послідовно з'єднані термопари, через недостатню напругу однієї з термопар.

Приведена структура називається термобатареею, дана система побудована з металів або напівпровідників. Коефіцієнти Зеєбека більш доцільно

						ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата			30

підходять для напівпровідників, тому термобатарей з напівпровідників є найбільш чутливими порівняно з металевими термобатареями. Реалізація термобатарей це послідовне з'єднання термопарних ізольованих конструкцій. За рахунок великої кількості з'єднувальних структур, розмір детектора неможливо зменшити відносно заданого розміру, а як наслідок, кількість пікселів в масивах фокальних площин не може бути штучно збільшено, як у мікроболометрів. Термоелектричним датчикам властива диференційна робота між різними спайками, що призводить до непотребі використання стабілізаторів напруг. Задля зниження градієнту температури треба звести до мінімуму шляхом моделювання масиву значень. Недоліком даних систем є низька чутливість, через великі пікселі в таких пристроях. Наприклад, пікселі розміром 250 мкм × 250 мкм, призводять до обмеження використання таких пристроїв для детекторів великого формату.

1.4.3.4. Мікроболометри діодного типу

В залежності від методу зміщення мікроболометричні детектори використовують змінення напруги діодного типу.

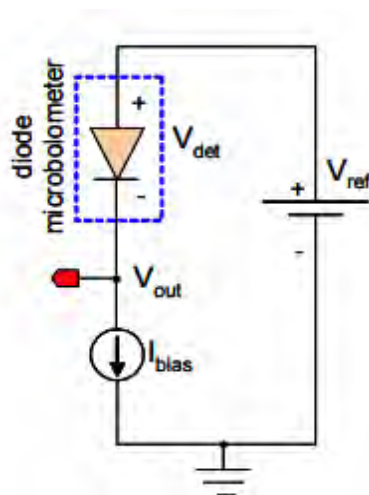


Рис. 1.15. Електрична схема діодного мікроболометра.

На рисунку 1.15 представлено еквівалентну схему діодного мікроболометра діодного типу. Інфрачервоне випромінювання вимірюється відношенням постійного струму і зміни напруги відносно до опорної напруги. Тоді як вихідна напруга розраховується як

$$V_{out} = V_{ref} - (V_{D0} + \alpha_D \Delta T) \quad (1.14)$$

де V_{ref} - опорна напруга, V_{D0} – напруга при струмі зміщення, α_D - коефіцієнт прямої напруги діода заданого рівні зсуву, ΔT - температурна зміна детектора поглиненого ІЧ-випромінювання.

Технологія виготовлення мікроболометричних детекторів, запропонована нещодавно, оскільки такі матриці не потребують охолодження та здатні працювати при температурі навколишнього середовища, дозволяючи створювати доволі практичні та універсальні тепловізори.

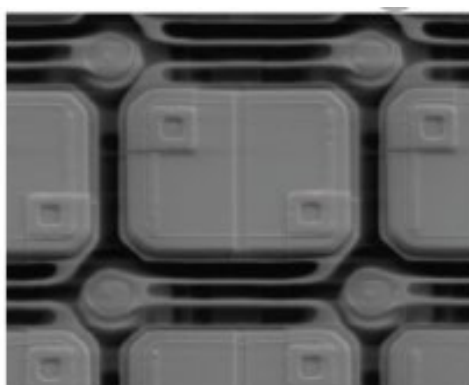


Рис. 1.16. Мікроболометрична матриця під мікроскопом.

На рисунку 1.16 представлена мікроболометрична матриця під мікроскопом. Дані детектори не можуть бути реалізовані на стандартному процесу CMOS, тому використання їх для тепlobачення викликає велике збільшення коштів для використання в ІЧ-детектуванні. Для більш недорогої комплектації даних датчиків найбільш доцільно використання детекторів разом з їх системою зчитування [9].

1.5. Смарт-тепловізор в Індустрії 4.0

Індустрія 4.0 використовується, як синонім четвертої промислової революції і являє собою новий етап в організації та контролю виробничого ланцюжка. Вона відноситься до технологічної еволюції від вбудованих смарт-систем до кіберфізичних систем. Децентралізований інтелект допомагає створювати інтелектуальні об'єктні мережі і незалежне управління процесами, при цьому взаємодія реального і віртуального світів є важливим новим аспектом процесу виробництва. Початковими цілями Індустрії 4.0 зазвичай є автоматизація, поліпшення (виробничих) процесів і оптимізація продуктивності виробництва. Кіберфізичні системи складають основу Індустрії 4.0 (наприклад, «розумні машини»). Вони використовують сучасні системи управління, мають вбудовані програмні системи і мають у своєму розпорядженні інтернет-адрес для підключення і адресацію через IoT (Інтернет речей).

Принцип IoT сприяє для поліпшення і інновації в життя споживачів, в бізнесі, охороні здоров'я, мобільності, містах і суспільстві. Потенційні цілі IoT часто діляться на варіанти використання IoT: причини, за якими розгортається IoT. Наприклад: моніторинг стану, відстеження активів, моніторинг навколишнього середовища, профілактичне обслуговування і домашня автоматизація. На сьогоднішній день, існують сотні варіантів використання IoT в залежності від галузі та/або типу програми. Деякі варіанти використання IoT існують в різних галузях, інші – більш протилежні. Наприклад: відстеження активів - універсальний варіант використання. Це може бути користувацький додаток, щоб дізнатися, де знаходиться ваш вихованець або ноутбук. Але це також може бути використано для відстеження контейнерів на величезному вантажному кораблі. В приведених прикладах може бути використано принцип IoT, але в поставлених задачах величезна різниця в технологіях і контексті.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		33

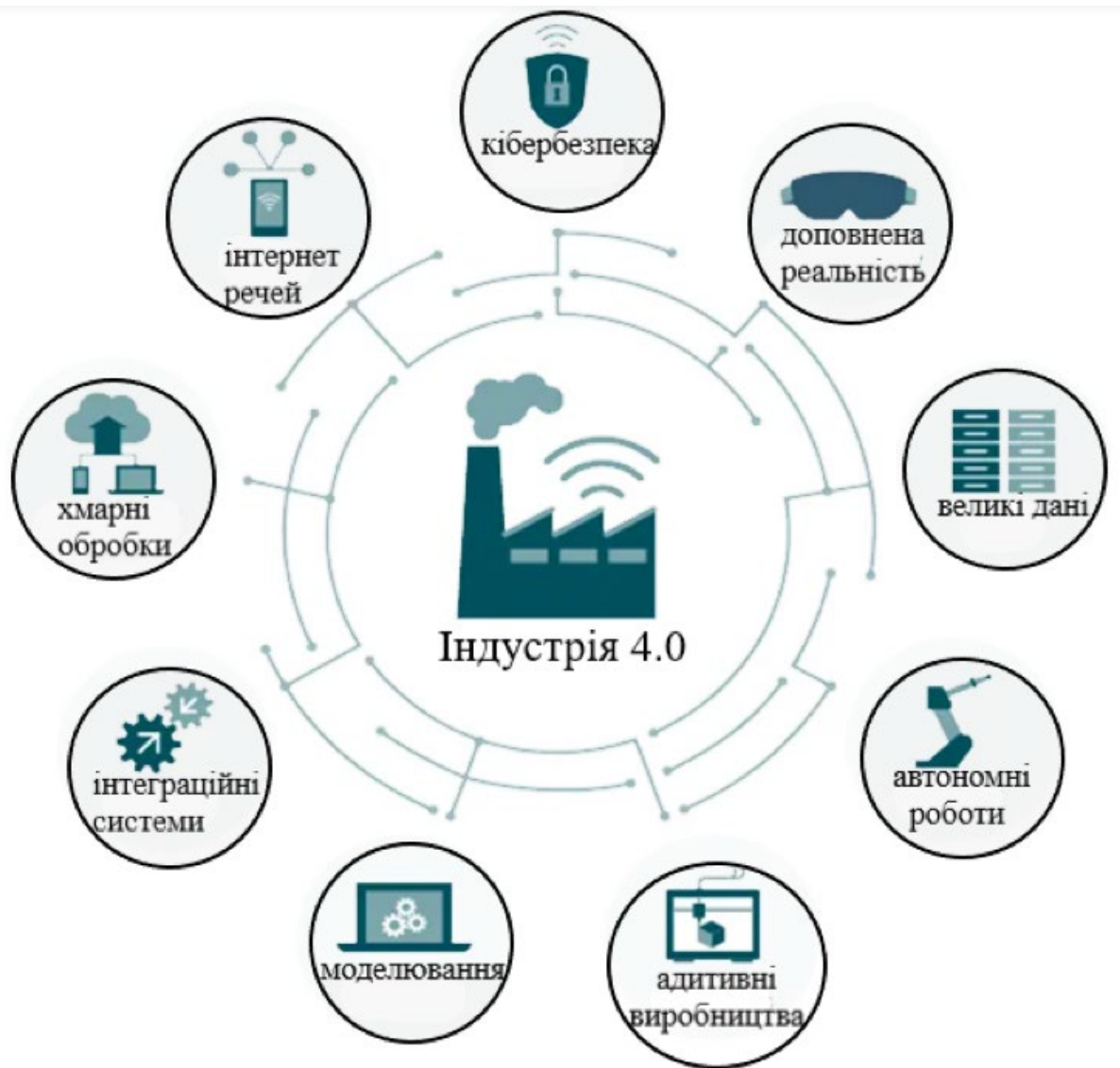


Рис. 1.17. Сфери використання Індустрії 4.0 в житті людей

На рисунку 1.17 представлено сфери використання Індустрії 4.0 в повсякденному житті. Таким чином, продукти і засоби виробництва об'єднуються в мережу і можуть «спілкуватися», відкриваючи нові способи виробництва, створення цінностей та оптимізація в реальному часі. З додатковими прискорювачами, такими як передова робототехніка і штучний інтелект/когнітивний підхід, дозволяють Індустрії 4.0 відкривати широкі можливості для інновацій і дійсно повністю автоматизувати і вивести галузь на новий рівень.

Люди, інформація та технології стають все більш зв'язаними, розподіленими та поширеними, що дає змогу зближувати фізичний та

										Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата						34

віртуальний світи. Технології соціальних мереж переходять на підприємство і будуть сприйматися і відчуватись інакше, ніж у споживчому просторі. Інформованість мережі включатиме знання, людей та речі. Ці сили повідомляють про нову тенденцію, яку ми називаємо «розумними системами».

У найпростішій формі смарт-система - це нове покоління обчислювальних систем та інформаційної архітектури, які в поєднанні зі штучним інтелектом, машинним навчанням та принципом IoT відриваються від сучасних інформаційних, обчислювальних та телекомунікаційних парадигм, щоб забезпечити інтелектуальні фізичні системи, які будуть інтегровані в мережі, а дані від машин, датчиків, відеопотоків, карт, людей, стрічок новин тощо, щоб стати невід’ємною частиною всіх інформаційних систем. Ця нова парадигма керує усіма інформаційними системами і, що ще важливіше, їх взаємодією з реальними, державними, контекстно-залежними можливостями, які інтегрують процеси, фізичне обладнання та знання для колективної обізнаності та кращого прийняття рішень [10].

Основа смарт-системи заснована на використанні вбудованих обчислень, програмного забезпечення та мережевих технологій. Основні платформи, що інформують смарт-системи, поєднують нові нововведення в архітектурі програмного забезпечення та інформації з інструментами збору, інтеграції та управління. Ці технології «даних» будуть працювати безпрецедентними способами для вирішення більш складних бізнес-проблем, ніж попередні покоління обчислювальної техніки.

На сьогоднішній день, як було сказано вище, використання смарт-систем є дуже інноваційно та сучасно. В повсякденному житті ми майже завжди користуємося принципами IoT, що є зручно, економічно та практично. Тому в даній дипломній роботі було обрано розробляти та впроваджувати новий пристрій сьогодення – бездротовий смарт-тепловізор.

Смарт-тепловізор – це портативний прилад, який дозволяє контролювати ситуацію вдень і вночі при будь-яких погодних умовах. Особливість даного приладу - це робота в інфрачервоному спектральному діапазоні, він дозволяє

									<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	35

розрізняти те, що недоступно приладам нічного бачення, звичайним телекамерам та телекамерам з інфрачервоним підсвічуванням. Теплове випромінювання вільно проходить через дим, пил та туман, це дозволяє тепловізорам в системі розгледіти теплове поле об'єкта, тоді як, стандартна камера, яка працює в діапазоні видимого світла, на це неспроможна.

Головним завданням даного смарт-тепловізора є моніторинг обладнання на виробництві та своєчасне реагування на відхилення від допустимих значень температурного поля. Незалежно від проведених на виробництві програм обслуговування обладнання, включення в їх склад смарт-тепловізійного обстеження дає незаперечні переваги. Широкий спектр діагностичних і профілактичних заходів, рентабельність приладів, скорочення витрат на ремонт обладнання, оптимізація робочого процесу роблять використання смарт-тепловізорів надзвичайно корисним і зручним. Для неруйнівного контролю, моніторингу довкілля та контролю безпеки даних пристрій є перспективним та універсальним.

1.6 Синтез структурної схеми смарт-тепловізора

На рисунку 1.18 представлено структурну схему бездротового смарт-тепловізора. Датчик ІЧ випромінювання передає температурний масив даних кожної елементарної частини на мікроконтролер. В якості детектування випромінювання запропоновано використовувати датчик AMG8833.

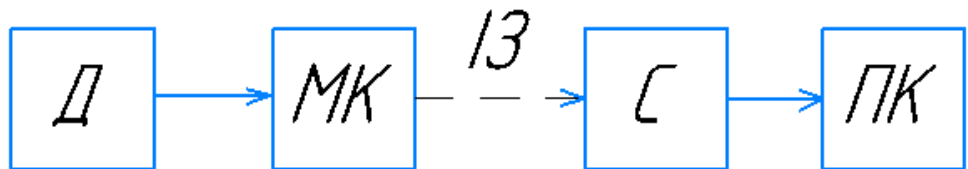


Рис. 1.18 Структурна схема портативного смарт-тепловізора: Д-датчик ІЧ випромінювання; МК – мікроконтролер; ІЗ- інтернет з'єднання; С- сервер; ПК- персональний комп'ютер.

. В нашому випадку доцільно використання мікроконтролера виробництва Espressif Systems з інтерфейсом Wi-Fi Esp8266, що дозволить використовувати передачу даних принципом IoT. Запрограмований пристрій в алгоритмі виконує два основних завдання:

1. зчитування даних з ІЧ датчика;
2. структурована взаємодія з користувачами принципом IoT.

В структурній схемі сервер слугує місцем зберігання, обробки та виведення термограм. Сервер стане відмінним варіантом, який допоможе не тільки зберегти бюджет, а й забезпечити високу стабільність і безпеку. В розробці було реалізовано безкоштовний сервер провайдера Brainy, який відомий надійністю та простотою в реалізації. На сьогоднішній день, застосування смарт-тепловізійних систем найбільш перспективно в побуті та невеликих виробництвах, для моніторингу об'єктів контролю та своєчасного реагування на відхилення від допустимих норм температурного поля.

Найбільш важливою характеристикою смарт-тепловізора для використання на виробництвах є кут поля зору. В нашому випадку він дорівнює 70° , що призводить до підвищення ефективності контролю процесу виробництва, але використання таких систем, наприклад, для охорони об'єктів- неможливо. Це обумовлено невеликою дальністю детектування об'єктів (приблизно 20-30 метрів). Кадрова частота смарт тепловізора для промисловості 10 кадрів в секунду, що для нашого завдання є достатнім. Роздільна здатність 8×8 є мінімально задовільною, але цей недолік повністю можна компенсувати невеликою вартістю даного тепловізора та його компактністю. Нашою головною поставленою задачею є детектування відхилення від нормального температурного діапазону, а не отримання якісного зображення, та аналіз термограм в будь-який час та в будь якому місці [11].

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		37

РОЗДІЛ 2. ПІДБІР ТА РОЗРАХУНОК ВУЗЛІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

На рисунку 2.1 представлено функціональну схему смарт-тепловізора.

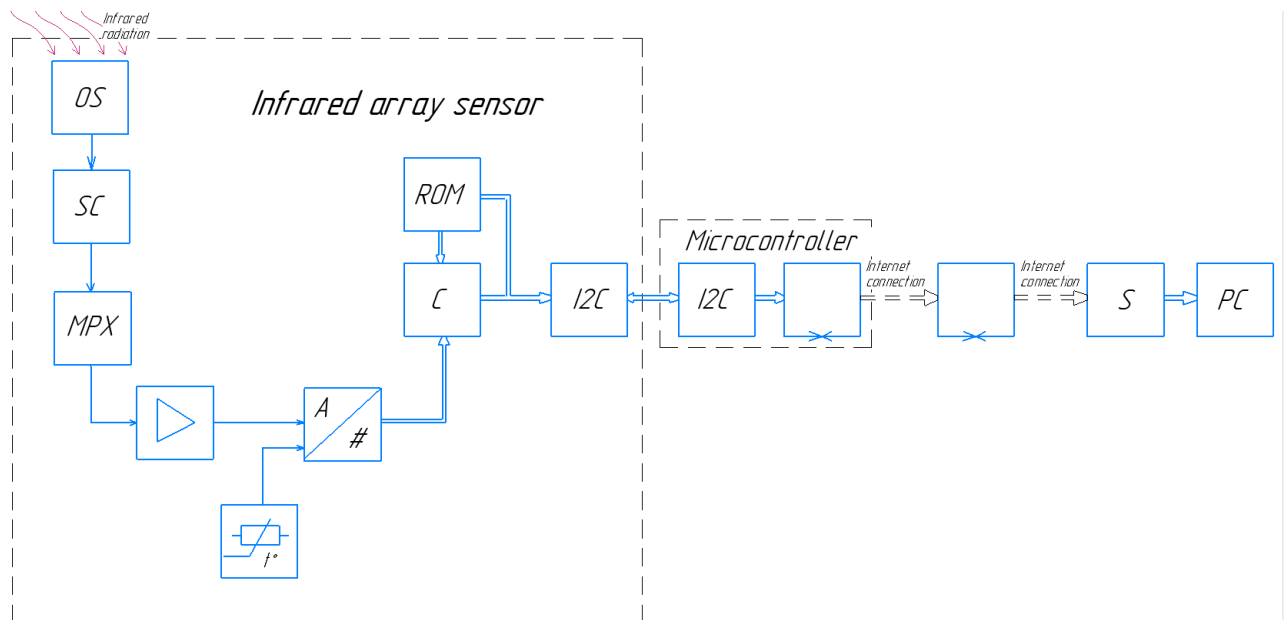


Рис.2.1. Функціональна схема смарт-тепловізора: Infrared radiation-ІЧ випромінювання; OS - оптична система; SC– детектор ІЧ випромінювання; MPX- мультиплексор; С- блок керування; S- сервер; РС- користувачський пристрій.

Інфрачервоне випромінювання від навколишніх об'єктів потрапляє на оптичну систему датчика випромінювання та направляється на чутливу матрицю детектора. ІЧ випромінювання, поглинаючись матричним детектором, перетворюється в електрорушійну сила, яка виникає в електричному ланцюзі, що складається з декількох різнорідних провідників, контакти між якими мають різні температури (ефект Зеєбека). Далі в мультиплексорі вибирається канал, з якого саме пікселя починається передача даних до підсилювача. Після цього відбувається перетворення аналогового сигналу в цифровий та компенсацією паразитних сигналів термістором. Цифровий сигнал потрапляє на блок керування та постійний запам'ятовуючий пристрій, де відбувається перетворення значення кожного пікселя в температуру. Передача даних на

мікроконтролер реалізується за рахунок інтерфейсу I2C. В свою чергу, обмін даними на сервер відбувається за рахунок принципу IoT, не без участі маршрутизатора, який слугує передачею пакетів даних між різними сегментами мережі на основі правил та таблиць маршрутизації. На сервері зберігаються дані, відбувається обробка та виведення вже готових термограм. З будь-якого користувацького пристрою можна зайти на сервер та отримати термограми, в будь-якому місці та будь-який час, що призводить до зручності та ефективності.

2.1. Вибір інфрачервоного датчика

Для нашої поставленої задачі потрібно обрати датчик ІЧ випромінювання. Одним з головних параметрів детектора є спектральний діапазон чутливості. Це обмежені межі електромагнітних хвиль, які впливають на речовини, з якого зроблений даний детектор. Для застосування зазвичай використовуються датчики детектування з чутливістю до дальньої межі діапазону ІЧ випромінювання 8-14 мкм. Поставлене завдання нас веде до оцінки та вибору одного з датчиків, а саме :

1. AMG8833 компанії Panasonic;
2. MLX90640 компанії Melexis;
3. AMG8831 компанії Panasonic.

Інфрачервоний (ІЧ) датчик MLX90640 компанії Melexis пропонує вигідну альтернативу більш дорогим високоякісним тепловим камерам. Цей пристрій розміром 32x24 пікселі підходить для програм безпеки та зручності, які включають системи протипожежної безпеки, розумні будинки, інтелектуальне освітлення, камери спостереження та виявлення зайнятості сидінь у транспортному засобі. Він має діапазон робочих температур від -40 ° С до 85 ° С і може вимірювати температуру об'єкта від -40 ° С до 300 ° С. Зберігаючи високі рівні точності в повній шкалі вимірювань, цей інфрачервоний датчик забезпечує типову точність температури цільового об'єкта ± 1 ° С. Він також демонструє чудові показники шуму . На відміну від альтернатив мікроболометру, датчик не потребує частого повторного калібрування,

						<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			<i>39</i>

забезпечуючи таким чином постійний контроль і знижуючи вартість системи. Melexis MLX90640 поставляється в компактному 4-контактному корпусі ТО39, що включає необхідну оптику. Цифровий інтерфейс, сумісний з I²C, спрощує інтеграцію. Особливості датчика MLX90640:

1. Діапазон робочих температур від -40 до 85 ° С, дозволяє застосовувати його в складних промислових умовах;
2. Може вимірювати температуру об'єкта від -40 до 300 ° С;
3. NETD всього 0,1 тис. Середньоквадратичних значень при частоті оновлення 1 Гц;
4. Не потрібно повторне калібрування відповідно до конкретних температурних вимог, що забезпечує більшу зручність та зменшує експлуатаційні витрати;
5. Два різні варіанти поля зору (FoV): стандартний 55 ° x35 ° та 110 ° x75 ° широкий кут;
6. 4-контактний пакет ТО39, що містить необхідну оптику;
7. Цифровий інтерфейс, сумісний з I²C, спрощує інтеграцію

Модулі AMG88 Grid-EYE від Panasonic – це практично повністю закінчена система тепловізійного бачення. Даний датчик може формувати термограму у вигляді матриці 8×8 та передавати його на керуючий контролер. Кожній клітці матриці відповідає температура об'єкта, який потрапив у зону елементарної частинки матриці. AMG88xx – це гібридна збірка, яка компактно та зручно розташована у металічному корпусі. Датчик має в розробці оптичну лінзу, керамічну основу, детектор ІЧ випромінювання у вигляді МЕМС матриці, термістор, цифро-аналогову інтегральну мікросхему, яка потрібна для обробки сигналів з матриці, керування та зв'язку з зовнішніми контролерами. На рисунку 2.2 представлено робочий діапазон детекторів від компанії Panasonic [12].

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40

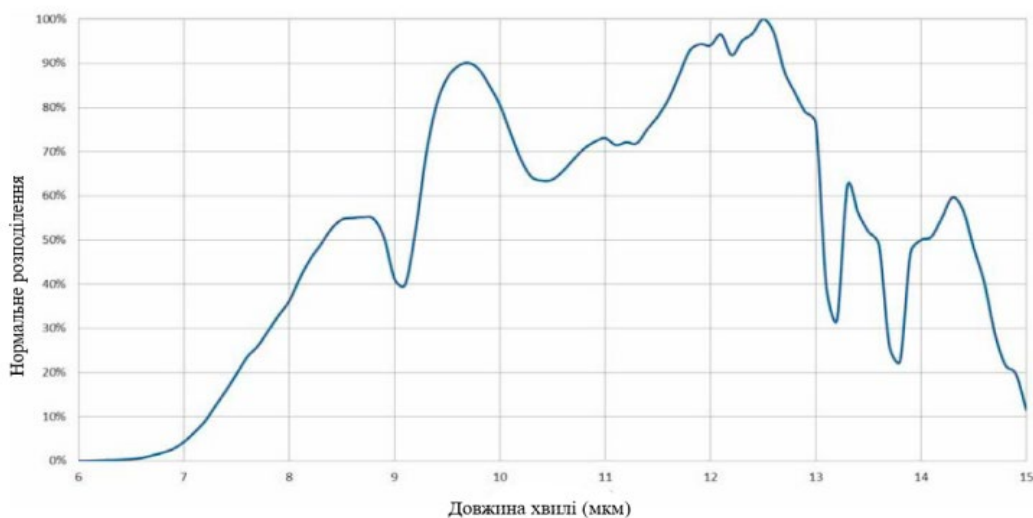


Рис.2.2. Спектральний робочий діапазон детекторів AMG88xx

Характеристики модулів Grid-EYE AMG88xx від компанії Panasonic:

- Робоча напруга 3,3В/5В
- Поточне споживання:
 - нормальний режим – 4,5 мА
 - режим сну – 0,2 мА
 - режим очікування – 0,8 мА
- Частота кадрів 10 Гц
- Температурна точність $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 4,5^{\circ}\text{F}$)
- Загальний кут поля зору: 60°

Особливості AMG88xx:

- Визначення температури двовимірної області: 8×8 (64 пікселі)
- Вихід I2C (можливість виведення значення температури)
- Діапазон температур вимірюваного об'єкта: від 0°C до 80°C (від $+32^{\circ}\text{F}$ до $+176^{\circ}\text{F}$)
- Відстань виявлення до 7 метрів

AMG88xx - це ІЧ-датчик сітчастого ока 8×8 від Panasonic, який містить вісім рядів по вісім пікселів, кожен з яких містить інфрачервоні термоелементи, здатні вимірювати випромінювання чорних тіл, в діапазоні довжини випромінювання 8-15 мкм. Зазвичай використовується в інфрачервоній матриці

температурних датчиків температури, в якій AMG88xx забезпечує високу точність виявлення температури. Крім цього, на сьогоднішній день, використання датчика можна знайти в автоматичних дверях/ліфтах та домашніх додатках, таких як кондиціонери. Для передачі даних з фотодетектора на мікроконтролер, який в подальшому передає масив значень на сервер, буде використовуватись інтерфейс I2C.

Для поставлених задач, зрівнюючи дані датчики - MLX90640 в деяких факторах переважає над датчиками компанії Panasonic, такі як

- більш висока якість зображення, за рахунок більшої роздільної матриці детектора;
- більший діапазон вимірювання температур.

Але компактність нашої системи, економічність, невелика частота передачі даних та постановка завдання не задовольняє використання даного датчика. Нашою поставленою задачею є детектування відхилення від нормального температурного діапазону, а не отримання якісного зображення. Ми можемо пожертвувати невеликою якістю зображення, в замін на більш швидку передачі даних з детектора. На рахунок перелічених факторів в даному завданні потрібно обрати датчик з решти вище компанії Panasonic AMG8833 або AMG8831. AMG8833 пропонує більш високу продуктивність, ніж попередній AMG8831, що є найголовнішим фактором в даній розробці, тому обираємо детектор ІЧ випромінювання компанії Panasonic AMG8833. Внутрішня структурна схема датчика представлена на рисунку 2.3.

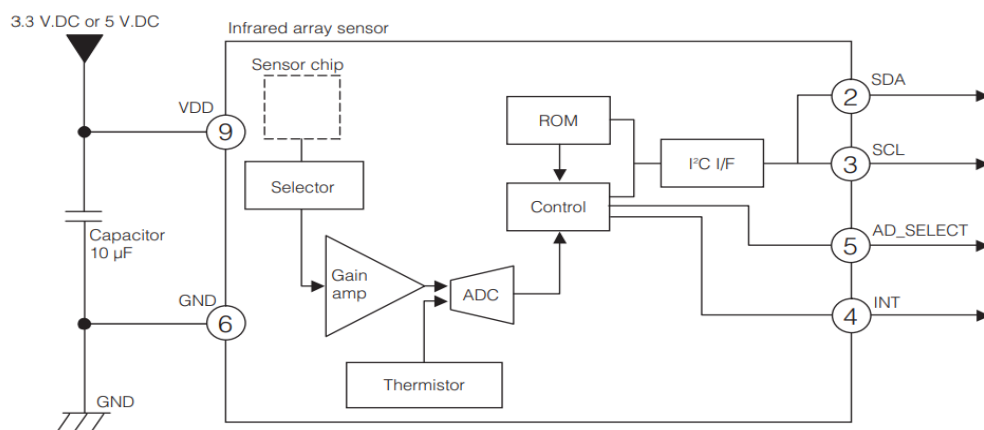


Рис.2.3. Структурна схема детектора AMG8833

					<i>Арк.А</i>
					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>42</i>

2.2. Вибір мікроконтролера

Для отримання та обробки сигналів з ІЧ датчика випромінювання потрібно підібрати датчик, який з легкістю впорається з даними задачами. На сьогодні, розробка мікропроцесорної техніки не стоїть на місці та з кожним днем ми можемо бачити нові технології виробництва мікроконтролерів під певні задачі. В нашому випадку нам не потрібно розроблювати мікроконтролер, наша задача є тривіальною, тому для нашої задачі потрібно розрахувати та підібрати певний мікроконтролер [13]. Використання мікроконтролерів призвело до ажіотажу використання певних марок, а саме:

1. ATmega168PA-AU
2. STM32F103
3. ESP8266 NodeMCU

Контролери-AVR були розроблені в 1996 році і відносяться до сімейства восьмибітних мікроконтролерів, спочатку випускалися компанією Atmel, а пізніше Microchip. У AVR-контролерів Гарвардська архітектура, процесор AVR має тридцять два 8-бітних регістра загального призначення, об'єднаних в регістровий файл. AVR-контролери піддаються програмуванню і спочатку програмувались тільки на Асемблері, але різні мови програмування, такі як C, Python і JavaScript, тепер також широко використовуються для їх програмування. Контролери ATmega168PA-AU TQFP-32 отримали дуже широке застосування, починаючи від пульта дистанційного керування і закінчуючи найскладнішими електричними пристроями. Контролери різних серій, мають різну кількість виводів вводу/виведення, від декількох штук, до декількох десятків. Щорічно контролери підлягають модифікації, що в свою чергу покращує і розширює їх функціонал, зменшуючи при цьому свої габарити. Потужність споживання контролерів в сплячому режимі дуже мала і становить декілька нановатт, більшу кількість контролерів, чудово підходить для довгої роботи від акумулятора. Microchip поєднує в собі 16 Кб флеш-пам'яті ISP з можливостями читання і запису, 512В EEPROM, 1 Кб SRAM, три гнучкі таймери / лічильники з режимами

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		43

порівняння, внутрішні та зовнішні переривання, послідовно програмований USART, байт-орієнтований двопровідний послідовний інтерфейс, послідовний порт SPI, 6-канальний 10-бітний, внутрішній генератор та п'ять режимів енергозбереження, які можна вибрати. Пристрій може працювати від 1,8 В-5,5 В.

Фірма STMicroelectronics (STM) однією з перших приступила до серійного випуску 32-розрядних Flash-мікроконтролерів, в основу яких було закладено ядро ARM Cortex-M3, розроблене спеціально для вбудованих застосувань. Прилади нового сімейства, який отримав назву STM32, надали розробникам розширені можливості архітектури Cortex-M3, при провідному в галузі малому енергоспоживанні. Низький рівень споживання енергії мікроконтролерів сімейства STM32 в робочому режимі в ще більшій мірі знижується за рахунок використання ряду режимів енергозбереження, що сприяє оптимізації робочих характеристик таких застосувань, як промислове обладнання, контролери обслуговування будівель, медична апаратура, периферія комп'ютерів і т. п. Ядро процесора Cortex-M3 побудовано з використанням Гарвардської архітектури з 3-рівневим конвеєром, в поєднанні з рядом розширених функцій, включаючи одноцикловий помножувач і апаратний дільник, що забезпечують виключно високу продуктивність в 1,25 МГц. Процесор Cortex-M3 працює також з новою системою команд Thumb-2, яка, в поєднанні з такими функціями, як зберігання невіривняні даних і побітова обробка, забезпечує 32-розрядну продуктивність при вартості, еквівалентній вартості сучасних 8- і 16-розрядних мікроконтролерів. Основними ресурсами та особливостями мікропроцесорів серії STM32F103 є наступні:

- 51 швидкий порт вводу-виводу. Всі порти вводу-виводу можуть бути зіставлені з 16 зовнішніми перериваннями, і майже всі порти дозволяють вводити сигнал 5В.
- 2 12-бітових аналого-цифрових перетворювача, 16 зовнішніх вхідних каналів, швидкість перетворення може досягати 1 МГц, а діапазон перетворення становить 0 В ~ 36 В; 3 подвійною функцією вибірки та

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		44

утримання; усередині вбудований датчик температури, який може зручно вимірювати температуру процесора.

- Гнучка 7-канальна DMA загального призначення може управляти передачею даних з пам'яті в пам'ять, з пристрою в пам'ять та з пам'яті на пристрій без будь-якого втручання центрального процесора. Дані можна швидко переміщати за допомогою DMA, а ресурси процесора можна використовувати для інших операцій. Контролер DMA підтримує управління кільцевим буфером, що дозволяє уникнути переривань, що генеруються, коли передача контролера досягає кінця буфера. До периферійних пристроїв, які він підтримує, належать таймери, АЦП, SPI, I2C та USART.
- Режим налагодження: підтримує стандартну 20-контактну налагоджувальну імітацію JTAG та послідовну однопровідну налагоджувальну функцію (SWD) для ядра Cortex-M3. Зазвичай типовим інтерфейсом налагодження є інтерфейс JTAG.
- Мікропроцесор серії STM32F103 містить 7 таймерів.
- Містять комунікаційні інтерфейси: три асинхронних послідовних інтерфейсу зв'язку USART, два інтерфейси I2C, два інтерфейси SPI, один інтерфейс CAN та один інтерфейс USB, що забезпечують гарантію передачі даних [14].

Розвиток NodeMCU ESP8266, на сьогоднішній день, поставляється з модулем ESP-12E, що містить ESP8266 чіп, який має Tensilica Xtensa 32-розрядний RISC - мікропроцесор LX106. Цей мікропроцесор підтримує RTOS і працює на частоті від 80 МГц до 160 МГц. NodeMCU має 40 Кб оперативної пам'яті та 4 Мб флеш-пам'яті для зберігання даних та програм. Висока потужність обробки завдяки вбудованим функціям Wi-Fi/Bluetooth та функціям глибокого сну роблять його ідеальним для проектів IoT. NodeMCU можна жити за допомогою гнізда Micro USB та VIN-контакту (зовнішній контактний штифт). Підтримує інтерфейси UART, SPI та I2C. Особливості мікроконтролера ESP8266:

- розміри 5 мм×5 мм

									Арк.А
									45
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата					

- 32-бітний процесор мікропроцесор (Tensilica Lx106)
- робоча напруга 3.0В - 3.6В
- робочий струм 80мА
- діапазон робочих температур від -40°C - 120°C
- модуль Wi-Fi з діапазоном частот 2,4 ГГц -2,5 ГГц з режимами: Station/SoftAP/SoftAP+Station.
- мережеві протоколи: IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP
- безпека: WPA/WPA2
- шифрування: WEP/TKIP/AES
- низька потужність
- мова програмування мікроконтролера C/C++/Python

Для того, щоб підібрати певний мікроконтролер, потрібно розрахувати, який об'єм пам'яті потрібно нам мати, для збереження інформації та відправки її на сервер. AMG8833 має роздільну здатність 8×8, що відповідає 64 пікселям. З частотою 10 кадрів на секунду ми повинні отримувати 64 пікселя значення температури та відправляти їх на сервер. Максимальне значення пам'яті, яке може займати один піксель дорівнює 7 біт. З чого слідує, що розрахувати кількість мінімальної пам'яті мікроконтролера можна відносно формули приведеної нижче:

$$SRAM_{min} = (2(n * b)) * 25\% \quad (2.1)$$

де $SRAM_{min}$ – кількість мінімальної пам'яті мікроконтролера для коректної роботи, n – коефіцієнт, який вказує кількість пікселів, b – коефіцієнт, який вказує кількість зайнятої пам'яті одним пікселем. Для підбору ідеального мікроконтролера, розраховуємо формулу приведену вище, використовуючи наші значення:

$$SRAM_{min} = (2(64 * 7 \text{ біт})) * 25\% \quad (2.2)$$

$$SRAM_{min} = 140 \text{ байт} \quad (2.3)$$

Як видно з розрахунків, пам'ять мікроконтролера не повинна бути меншою за 140 байт. Для поставленої задачі мікроконтролери, які приведені вище,

										Арк.А
Змн.	Арк.А	№ док.№	Підпис	Дата						46

відповідають кількістю ОЗУ 1Кб, 20Кб та 50Кб відповідно до списку. Відповідно до зазначених характеристик , переважає мікроконтролер ESP8266 NodeMCU. Відповідно до розробки смарт-тепловізора, головною задачею якого є передача даних на сервер принципом IoT, мікроконтролер повинен бути обладнаний модулем Wi-Fi. Серед мікроконтролерів, з яких ми вибираємо, таким модулем оснащений тільки ESP8266 NodeMCU. Проаналізувавши критерії вибору компоненту, для розробки дипломної роботи використовуємо мікроконтролер виробництва Espressif Systems з інтерфейсом Wi-Fi ESP8266 NodeMCU. Функціональна схема мікроконтролера ESP8266 NodeMCU на рисунку 2.4.

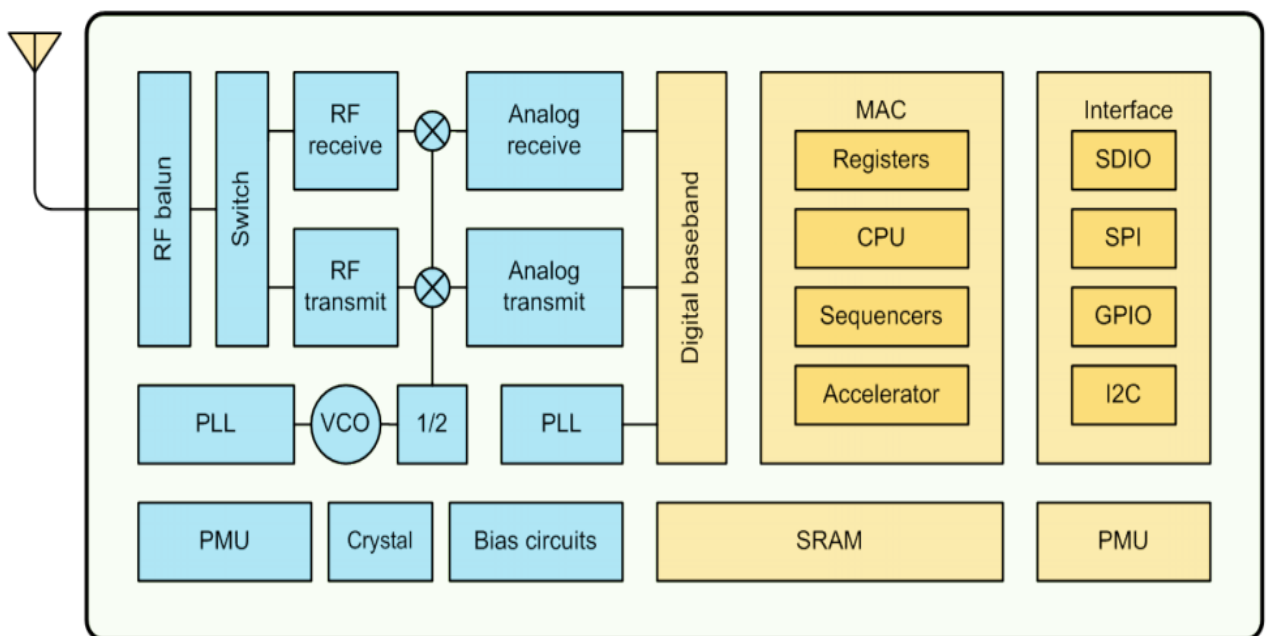


Рис.2.4. Функціональна блок-схема ESP8266.

У ESP8266 реалізований повний 802.11 b/g /n/e/i WLAN MAC протокол з підтримкою специфікації Wi-Fi Direct. Можлива робота не тільки в режимі BSS, але і робота в групі P2P відповідно до останнього протоколом Wi-Fi P2P. Всі низько рівневі функції WiFi протоколу обробляються ESP8266 NodeMCU автоматично:

- RTS / CTS
- підтвердження

- фрагментація і дефрагментація
- агрегація
- інкапсуляція фреймів (802.11h / RFC тисячі сорок дві)
- автоматичні моніторинг / сканування beacon-пакетів
- P2P Wi-Fi Direct

2.3. Розрахунок параметрів тепловізора

Еквівалентна потужність шуму (NEP)

Чутливість фотодетектора є зручною метрикою, за якою продуктивність відповідного детектора може бути кількісно визначено і порівняно з іншими детекторами. Однак це може бути важко визначити та перевірити. Еквівалентна потужність шуму (NEP) - загальна метрика, яка кількісно визначає чутливість фотодетектора або потужність, що генерована джерелом шуму. Але навіть ця загальна метрика може спричинити плутанина з огляду на різні визначення та обчислювальні методи, що використовуються для його опису [15]. Найчастіше використовуване визначення для NEP є наступним: потужність вхідного сигналу, яка призводить до генерування вихідної напруги (або струм) фотодетектора, дорівнює середньому значенню напругі (або струм) шуму. Еквівалентна потужність шуму визначається як

$$NEP = \frac{V_n}{\mathfrak{R}} \quad (2.4)$$

де V_n – середнє значення шумової напруги детектора, \mathfrak{R} – чутливість фотодетектора до напруги.

По суті, NEP виражає мінімум детектуючої потужність на пропускну здатність квадратного кореня даного фотодетектора; або, іншими словами, це найслабша міра оптичного сигналу, який можна виявити. Бажано мати NEP якомога нижче, оскільки низьке значення NEP відповідає нижчому рівню шуму, що відповідає більш чутливому детектору. Низький рівень NEP є вигідним, оскільки він призведе до зниження шумових характеристик вихідного сигналу.

Еквівалентна температурна різниця по шуму (NETD)

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ док.№	Підпис	Дата		48

Еквівалентна температурна різниця по шуму (NETD) – це показник, який показує на скільки тепловізійних детектор здатний розрізняти дуже малі відмінності в тепловому випромінюванні зображення. NETD зазвичай виражається в мілі-кельвінах (мК). Його також іноді називають "тепловим контрастом". Коли шум еквівалентний найменшій вимірюваній різниці температур, детектор досяг межі своєї здатності розпізнавати корисний тепловий сигнал. Чим більше шуму, тим вище значення NETD детектора.

Типові значення для неохолоджених мікроболометрових детекторних теплових камер становлять близько 45 мК. Наукові камери з детекторами на основі фотонів та криогенним охолодженням можуть досягти значень NETD близько 18 мК.

NETD включає деякі фундаментальні параметри та NEP, а також параметри, які пов'язані з оптикою. На рис 2.5 приведена спрощена оптична структура, яка застосовується у тепловізорах.

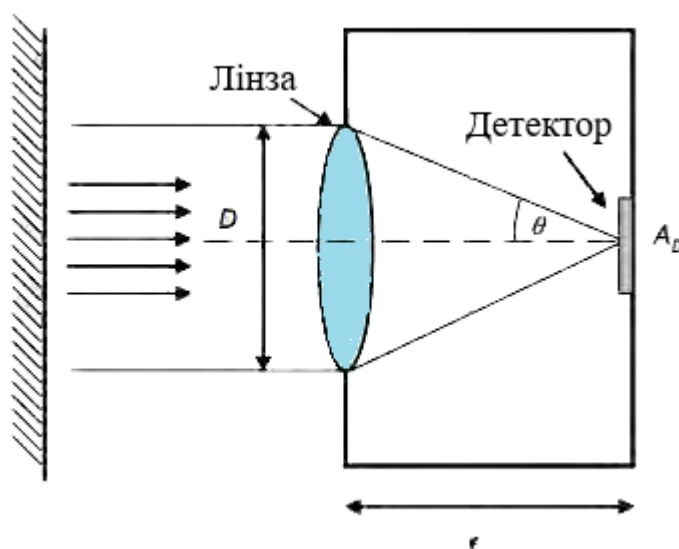


Рис.2.5. Структура оптичної системи об'єктиву тепловізора.

Для визначення змінення потужності падаючого випромінювання на фотодетектор, через зміну одного Кельвіна можна визначити наступним чином

$$\frac{\Delta p_{tar}}{dT_{tar}} = \left(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} A_D \sin^2 \theta \quad (2.5)$$

де, θ - половина кута поля зору, A_D - одинична елементарна ділянка активного детектора, $(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}})_{\lambda_1-\lambda_2}$ це зміна випромінюваної потужності на цільовій стороні на один Кельвін і на одиницю площі для π стер-радіанів. Цей вираз залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання.

Якщо ми маємо геометричні системи, то $\sin\theta$ можна розрахувати як

$$\sin^2\theta = \frac{1}{4(\frac{f}{D})^2 + 1} \quad (2.6)$$

де f - фокусна відстань, а D – діаметр оптичної системи. F-число (F) визначається як

$$F = \frac{1}{2\sin\theta} \quad (2.7)$$

Визначившись з параметрами приведеними вище, можна розрахувати еквівалентну різницю температури по шуму (NETD). Значення вимірювання шуму слід вказувати при певній температурі об'єкта, оскільки це впливає на вимірювання. NETD виражається як

$$NETD = \frac{4F^2 V_n}{A_D (\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}})_{\lambda_1-\lambda_2} * \mathfrak{R}} \quad (2.8)$$

де, F - число F-оптики, V_n - електричний шум, A_D - зона активного детектора, \mathfrak{R} - відгук, а вираз в дужках $(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}})$ – константа, яка розписана раніше. Для знаходження невеликих значень температури, $NETD \rightarrow 0$.

Відображальна здатність тепловізора (D^*)

Відображальна здатність тепловізора (D^*) – це параметр за допомогою якого можна порівнювати продуктивність різних детекторів з розмірами пікселів. Даний параметр можна розраховувати при великій швидкості сканування, а розраховується як

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \Delta f}}{NEP} \quad (2.9)$$

де A_D – діапазон активного пікселя, Δf – електрично-смугове пропускання. Високе значення D^* вказує на кращу чутливість детектора та низьку спектральність щільність шуму. Якщо сканування відбувається з однаковою швидкістю, а напруга шуму зростає квадратно електричної смуги пропускання,

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		50

то можемо порівнювати детектори з використанням відображальної здатності тепловізора, які мають різні пропускарні смуги. Після підвищення площини детектора, більша частина детекторів з відношення сигнал/шум напряду залежить від квадратного кореня ділянок детекторів. Даний фактор при нормалізації шумової напруги дозволяє порівняти різні активні діапазони детекторів [16].

Фокусна відстань тепловізора

Інфрачервона камера містить оптичну систему, яка фокусує інфрачервону енергію на спеціальну мікросхему детектора (матрицю датчиків), яка містить тисячі пікселів детектора, розташованих у вигляді сітки. Оптична система є однією з головних частин будь-якого тепловізора, тому як вона відводиться для фокусування від об'єктів теплового випромінювання, на чутливий датчик для цього випромінювання. Для побудови оптичної системи головним аспектом вибору є можливість задавання оптичного матеріалу. Тому головним аспектом є розрахунок відносної часткової дисперсії. Відносна часткова дисперсія визначається наступним чином:

$$dPgF = \frac{N_d - N_g}{N_F - N_C} \quad (2.10)$$

Де N – показник заломлення оптичного матеріалу для довжин хвиль ліній d , g , F , C спектру відповідно.

Фокусна відстань лінзи - це оптична відстань (зазвичай вимірюється в мм) від точки з'єднання світла всередині лінзи до датчика камери. Коли використовується об'єктив камери з короткою фокусною відстанню, наприклад 18 мм, отримана фотографія має ширший кут огляду. Об'єктиви з більшою фокусною відстанню, наприклад 200 мм, дають вузчі кути огляду. На рисунку приведено рисунок 2.6 фокального відрізка.

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
						51
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

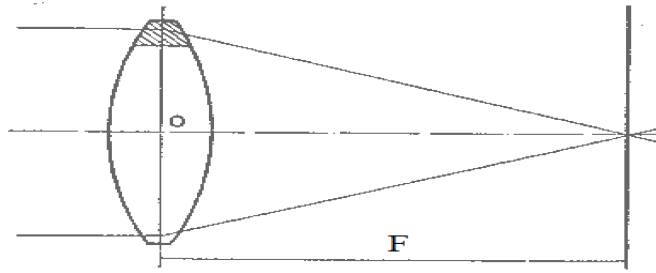


Рис.2.6. Хід променів через лінзу:

F- головний фокальний відрізок

Для розрахунку фокусної відстані об'єктива застосовуються формули:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{L} + \frac{1}{f} \quad (2.11)$$

де L- відстань між об'єктивом та предметом (7м та менше), f- довжина всієї оптичної системи. В нашому випадку довжина всієї оптичної системи не перевищує 100мм.

Після підстановки отримаємо:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{7000} + \frac{1}{100} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{F} = 0.001 + 0.01 \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{F} = 0.01 \quad (2.14)$$

$$F = \frac{1}{0.01} = 100\text{мм} \quad (2.15)$$

Можна виконати розрахунок оптичної роздільної здатності об'єктива. На рисунку 2.7 представлено розрахунок оптичного дозволу об'єктива.

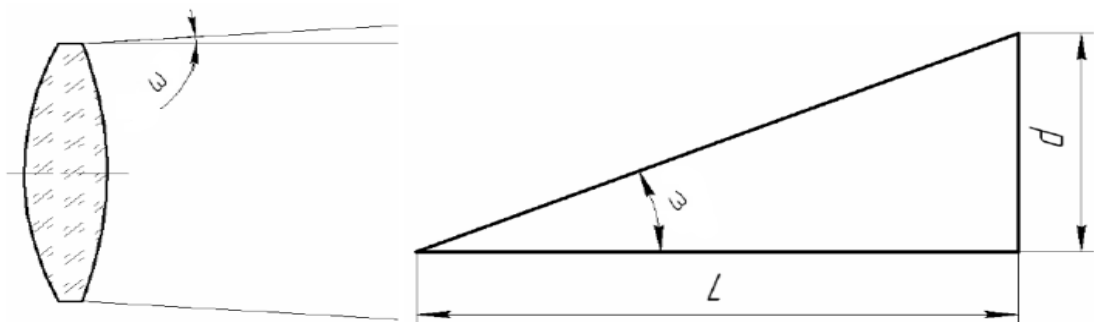


Рис.2.7. Оптична роздільна здатність об'єктива

На рисунку 2.1 трикутнику, L - відстань між об'єктивом та предметом, d - половина довжини вимірювального предмету. Відносно співвідношень сторін та кутів прямокутного трикутника маємо:

$$d = L * tg(w) \quad (2.17)$$

Кут поля зору елементарної частинки (пікселя) фотодетектора ІЧ випромінювання дорівнює $7,5^\circ$, тому

$$\frac{tg(7,5^\circ)}{2} = 0,065 \quad (2.18)$$

З чого слідує, що:

$$d = 0,065L \quad (2.19)$$

$$2d = 0,13L = S \quad (2.20)$$

де S :

$$2d = S \quad (2.21)$$

Підсумок розрахунку:

$$\frac{L}{S} = \frac{1}{0.13} \quad (2.22)$$

$$\frac{L}{S} = 7,69 : 1 \quad (2.23)$$

Оптична роздільна здатність даного смарт-тепловізора дорівнює 7,69:1. Це означає, якщо знаходитись на відстані 3м, детектор здатний виміряти температуру контрольованого об'єкта розміром 39см. Але на практиці внаслідок шумів та засвічень – точність вимірювання температури значно зменшується. Для збільшення оптичної роздільної здатності тепловізора застосовують детектор ІЧ випромінювання з меншим розміром чутливої площадки [17].

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		53

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА ЧАСТИНА

Для програмної реалізації було розроблено та побудовано алгоритм системи смарт тепловізора, який приведено на рисунку 3.1.

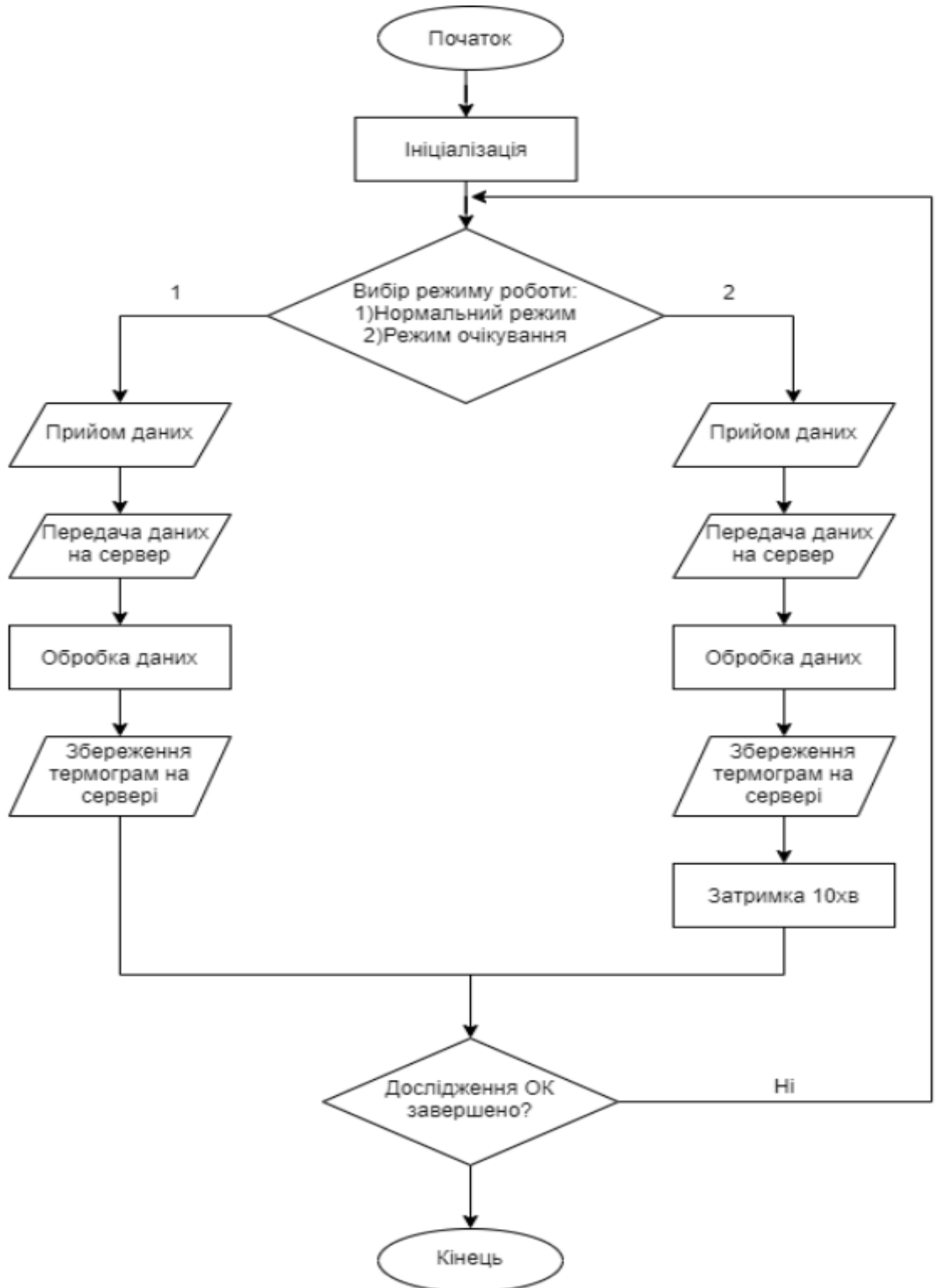


Рис.3.1. Блок-схема роботи смарт-тепловізора.

Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата

Запропонований алгоритм роботи смарт-тепловізора реалізований за допомогою мікроконтролера ESP8266, датчика ІЧ випромінювання AMG8833 та безкоштовного сервера від компанії Brainy, на якому написано програмне забезпечення, за допомогою якого відбувається обробка, зберігання та виведення термограм. На початковому етапі алгоритму даної системи відбувається ініціалізація всіх змінних для подальшої роботи з ними. Після введення змінних ми повинні обрати режим роботи смарт-тепловізора.

Робота тепловізора поділяється на два режими:

1. Нормальний режим – це режим при якому прийом, передача та обробка даних відбувається без затримки. Поточне споживання струму датчика та мікроконтролера в такому режимі досягає 4,5 мА та 80 мА відповідно;
2. Режим очікування – це режим схожий повністю до нормального, але після обробки даних відбувається затримка дослідження ОК на 10 хвилин. За рахунок даної затримки ми зменшуємо поточно споживання струму мікроконтролера та датчика більше ніж в 7 разів. Даний режим актуально застосовувати, коли наша система живиться від батареї, або коли постійний контроль відхилення від норми ОК нам не потрібно.

Після отримання даних на сервері, відбувається перевірка умови чи закінчилось дослідження об'єкта. Якщо контроль об'єкта ще не закінчено, все починається знову з етапу вибору режиму роботи, якщо навпаки – алгоритм роботи закінчується та програма припиняє працювати.

Для реалізації алгоритму системи смарт-тепловізора, було запропоновано розділити написання програмного забезпечення на два етапи, а саме:

1. Написання скетчу для мікроконтролера ESP8266 та датчика AMG8833.
2. Програмний код для отримання та обробки даних на сервері.

3.1.Написання скетчу для мікроконтролера ESP8266 та датчика AMG8833

Програмування мікроконтролера для передачі даних принципом IoT відбувалось в програмному середовищі Arduino IDE. Серед розробки включає

						<i>Арк.А</i>
					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		55

вбудований текстовий редактор програмного коду, області повідомлень, консоль, панелі інструментів та багато різних комфортних меню для використання. Інтегрована середовище розробки розроблена для мов програмування C та C++, призначена для створення та завантаження програм на Arduino-сумісні плати, а також на плати інших виробників.

Мовою програмування ESP8266 було обрано C, яка володіє простим синтаксисом, великим підбором вже готових рішень та багатим запасом бібліотек. Написання скетчу для мікроконтролера повинно бути розбите на декілька функцій, які виконуються по чергові, що призводить до більш структурованого програмування та легкого сприйняття написаного програмного коду [18]. Відносно поставленого завдання було вирішено розбити скетч на програмно-логічні блоки, а саме:

1. Ініціалізація всіх змінних та бібліотек;
2. Налаштування з'єднання з сервером;
3. Зчитування даних з датчика AMG8833;
4. Формування запиту та передача даних на сервер.

Ініціалізація всіх змінних та бібліотек

Одним з головних кроків для успішного написання програмного коду є ініціалізація всіх змінних, підключення необхідних бібліотек та аналіз вже існуючих методів підбору та вибору готових рішень на базі Arduino-сумісних плат. Для написання скетчу під ESP8266, датчик AMG8833 та використана модулю Wi-Fi потрібно використовувати відповідні бібліотеки. Для їх підключення можна скористатися зручним інтерфейсом Arduino IDE та автоматично завантажити відсутні компоненти [19]. Після завантаження відповідних компонентів, однією з головних задач є підключення до Wi-Fi, дані сервера та об'явлення змінних, які відповідають за адресу підключення та масив даних, який відправляється. З огляду на дані фактори нам потрібна назва та пароль точки доступу, адреса та порт підключення до веб-серверу. Для подальшої роботи над датчиком створюється екземпляр класу масиву пікселів та самого датчика. Код ініціалізації змінних та бібліотек приведено в Додатку А.

										Арк.А
										56
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата						

Налаштування з'єднання з сервером

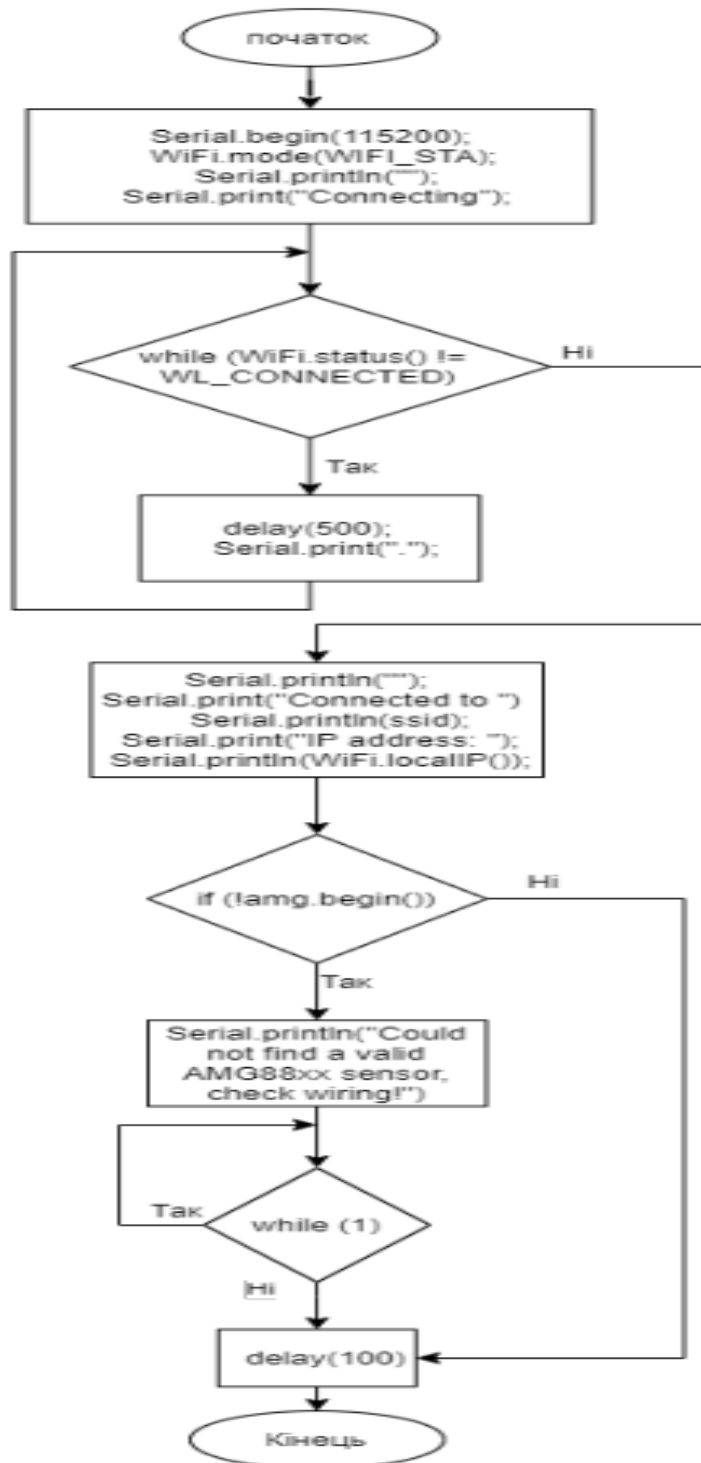


Рис.3.2. Алгоритм налаштування з'єднання з сервером.

Для того щоб підключити наш мікроконтролер до нашого сервера, нам потрібно слідкувати за статусом підключення та відлагоджувати за потребою невдалі спроби підключення. Налаштування, які будуть відпрацьовані, до того як включиться наш мікроконтролер, це перш за все монітор порту, з якого ми можемо моніторити підключення ESP8266 до точки доступу, в нашому випадку

ми обрали 115200- швидкість, на якій буде спілкуватися наш мікроконтролер з сервером. Для легшого моніторингу підключення було розписано умови, при яких буде виведено статус підключення та адреса назначена ESP8266. Після підключення мікроконтролера, буде проведено перевірку підключення ІЧ датчика AMG8833 до ESP8266. Підключення датчику відбувається за допомогою інтерфейсу передачі даних I2C. Для використання даного протоколу потрібно всього дві сигнальні лінії, що призводить до гнучкої швидкості передачі даних [20]. Блок-схема налаштування з'єднання з сервером та код програми приведено на рисунку 3.2 та Додатку Б відповідно.

Зчитування даних з датчика AMG8833

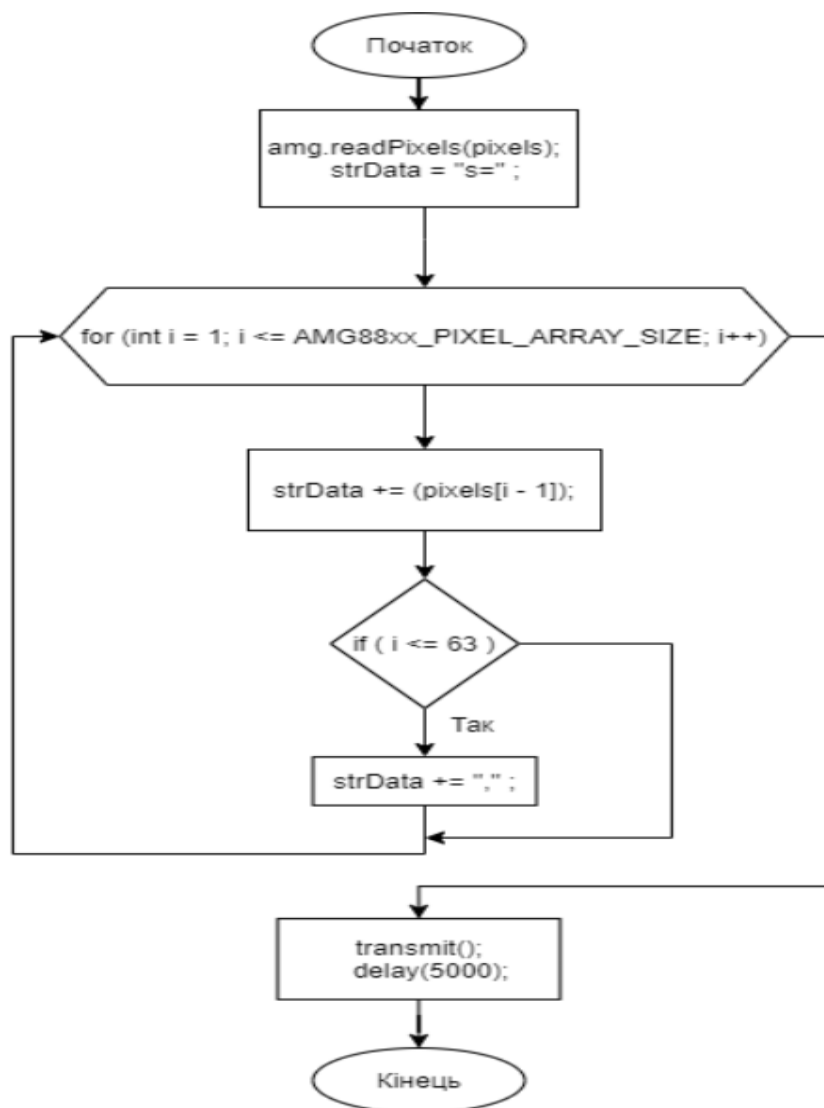


Рис.3.3. Алгоритм зчитування даних з датчика AMG8833.

Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата

За допомогою даної функції ми можемо отримувати стан кожного пікселя, в нашому випадку відповідно до даташиту датчика, через шину I2C ми повертаємо температурне значення кожного пікселя. За допомогою циклу For, зібрати дані стану пікселів не важко, одночасно відбувається редагування отриманих даних, а саме встановлення зап'ятих після кожного температурного значення. Масив отриманих значень записується в постійну змінну та в подальшому переходить до запуску функції формування запиту та передачі пакету даних до серверу. На рисунку 3.3 представлено алгоритм роботи зчитування даних з датчика. В Додатку В представлено програмний код даного алгоритму.

Формування запиту та передача даних на сервер.

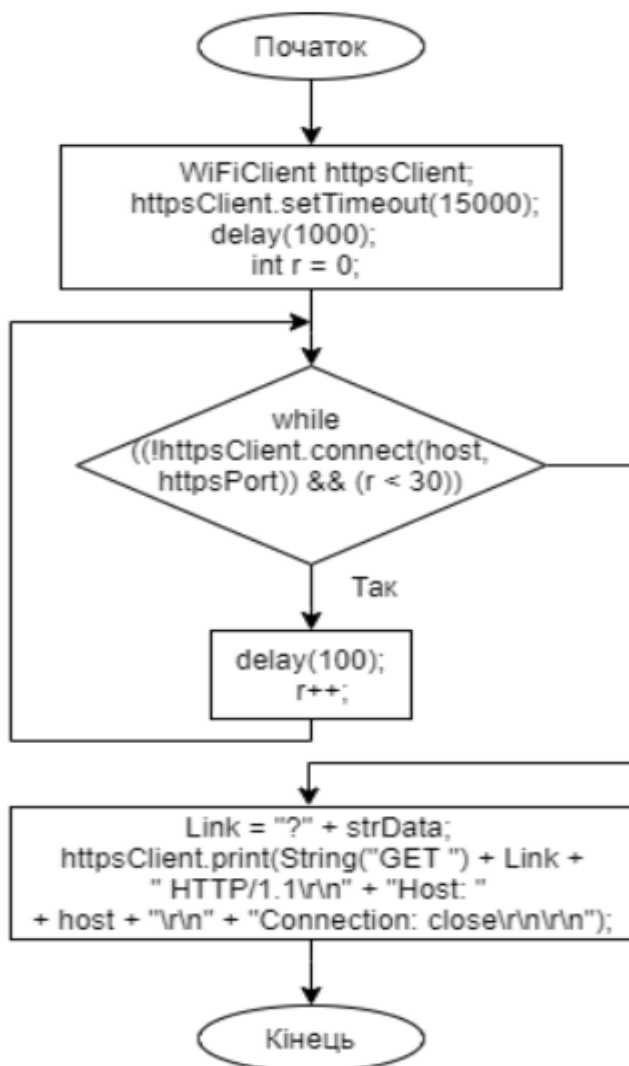


Рис.3.4. Алгоритм формування запиту та передача даних на сервер.

Головною задачею до даного програмно-логічного блоку - є відправка даних Wi-Fi модулем та формування GET запиту, звернення до програмного файлу, який знаходиться на сервері та додавання параметрів запиту. Також в програмному коді прописані умови, за яких ми можемо автоматично спостерігати відправку даних на сервер, робити затримку та перевіряти стан підключення до даного клієнта. Алгоритм написаного коду формування запиту та передачі даних на сервер приведено на рисунку 3.4 та сам код програми представлено в Додатку Г.

3.2. Програмний код для отримання та обробки даних на сервері

Для реалізації отримання та обробки даних потрібно обрати сервер. В даній задачі було обрано безкоштовну та функціональну серверну хостінг-панель від розробників BrainyCP . За допомогою даної розробки можна облегшити управління сервером та автоматизувати всі серверні процеси. Головною перевагою даного серверу є засоби управління VPS, файлова система, база даних, багатомовність та багато іншого. Сервером можна повністю керувати за допомогою вбудованої консолі на Windows або Linux, як за аналог було обрано Cygwin Terminal. Cygwin - це колекція інструментів із відкритим кодом, що дозволяє компілювати та запускати програми Unix або Linux в операційній системі Windows із інтерфейсу, подібного до Linux [21]. Використовуючи Cygwin, можна легше забезпечити віддалену підтримку програм. Для отримання та обробки термограм було вирішено використовувати об'єктно орієнтовану мову програмування Python. Використання даної мови програмування, призвело до ряду переваг над іншими, однією з головних переваг є готові рішення обробки даних та графічне їх представлення. Наявність в даній мові великої кількості різноманітних модулів обчислення, що підключаються до програми, призводить до вирішення даної задачі багатьма шляхами. В даній роботі було вирішено програмне забезпечення розділити на дві основні групи, а саме:

1. Отримання даних від мікроконтролера та запис їх до текстового файлу;

									Арк.А
									60
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата					

2. Обробка записаних даних та зберігання їх в файловому менеджері.

Отримання даних від мікроконтролера та запис їх до текстового файлу

Для отримання та збереження даних від мікроконтролера потрібно розробити певні функції та класи. Для роботи з Wi-Fi модулем та іншими використовуваними функціями потрібно підключити відповідні бібліотеки та задати налаштувати адресу та порт для отримання запитів від мікроконтролера. Для обробки та отримання даних було вирішено написати відповідні функції для покращення сприйняття програмного коду. Головні функції, які забезпечують обробку та отримання даних:

- Функція `xr_data_to_float_arg` – це метод, який приймає не оброблені дані від мікроконтролера. Головною задачею даної функції є розбиття даних по зап'ятим, що призводить до одномірного масиву довжиною в 64 елементи. Розбиття одномірного масиву призводить до перегрупування елементів в масив 8×8 та перетворення строкових значень до дробового числа.
- Функція `get_valid_filename` – це метод за допомогою якого ми можемо прибрати невалідні символи для ім'я файлу.
- Функція `save_raw_data` - це метод, який призводить до отримання поточної дати та розбиття даних на підмасиви по 48 символів. В подальшому отриманий масив строк з'єднується символом переносу. До відправки даних в файл додається спочатку поточна дата, а в подальшому отриманні температурні значення.
- Функція `process_data` – це метод, в якому відбувається запуск всіх функцій приведених вище, а саме:
 - ✓ отримання поточної дати;
 - ✓ видалення невалідних символів;
 - ✓ збереження даних;
 - ✓ перетворення даних в матрицю чисел;

										Арк.А
										61
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата						

Для отримання даних було розроблено клас MyServer. Даний клас запускається при отриманні GET від мікроконтролера. Для збору та систематизації даних використовується парсинг. За допомогою даного принципу ми можемо перетворювати текстову інформацію у внутрішні структури даних. Виконується умова перевірки на надходження даних, що в позитивній формі призводить до подальшої їх обробки. Після запуску програмного коду з консолі, в даній програмі є головний блок, який являє собою точку входу в програмне середовище та запуск всієї системи. В даному програмному блоці створюються папки для збереження термограм, даних та екземпляр класу для подальшої роботи над даним методом [22]. Програмний код отримання та збереження даних приведено в Додатку Д.

Обробка записаних даних та зберігання їх в файловому менеджері

Для обробки записаних даних до текстового файлу, було вирішено написати окремий програмний код під назвою файлу `heatmap_transform`, який автоматично читає дані з текстового файлу та будує термограму. Метод, який є основний даного файлу має назву `save_heatmap`, приймає під аргументами матрицю вже збережених та оброблених температурних значень, та ім'я для файлу. Для обробки масиву значень, їх потрібно створити, що в подальшому призведе до створення термограми. Після аналізу створеної термограми, було вирішено використання інтерполяції зображення, тому як термограма не несла доцільної інформації. Інтерполяційна функція дуже ефективно реалізована в мові програмування Python. Експериментально було вирішено використовувати лінійну 2D інтерполяцію [23]. Бібліотечна функція `interp2d` повертала інтерполяційну функцію. Після вибору типу інтерполяцію задаємо координати інтерполяції відносно осей координат. В нашому випадку, для первинного зображення 8×8 пікселів, інтерполяція 128×128 вдосталь. Завершення роботи інтерполяційної функції в подальшому призводить до створення термограм та шкали відповідності кольору. В завершені роботи даної функції це збереження термограми під певною датою та чищення буферу картинок, що в негативному випадку може призвести до засмічення пам'яті.

											Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата							62

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1.Опис експерименту

Після побудови смарт-системи, першочерговою ціллю є перевірка правильності роботи тепловізійної системи на еталонних зразка та аналіз отриманих даних. В дипломній роботі приведено опис експерименту смарт-тепловізора. За основу ОК було обрано системні відеокарти, які мали постійну складову температури та могли регулюватись програмним забезпеченням, які проілюстровані на рисунку 4.1.



Рис.4.1. Обраний ОК

На сьогоднішній день, даний ОК застосовується скрізь та має велику процентну властивість до перегріву, що призводить до виходу з ладу всієї системи, що в свою чергу несе великі збитки виробництву. Для експерименту було обрано чотири відеокарти з робочим температурним діапазоном 50°C-60°C. Проводячи температурні заміри, для конкретизації завдання, було обрано одну відеокарту, яка в ході експерименту буде підвищувати та знижувати свою

										Арк.А
										63
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата						

ПК71.17.0000.000 ПЗ

температуру програмно. Експеримент проводився на різних відстанях до ОК, а саме:

1. 30 см до ОК;
2. 1 м до ОК;
3. 2 м до ОК.

Відносно розрахунків приведених в розділі 3, тепловізійний датчик може детектувати ІЧ випромінювання з ОК мінімальними розмірами якими є 3,9 см, 13 см та 26 см відповідно до списку експерименту. Протягом експерименту шумові завади мали великий вплив на ІЧ випромінювання, такими завадами можуть слугувати:

1. Велика кількість не досліджуваних об'єктів;
2. Наявність шумів;
3. Знаходження людей в досліджуваному приміщенні.

Після проведення експериментальних даних можна порівняти значення еталонних температур, які задано програмно, та зрівнявши температурні показання, ми можемо проаналізувати ефективність системи в такій сфері використання [24]. Для комфортної експлуатації приладу було зібрано експериментальний макет смарт-тепловізора, який представлено на рисунку 4.2.



Рис.4.2. Зібраний макет смарт-тепловізора

4.2. Аналіз експериментальних даних

Головною задачею експерименту є виявлення ІЧ випромінювання від об'єкті контролю, ефективна фіксація його на детекторі та аналіз оброблених програмним забезпеченням термограм. Для аналізу експериментальних даних, потрібно використовувати еталонні значення температури ОК, які ми можемо задати програмно. Для першого експерименту було проведено детектування ІЧ випромінювання ОК на відстані 30 см. На рисунку 4.3 представлено проведення експерименту смарт-тепловізора.

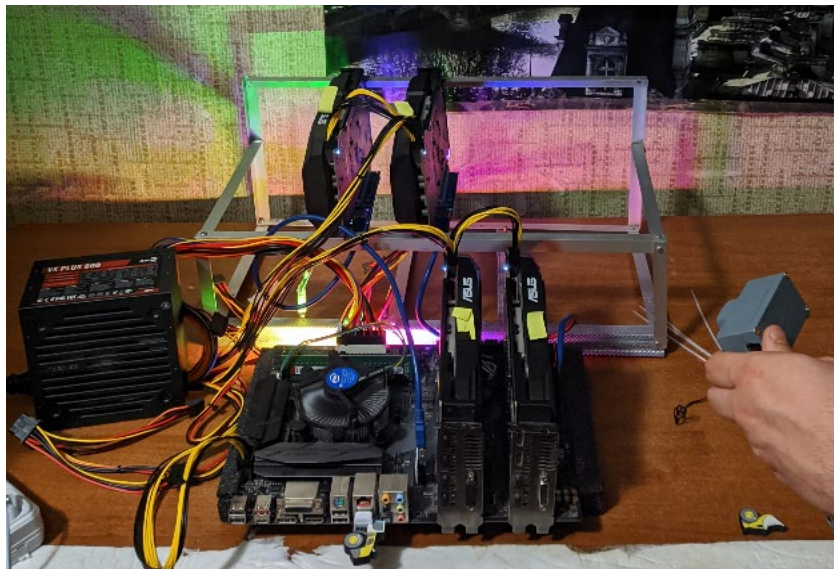


Рис.4.3. Проведення експерименту на відстані 30 см

Після підключення смарт-тепловізора до струму та наведення його на експериментальний ОК, на сервері автоматично сформувались термограми з частотою 10 кадрів на секунду. На рисунку 4.4 представлено вид файлового менеджера, в якому у відповідній серверній папці з заданою частотою зберігаються оброблені термограми.

На рисунку 4.5 представлено термограму з відеокарти на відстані 30 см. Програмно максимальна температура ОК було задано 69°C . Як видно з термограми, температура експериментального об'єкта приблизно дорівнює температурному діапазону в межах 70°C .

									Арк.А
									65
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата					

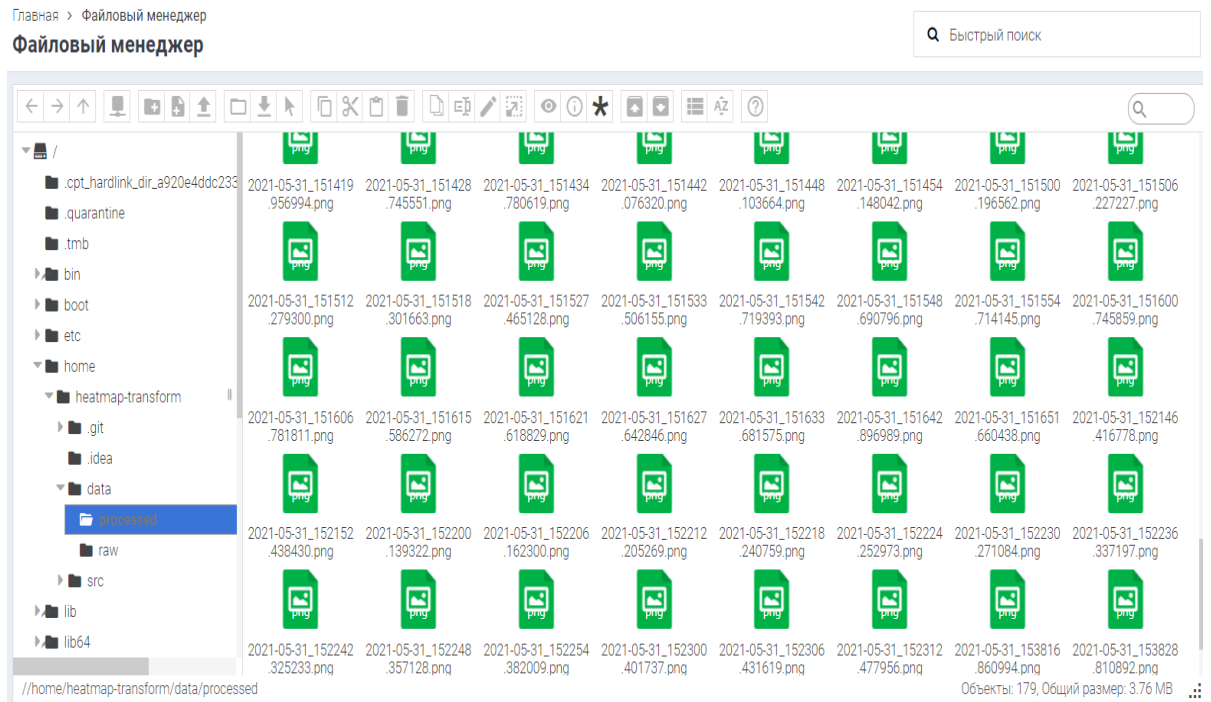


Рис.4.4. Зовнішній вигляд файлового менеджера

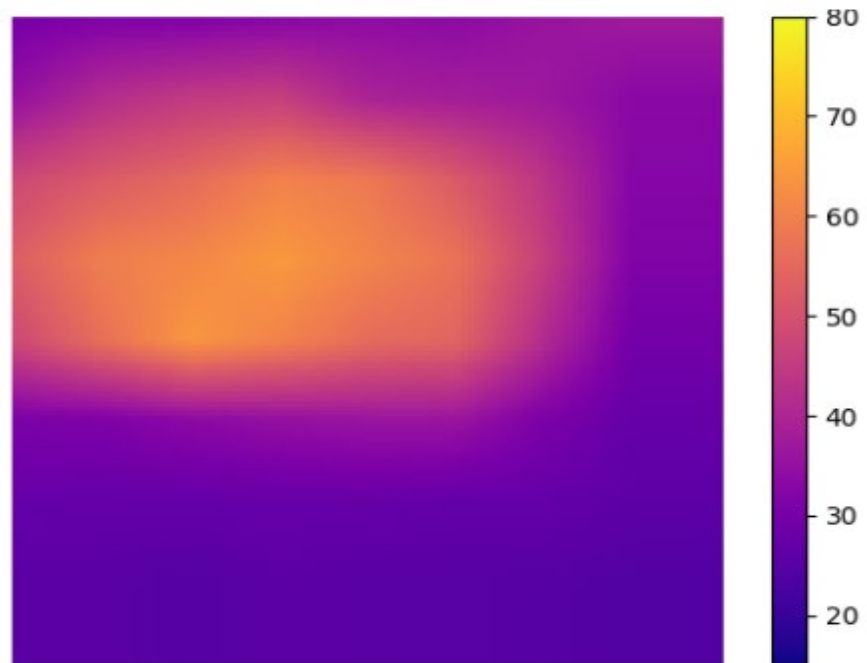


Рис.4.5. Оброблена термограма на відстані 30 см

На рисунку 4.6 представлено проведення експерименту на відстані 1м до ОК. На даному знімку ми можемо побачити розподілення теплової плями на термограмі. Максимальна отримана температура даного ОК контролю лежить в діапазоні 70°С.

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>66</i>

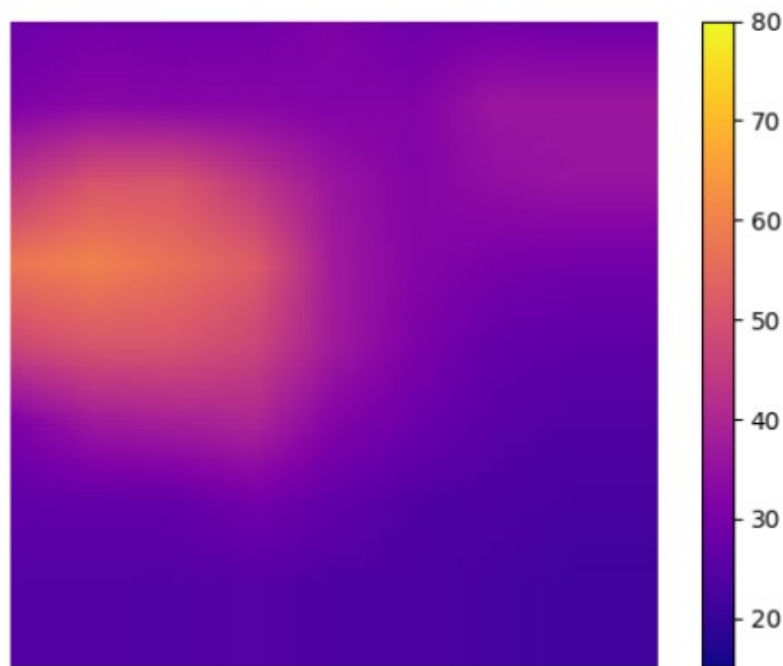


Рис.4.6. Отримана термограма на відстані 1 м

Проаналізувавши отримані термографічні знімки з двох експериментів, можна бути впевненим, що смарт-тепловізор працює з мінімальною допустимою похибкою зазначеною в характеристиках детектора випромінювання, яка дорівнює $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$.

При третьому експерименті смарт-тепловізор було розташовано на відстані 2 метрів до ОК. Відносно даного аналізу температури відеокарти, було показано непогані результати експерименту. Розподіл температурного діапазону в межах 65°C . За допомогою даних експериментів, було доведено повну відповідність роботи смарт-системи та, ще раз практично доведено пряму залежність підвищення похибки вимірювання від відстані до ОК. На рисунку 4.7 представлено термограму отриману при даному досліді.

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		67

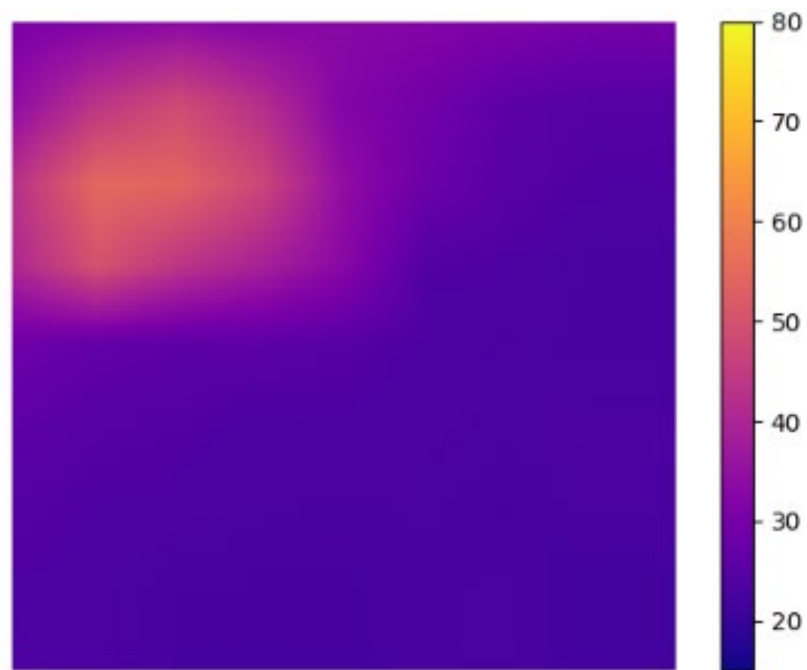


Рис.4.7. Термограма на відстані 2 м

Провівши та проаналізувавши отримані експериментальні дані, можна з легкістю сказати, що система працює якісно та ефективно. На сьогоднішній день, застосування даної смарт-системи, для такого електрообладнання, як: трансформатори, серверні блоки, фрезерні станки та інше; доцільно, технологічно та інноваційно. Дана система може бути допрацьована та під'єднана до системного блоку, за рахунок чого ми можемо автоматично сповіщати центральний блок керування про підвищення температури або автоматизувати процес включення додаткових систем для охолодження контрольованого об'єкта.

4.3. Рекомендації по роботі з приладом

Для застосування даного смарт-тепловізора, головним фактором є стабільний інтернет, який напряму пов'язаний з передачею та обробкою даних. Даний прилад компактний та зручний, що призводить до переваг над іншими громіздкими тепловізорами. Використовуючи пристрій, потрібно обрати відстань на якій буде розташовано смарт-тепловізор, з отриманням мінімальної допустимою похибки на термограмах, для ефективного та якісного детектування

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

ІЧ випромінювання. Рекомендована дальність тепловізійної зйомки від 20 см до 4 метрів. В даному діапазоні похибка тепловізора є допустимою. Не рекомендовано проводити тепловий контроль матеріалів з коефіцієнтом випромінювання нижче 0,7, при необхідності поверхні досліджуваного об'єкта обробляється спеціальними засобами (фарбування, чорніння, окиснення та інше) [25]. Проведення теплового контролю даним смарт-тепловізором на відкритому повітрі недоцільно, що на пряму залежить від дальності тепловізора. При проведенні тепловізійної зйомки у приміщеннях, додаткові джерела нагріву бажано виключати або ізолювати. В негативному випадку, це призведе до зашумлення термограм. При наявності великого рівня електромагнітних перешкод необхідно, переміщаючись з тепловізором, обрати місце зйомки, де вплив електромагнітного поля на прилад буде мінімальним [26].

При проведенні теплового контролю різних об'єктів необхідно дотримуватись правил безпеки відповідно до вимог діючих нормативних документів. Забороняється робота на нестійких конструкціях та у місцях, де можливо пошкодження проводки електропостачання засобів контролю

					<i>ПК71.17.0000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.А</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>69</i>

ВИСНОВОК

Основною метою даної дипломної роботи є розробка портативного бездротового смарт-тепловізора.

В аналітичній частині розглянуто основні теоретичні відомості теплового контролю. Проаналізовано переваги та недоліки даного неруйнівного контролю, приведено класифікацію тепловізійних датчиків ІЧ випромінювання. Наступним етапом описано бездротові системи зв'язку, застосування принципу ІоТ та доведено перспективи використання смарт-систем. Запропоновано використання певної структурної схеми тепловізора.

В другому розділі приведено функціональну схему смарт-тепловізора. Описано та проаналізовано переваги та недоліки використання відповідного мікроконтролера та датчика. Проведено розрахунки основних параметрів смарт-тепловізора. Для розрахунку параметрів системи можливо використання математичних САПР, що дозволить розраховувати схеми будь-якої складності.

В наступному розділі описано програмне забезпечення для отримання, передачі та обробки температурних значень з тепловізора. Описано переваги безкоштовного серверного менеджера. Детально розписано принципи роботи кожного програмно-логічного блоку. Код функцій та методів приведено у Додатках.

В четвертому розділі описано експериментальну частину дипломної роботи. Проаналізовано переваги та недоліки даного приладу, описано шляхи вдосконалення смарт-тепловізора та застосування його на виробництві.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		70

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В. Ключев, Неразрушающий контроль и диагностика, Москва: Машиностроение, 2003.
- [2] В. Вавилов, Инфракрасная термография и тепловой контроль, Москва: ИД Спектр, 2013.
- [3] О. Муравйов, «Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці,» *Вісник інженерної академії України*, № 1, pp. 124-131, 2017.
- [4] В. Вавилов и Ф. Соснин, Неразрушающий контроль, Москва: Машиностроение, 2006.
- [5] В. Коротаев и Г. Мельников, Основы тепловидения, Воронеж: Спектр, 2012.
- [6] В. Колобородов и Б. А.В., «Эффективное использование тепловизоров для охранной системы наблюдения на основе неохлаждаемых болометрических матриц,» в *Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні*, Київ, 2014.
- [7] A. Rogalski, «History of infrared detectors,» *OPTO-ELECTRONICSZ REVIEW*, т. 3, № 20, pp. 279-307, 2012.
- [8] W. Winfree и A. Plotnikov, «Defect Characterization in Composites Using a Thermal Tomographic Evaluation,» *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, № 18, pp. 1345-1352, 1999.

										Арк.А
										71
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата						

- [9] С. Панфилова и А. Власов, «Безконтактный тепловой контроль изделий электронной техники,» *Производство электроники*, № 3, pp. 25-30, 2007.
- [10] G. Bharath, «IoT Based Thermal Surveillance and Security System,» *Devices for Integrated Circuit*, № 3, pp. 13-23, 2019.
- [11] M. Nasir, «MONITORING OF BODY TEMPERATURE NON CONTACT USING AMG8833 THERMAL CAMERA AND FACE DETECTION,» *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif*, т. 1, № 6, pp. 396-403, 2020.
- [12] D. Franchi, «Use of infrared matrix sensor for temperature measurement and monitoring of PEM/FC stacks,» *Sensors and Actuators A: Physical*, № 293, pp. 119-127, 2019.
- [13] J. Mesquite, «Assessing the ESP8266 WIFI module for the Internet of Things,» в *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2018.
- [14] Б. Федорков и В. Телец, *Микросхемы АЦП и ЦАП: функционирование, параметры, применение*, Москва: Энергоатом, 1990.
- [15] B. Kostiyal, *Home automation using arduino WIFI module ESP8266*, Istanbul: Kalsekar Technical Campus Panvel, 2016.
- [16] P. Srivstava и M. Bajaj, «Overview of ESP8266 Wi-Fi module based smart irrigationsystem using IOT,» в *Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, 2018.
- [17] І. Складчиков, «Смарт-тепловізор на основі датчика AMG8833,» *Збірник праць конференції*, pp. 310-312, 2021.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		72

- [18] В. Петрик и О. Кустовський, «Бездротова передача даних у неруйнівному контролі,» в *Сучасні прилади, матеріали і технології для НК і ТД машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання*, Івано-Франківськ, 2008.
- [19] Р. Галаган и А. Момот, «Аналіз методів цифрової обробки термограм,» *Вісник Київського політехнічного університету. Серія приладобудування*, № 55, pp. 108-117, 2018.
- [20] M. Tran и T. Le, «Smart-config wifi technology using ESP8266 for low-cost wireless sensor networks,» в *2018 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP)*, 2018.
- [21] V. Tyagur, «Passive optical athermalization of an IR three-lens achomat,» *Journal of Optical Technology*, т. 4, № 81, pp. 199-203, 2014.
- [22] М. Веселовский, «Побудова смарт-систем за допомогою RaspberryPi,» *Система управління та навігації*, № 3, pp. 69-72, 2017.
- [23] А. Момот и R. Galagan, «The Use of Backpropagation Artificial Neural Networks in Thermal Tomography,» в *First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing*, 2018.
- [24] А. Момот и I. Skladchykov, «Deep learning automated data analysis of security infrared cameras,» *Slovak international scientific journal*, № 52, pp. 13-16, 2021.
- [25] І. Білокур, *Основи дефектоскопії*, Київ: Азимут-Україна, 2004.
- [26] Протасов, А. Г. *Технології теплового неруйнівного контролю* / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133 с.

					ПК71.17.0000.000 ПЗ	Арк.А
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		73

Ініціалізація всіх змінних та бібліотек

```
#include <ESP8266WiFi.h>
```

```
#include <WiFiClientSecure.h>
```

```
#include <ESP8266WebServer.h>
```

...текст програм надається по запиту до авторів...