

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

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Система контролю теплового стану об'єктів енергетики»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПК-21

Койнаш Олександр Сергійович _____

Керівник:

Професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, доктор
педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор

Протасов Анаталій Георгійович _____

Рецензент:

Доцент, доктор філософії кафедри ІВТ

Дорожинська Ганна Василівна _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ ПК21.1760. 01.ПЗ	Пояснювальна записка	115	

				ДПБ ПК21.1760. 01.ПЗ		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту		
Розробн.	Койнаш О.С.					
Керівн.	Протасов А.Г.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						
					Лист	Листів
					1	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-21	

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система контролю теплового стану об'єктів
енергетики»

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації 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 в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Койнашу Олександрю Сергійовичу

1. Тема проєкту «Система контролю теплового стану об'єктів енергетики», керівник проєкту професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор

Протасов Анаталій Георгійович, затверджені наказом по університету від

«28» квітня 2026 р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту : розробити портативну тепловізійну систему на основі неохолоджуваної мікроболометричної матриці MLX90640 та мікроконтролера ESP32-S3 для безконтактної візуалізації просторового розподілу теплового випромінювання об'єктів у режимі реального часу з відображенням псевдокольорової термограми на TFT-дисплеї та передачею даних через BLE.

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Аналітичний огляд методів та засобів тепловізійної візуалізації; Розділ 2. Вибір та обґрунтування елементної бази

тепловізійної системи; Розділ 3. Програмна реалізація тепловізійної системи; Розділ 4. Моделювання та виготовлення корпусу тепловізора; Розділ 5. Тестування системи.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): структурна схема, функціональна схема, принципово-електрична схема, плакат, схема розміщення компонентів, презентація.

6. Дата видачі завдання 5 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналітичний огляд методів та засобів тепловізійної візуалізації	05.04.2026 – 10.04.2026	Виконано
2	Вибір та обґрунтування елементної бази системи	11.04.2026 – 15.04.2026	Виконано
3	Розробка структурної та функціональної схем пристрою	16.04.2026 – 19.04.2026	Виконано
4	Розробка схемотехнічної реалізації та розрахунок енергоспоживання	20.04.2026 – 23.04.2026	Виконано
5	Програмна реалізація тепловізійної системи	24.04.2026 – 28.04.2026	Виконано
6	Моделювання та виготовлення корпусу тепловізора	29.04.2026 – 02.05.2026	Виконано
7	Тестування системи та оцінка результатів	03.05.2026 – 06.05.2026	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	07.05.2026 – 20.05.2026	Виконано
9	Підготовка до захисту дипломного проєкту	21.05.2026 – 03.06.2026	Виконано

Студент

Олександр КОЙНАШ

Керівник

Анатолій ПРОТАСОВ

ABSTRACT

The aim of this diploma project is to develop a portable thermal imaging system designed to visualize the spatial distribution of thermal radiation of objects in real time and to detect temperature anomalies.

The work includes an analysis of the physical principles of infrared radiation, justification of the choice of an uncooled microbolometer array MLX90640 and a powerful dual-core ESP32-S3 microcontroller with additional external memory. The system architecture has been developed, an electrical schematic has been designed, and software for data acquisition, filtering, and temperature data processing has been implemented. Two-dimensional interpolation algorithms have been realized to improve the visual resolution of thermal images and to generate pseudo-color images on a TFT display.

The power consumption of the system has been calculated, and a standalone power supply unit based on lithium-ion batteries has been developed. The device enclosure has been designed and manufactured using 3D printing technology, taking into account ergonomics and protection of electronic components. A working prototype of the device has been built and its functionality has been confirmed through experimental testing.

The thesis consists of 5 chapters, 55 figures, and 41 references.

Keywords: portable thermal imager, microbolometer array, infrared radiation, ESP32-S3, thermogram, pseudo-color visualization, standalone power supply, 3D printing.

АНОТАЦІЯ

Метою даного дипломного проєкту є розробка портативної тепловізійної системи, призначеної для візуалізації просторового розподілу теплового випромінювання об'єктів у режимі реального часу та виявлення температурних аномалій.

У роботі проведено аналіз фізичних основ інфрачервоного випромінювання, обґрунтовано вибір неохолоджуваної мікроболометричної матриці MLX90640 та потужного двоядерного мікроконтролера ESP32-S3 з додатковою зовнішньою пам'яттю. Розроблено архітектуру системи, створено електричну принципову схему та програмне забезпечення для зчитування, фільтрації та обробки температурних даних. Реалізовано алгоритми двовимірної інтерполяції для підвищення візуальної роздільної здатності термограми та формування псевдокольорового зображення на TFT-дисплеї.

Проведено розрахунок енергоспоживання системи та розроблено блок автономного живлення на базі літій-іонних акумуляторів. Корпус пристрою змодельовано та виготовлено за технологією 3D-друку з урахуванням вимог до ергономіки та захисту апаратної частини. Виготовлено діючий прототип пристрою та підтверджено його працездатність під час експериментальних досліджень.

Робота містить 5 розділів, 55 рисунків та 41 літературне джерело.

Ключові слова: портативний тепловізор, мікроболометрична матриця, інфрачервоне випромінювання, ESP32-S3, термограма, псевдокольорове відображення, автономне живлення, 3D-друк.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач

БЛЕ / BLE — Bluetooth Low Energy (Bluetooth з низьким енергоспоживанням)

GATT — Generic Attribute Profile (протокол обміну атрибутами Bluetooth)

GPIO — General Purpose Input/Output (порти введення/виведення загального призначення)

I2C — Inter-Integrated Circuit (двопровідний послідовний інтерфейс)

ІЧ — інфрачервоний

FDM — Fused Deposition Modeling (технологія 3D-друку шляхом пошарового нанесення розплавленого матеріалу)

FPA — Focal Plane Array (матричний приймач випромінювання у фокальній площині)

FPS — Frames Per Second (кількість кадрів за секунду)

LWIR — Long-Wave Infrared (довгохвильовий інфрачервоний діапазон, 8–14 мкм)

MEMS — Micro-Electro-Mechanical Systems (мікроелектромеханічні системи)

MWIR — Mid-Wave Infrared (середньохвильовий інфрачервоний діапазон, 3–5 мкм)

NETD — Noise Equivalent Temperature Difference (еквівалентна шуму різниця температур)

NUC — Non-Uniformity Correction (корекція неоднорідності)

PLA — Polylactic Acid (полімолочна кислота; термопластичний матеріал для 3D-друку)

ABS — Acrylonitrile Butadiene Styrene (акрилонітрил-бутадієн-стирол; термопласт)

PETG — Polyethylene Terephthalate Glycol (поліетилентерефталат-гліколь; термопласт)

PSRAM — Pseudo Static RAM (псевдостатична оперативна пам'ять)

QWIP — Quantum Well Infrared Photodetector (квантовий ямний інфрачервоний фотодетектор)

RGB / RGB565 — Red Green Blue (модель кольору); RGB565 — 16-бітне кодування кольору

RTD — Resistance Temperature Detector (термометр опору)

САПР — система автоматизованого проєктування

SPI — Serial Peripheral Interface (послідовний периферійний інтерфейс)

SRAM — Static Random Access Memory (статична оперативна пам'ять)

TFT — Thin-Film Transistor (тонкоплівковий транзистор; тип рідкокристалічного дисплея)

UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (універсальний асинхронний приймач-передавач)

USB — Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина)

VO_x — Vanadium Oxide (оксид ванадію; матеріал чутливого шару мікроболометра)

a-Si — amorphous Silicon (аморфний кремній; матеріал чутливого шару мікроболометра)

EPC — електрорушійна сила

Зміст

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ.....	13
1.1.Актуальність теми.	13
1.2. Фізичні основи інфрачервоного випромінювання об'єктів.....	15
1.2.1.Закони теплового випромінювання	15
1.3.1.Контактні методи вимірювання температури.....	19
1.3.2.Безконтактні методи вимірювання температури.....	20
1.3.3.Обґрунтування вибору безконтактного методу для систем теплової візуалізації	21
1.4. Класифікація та принципи побудови тепловізійних систем	22
1.4.2. Сучасні системи на основі матричних приймачів випромінювання.....	23
1.5. Елементна база приймачів інфрачервоного випромінювання.....	24
1.5.1.Фотонні детектори.....	24
1.5.2.Теплові детектори.....	25
1.6.Аналіз характеристик неохолоджуваних мікроболометричних матриць.....	26
1.6.1.Роздільна здатність та геометричні параметри пікселя.....	26
1.6.2. Температурна чутливість	27
1.6.3. Вплив шумів на якість зображення	29
1.7. Обґрунтування напрямку розробки та вибір компонентної бази.....	29
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	32
2.1. Розробка структурної схеми пристрою.....	32
2.2. Розробка функціональної схеми	33
2.3. Порівняльний аналіз та вибір моделі інфрачервоного матричного детектора .	34
2.4. Обґрунтування вибору засобів візуалізації та інтерфейсу користувача.....	36
2.5. Розрахунок та вибір обчислювальної системи для обробки теплових даних...	39
2.6. Розрахунок основних параметрів та енергоспоживання системи.....	42
2.6.1.Порівняльний аналіз та вибір концепції живлення пристрою.....	42
2.6.2.Аналіз струму споживання компонентів системи.....	43
2.6.3.Розрахунок параметрів акумуляторної системи	43

2.7.1. Схемотехнічна реалізація тепловізійної системи.....	44
2.7.2. Розробка алгоритму тепловізійної системи	46
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	49
3.1. Вибір інструментарію та бібліотек розробки	49
3.2. Розробка програмного алгоритму роботи системи.....	49
3.2.1. Алгоритм збору та первинної обробки даних.....	50
3.2.2. Візуалізація термограми та інтерфейс користувача	51
3.2.3. Конфігурація апаратних ресурсів та діагностика	51
3.2.4. Алгоритм формування псевдокольорового зображення	52
3.2.5. Динамічна адаптація температурного діапазону	54
3.2.6. Масштабування та графічна побудова інтерфейсу	54
3.2.7. Алгоритм передачі теплового знімка через BLE	56
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСУ ТЕПЛОВІЗОРА	59
4.1. Проектування конструкції корпусу в Solidworks	59
4.2. Вибір матеріалу для 3d-друку.....	66
4.3. Технологія 3d-друку та параметри виготовлення	67
4.4. Постобробка та монтаж компонентів	68
РОЗДІЛ 5. ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ	71
5.1. Термограма долоні людини.....	71
5.2. Термограма чашки з гарячою рідиною	72
5.3. Термограма електронного пристрою	73
5.4. Термограма тіла тварини та людини	73
ВИСНОВОК	76

ВСТУП

Неруйнівний контроль матеріалів та конструкцій є невід'ємною частиною сучасного виробництва, діагностики та технічного обслуговування. Серед методів неруйнівного контролю тепловізійна діагностика займає особливе місце завдяки своїй безконтактності, оперативності та інформативності [1]. Тепловізійний контроль дозволяє виявляти дефекти матеріалів, деталей та складних конструкцій без фізичного впливу на них, що робить його незамінним у медицині, промисловості, енергетиці та будівництві.

На сьогодні портативні тепловізійні системи набувають все більшої популярності завдяки можливості проведення діагностики в польових умовах [2]. Однак існуючі комерційні рішення часто мають високу вартість, що обмежує їх доступність для малих та середніх підприємств. Розроблення портативної тепловізійної системи на основі доступних компонентів є актуальною задачею, яка дозволить зробити тепловізійну діагностику більш доступною та розширити сферу її застосування з дотриманням існуючих галузевих стандартів [3].

Метою дипломного проекту є розроблення портативної тепловізійної системи з можливістю синхронізації та виводу термографічного зображення на комп'ютер або мобільний пристрій. Основні завдання включають: аналіз переваг та недоліків різних конструкцій тепловізійних систем [4]; розроблення структурної схеми портативної тепловізійної системи; обґрунтування вибору компонентної бази; розроблення програмного забезпечення для обробки даних з інфрачервоного датчика та візуалізації термографічних зображень; проведення експериментальної перевірки розробленої системи та оцінка її метрологічних характеристик.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

1.1.Актуальність теми.

Надійність і безперебійна робота об'єктів енергетики є одним із ключових чинників стабільного функціонування промисловості, транспорту та житлово-комунального господарства. Пошкодження або перегрів електротехнічного обладнання можуть призвести до аварійних ситуацій, втрат електроенергії, виходу з ладу дороговартісних елементів та створення небезпеки для персоналу. Тому своєчасний контроль технічного стану енергетичних об'єктів є важливою задачею сучасної енергетики.

Одним із найбільш ефективних методів діагностики електрообладнання є тепловізійний контроль, який дозволяє безконтактно визначати температурні аномалії, локалізувати місця перегріву та виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку [1]. Використання тепловізійної техніки забезпечує швидкість проведення вимірювань, високу інформативність результатів і можливість контролю обладнання без його зупинки відповідно до міжнародних процедур моніторингу [3].

На рисунку 1.1 наведено приклад тепловізійного обстеження двополюсного рубильника, де зафіксовано перевищення температури контактного з'єднання відносно допустимого значення.

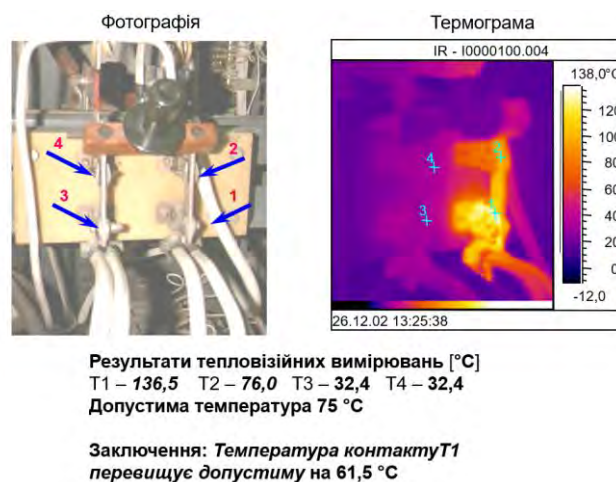


Рисунок 1.1. Приклад тепловізійного обстеження двополюсного рубильника

На рисунку 1.2 показано результати тепловізійного контролю трансформатора струму, що дозволяють виявити локальну зону підвищеної температури. Такі методи візуалізації даних є критично важливими для точного аналізу стану складних систем [4].

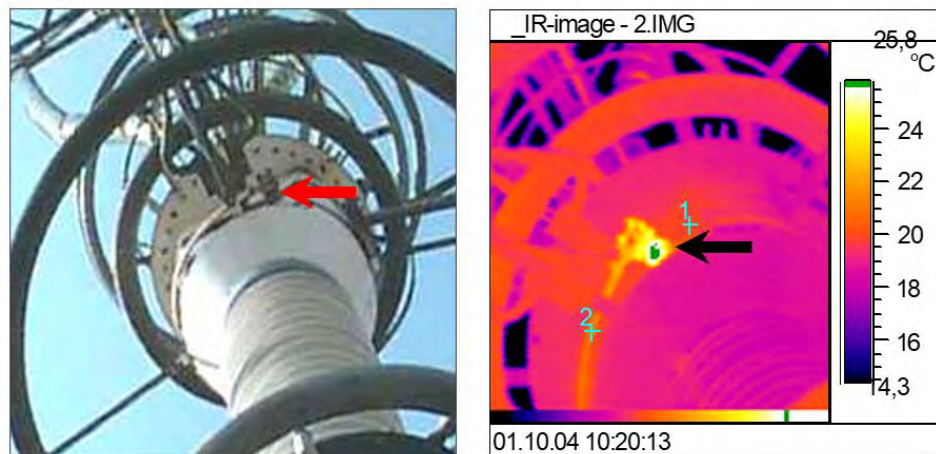


Рисунок 1.2. Результати тепловізійного контролю трансформатора струму

На рисунку 1.3 представлено термограму сонячної панелі, яка демонструє можливість виявлення дефектних елементів у фотоелектричних модулях. Широкий спектр застосування інфрачервоної термографії для вимірювання температури в різних галузях підтверджує універсальність даного методу [2].

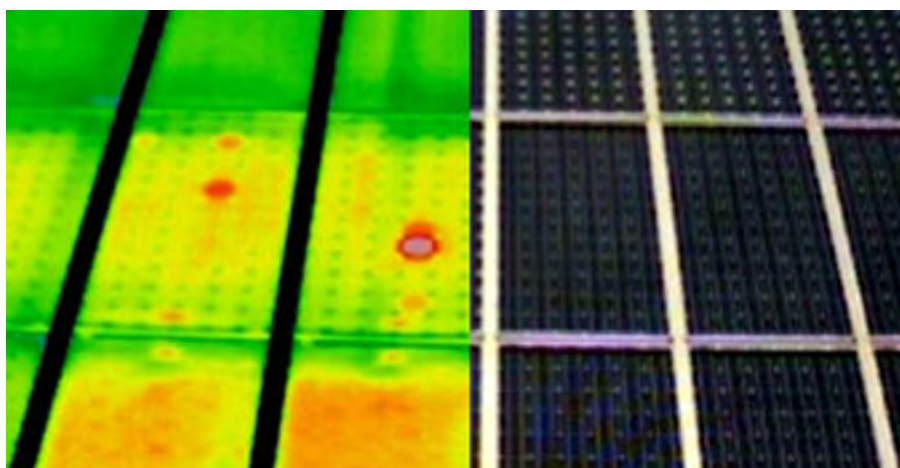


Рисунок 1.3. Термограма сонячної панелі

У підсумку, застосування портативних тепловізійних систем є актуальним напрямком розвитку засобів технічної діагностики енергетичного обладнання. Розробка сучасних компактних тепловізійних пристроїв дозволяє підвищити ефективність контролю, зменшити витрати на обслуговування обладнання та підвищити рівень енергетичної безпеки, що підтверджує актуальність теми даного дипломного проєкту.

1.2. Фізичні основи інфрачервоного випромінювання об'єктів

Інфрачервоне (ІЧ) випромінювання є складовою електромагнітного спектра та виникає внаслідок теплового руху заряджених частинок у речовині. Кожне тіло з температурою, вищою за абсолютний нуль, випромінює електромагнітну енергію; спектральний склад і інтенсивність цього випромінювання визначаються температурою, властивостями поверхні та умовами спостереження [1]. У контексті тепловізійних систем об'єкт розглядають як джерело теплового випромінювання, а вимірюваною величиною зазвичай є спектральна щільність випромінювання (радіанс/яскравість) у вибраному діапазоні довжин хвиль.

1.2.1. Закони теплового випромінювання

Ідеалізованою моделлю є абсолютно чорне тіло, яке поглинає всю падаючу на нього енергію та випромінює максимально можливу енергію для заданої температури. Спектральний розподіл випромінювання абсолютно чорного тіла описує закон Планка [4]:

$$L_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (1.1)$$

де $L_{\lambda}(T)$ — спектральна яскравість (спектральний радіанс), λ — довжина хвилі, T — абсолютна температура, h — стала Планка, c — швидкість світла, k — стала Больцмана.

Інтегрування спектрального розподілу за всіма довжинами хвиль приводить до закону Стефана—Больцмана, який пов'язує сумарну (інтегральну) випромінювальну здатність з температурою:

$$M(T) = \sigma T^4, \quad (1.2)$$

де $M(T)$ — повний потік випромінювання з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла, σ — стала Стефана—Больцмана.

Положення максимуму спектрального розподілу визначається законом зміщення Віна:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (1.3)$$

де b — стала Віна. Звідси випливає практично важливий висновок: зі зростанням температури максимум випромінювання зміщується в бік менших довжин хвиль, а при температурах, характерних для більшості об'єктів навколишнього середовища, значна частина енергії припадає саме на інфрачервону область спектра [1]. Це обґрунтовує застосування ІЧ-діапазонів у тепловізійній техніці для реєстрації температурних полів без зовнішнього підсвічування.

1.2.2. Спектральні діапазони тепловізійних систем (MWIR, LWIR)

Для практичних систем теплової візуалізації ключовими є так звані атмосферні “вікна прозорості”, у межах яких поглинання випромінювання атмосферою (переважно водяною парою та CO_2) є відносно малим [1]. У тепловізорах найчастіше використовують:

- MWIR (Mid-Wave Infrared) — середньохвильовий ІЧ-діапазон приблизно 3–5 мкм;
- LWIR (Long-Wave Infrared) — довгохвильовий ІЧ-діапазон приблизно 8–14 мкм.

Вибір діапазону визначається температурним рівнем об'єктів, вимогами до дальності та умовами середовища, а також типом приймача випромінювання [2]. Для портативних неохолоджуваних тепловізорів, які орієнтовані на спостереження сцен з температурами, близькими до навколишнього середовища, часто є доцільним саме LWIR-діапазон, оскільки він добре відповідає спектральному розподілу випромінювання таких об'єктів і дозволяє працювати в одному з основних атмосферних “вікон” [4].

1.2.3. Коефіцієнт випромінювальної здатності (емісивність) та вплив поверхні

Реальні об'єкти не є абсолютно чорними тілами. Для опису відхилення від ідеалу вводять коефіцієнт випромінювальної здатності (емісивність, ε), який характеризує, наскільки інтенсивно поверхня випромінює порівняно з абсолютно чорним тілом за тієї ж температури [1]:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L_{\lambda, \text{об}}(T)}{L_{\lambda, \text{чорн}}(T)}, \quad (1.4)$$

де $L_{\lambda, \text{об}}(T)$ — спектральна яскравість реального об'єкта, $L_{\lambda, \text{чорн}}(T)$ — відповідна величина для чорного тіла.

Для багатьох інженерних задач застосовують наближення “сірого тіла”, коли ε вважається слабко залежною від λ у робочому діапазоні, однак у загальному випадку емісивність істотно залежить від матеріалу, шорсткості, стану поверхні (окиснення, забруднення), кута спостереження та спектрального інтервалу [2].

Згідно з законом Кірхгофа для термодинамічної рівноваги спектральна випромінювальна здатність пов'язана зі здатністю до поглинання: поверхні, що добре випромінюють у заданому діапазоні, як правило, добре і поглинають у ньому [4]. Це важливо для тепловізійних вимірювань, оскільки сигнал, що реєструється приймачем, формується не лише власним випромінюванням об'єкта, але й може містити внесок відбитого випромінювання навколишніх джерел та вплив атмосферного поглинання/випромінювання на шляху поширення.

У підсумку, одна й та сама температура може відповідати різним вимірним рівням ІЧ-сигналу за різної емісивності та умов спостереження, що зумовлює необхідність коректного вибору параметрів реєстрації й методики вимірювання [1].

Отже, тепловізійне спостереження ґрунтується на реєстрації інфрачервоного випромінювання, спектральні характеристики якого визначаються температурою, а точність інтерпретації — властивостями поверхні через емісивність та умовами поширення в атмосфері. Ці фізичні положення безпосередньо визначають підходи до отримання температурної інформації на практиці: чи вимірювати температуру безпосередньо на об'єкті, чи за ІЧ-випромінюванням із урахуванням емісивності та зовнішніх впливів.

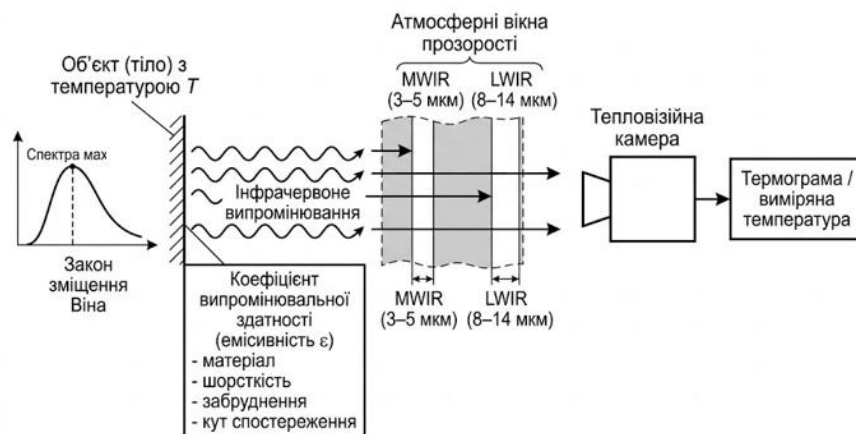


Рисунок 1.4. Проходження інфрачервоного випромінювання через шар атмосфери

1.3. Порівняльний аналіз методів отримання теплової інформації

Вимірювання температури та реєстрація теплових полів є критично важливими завданнями в багатьох галузях техніки — від діагностики електронних компонентів до моніторингу промислових процесів і медичної термографії [2]. Залежно від умов застосування, характеру об'єкта та вимог до точності й оперативності використовують два принципово різні підходи: контактні та безконтактні методи термометрії. Кожен із них має власні фізичні принципи, переваги та обмеження, що визначають доцільність їх застосування в конкретних задачах [1].

1.3.1. Контактні методи вимірювання температури

Контактні методи вимірювання температури ґрунтуються на встановленні теплової рівноваги між чутливим елементом датчика та об'єктом вимірювання. Після завершення теплообміну температура сенсора дорівнює температурі об'єкта, а вимірювання зводиться до реєстрації електричного параметра (ЕРС або опору), який має відомий зв'язок із температурою через градувальну характеристику [5].

До основних контактних датчиків належать термопари, термометри опору (RTD) та термістори. Термопари працюють на основі ефекту Зеебека та відзначаються широким діапазоном вимірювань, однак мають відносно невисоку точність. RTD-датчики базуються на зміні опору металу з температурою, забезпечують високу точність і стабільність, але є більш інерційними та потребують джерела живлення. Термістори характеризуються високою чутливістю, проте мають нелінійну характеристику та обмежений робочий діапазон [6].

Контактні методи відзначаються високою точністю вимірювання в точці контакту, відносною простотою та низькою вартістю. Водночас їм притаманні обмеження, пов'язані з необхідністю фізичного контакту, тепловим впливом датчика на об'єкт, інерційністю процесу вимірювання та локальністю отриманої інформації, що ускладнює аналіз температурного поля без використання багатьох сенсорів [5].



Рисунок 1.5. Контактні методи вимірювання температури та їх класифікація

1.3.2.Безконтактні методи вимірювання температури

Безконтактні методи вимірювання температури базуються на реєстрації власного теплового випромінювання об'єкта в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектра. Інтенсивність та спектральні характеристики цього випромінювання безпосередньо пов'язані з температурою згідно із законами Планка та Стефана—Больцмана [1]. Приймачі випромінювання, такі як пірометри або тепловізори, перетворюють потік ІЧ-енергії в електричний сигнал, який після калібрування інтерпретується як значення температури [2].

До основних засобів безконтактної термометрії належать пірометри та тепловізори. Пірометри вимірюють середню температуру в межах певної ділянки поверхні (поля зору) і застосовуються для точкових вимірювань. Тепловізори, своєю чергою, формують двовимірне зображення температурного поля, що дозволяє отримувати просторовий розподіл температури по всій поверхні об'єкта [2].

Безконтактні методи мають низку суттєвих переваг, серед яких відсутність впливу на об'єкт вимірювання, що є важливим для термочутливих або малих систем, можливість дистанційного контролю на значних відстанях, а також висока швидкодія, яка дозволяє реєструвати швидкоплинні теплові процеси в реальному часі. Додатковою перевагою є просторова інформативність тепловізійних систем, що забезпечують повне поле температурного розподілу без необхідності використання великої кількості датчиків [4].

Водночас цим методам притаманні й обмеження, пов'язані насамперед із залежністю результатів вимірювання від коефіцієнта випромінювальної здатності поверхні (емісивності), який може змінюватися залежно від стану матеріалу [1]. Також суттєвий вплив мають атмосферні умови та відбиття випромінювання від навколишніх об'єктів, що може спричиняти похибки [3]. Крім того, безконтактні системи є більш складними та дорогими, а для забезпечення високої точності часто потребують додаткового калібрування та компенсаційних алгоритмів.

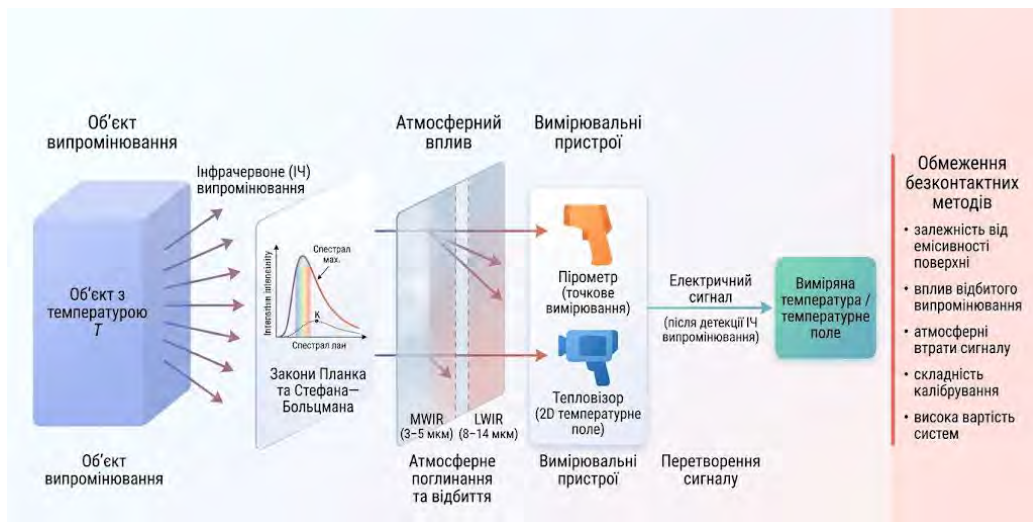


Рисунок 1.6. Безконтактні методи вимірювання температури на основі інфрачервоного випромінювання

1.3.3. Обґрунтування вибору безконтактного методу для систем теплової візуалізації

Безконтактний метод вимірювання температури є найбільш доцільним для систем теплової візуалізації, оскільки дозволяє отримувати температурну інформацію без фізичного контакту з об'єктом [1]. Це забезпечує високу швидкодію, можливість дистанційного вимірювання та відсутність впливу на тепловий стан досліджуваного об'єкта.

Метод особливо ефективний для портативних тепловізійних систем, де необхідно швидко сканувати великі площі та отримувати повне температурне поле в реальному часі [2]. На відміну від контактних методів, він не потребує встановлення датчиків у кожній точці вимірювання та дозволяє виявляти локальні перегріви й аномалії по всій сцені одночасно [4].

Сучасні мікроболометричні матриці забезпечують достатню чутливість і частоту оновлення зображення, що робить безконтактний підхід оптимальним для портативних тепловізійних систем [2]. Таким чином, він є найбільш раціональним вибором для задач теплової візуалізації з урахуванням вимог до швидкодії, інформативності та безпеки вимірювань [3].

1.4. Класифікація та принципи побудови тепловізійних систем

Тепловізійні системи формують зображення об'єкта на основі просторового розподілу його інфрачервоного випромінювання [1]. До їх складу зазвичай входять оптична система, ІЧ-приймач, електронний тракт обробки сигналу та пристрій відображення [2].

За принципом формування зображення такі системи поділяються на дві основні групи: з оптико-механічним скануванням і на основі матричних приймачів випромінювання [4]. Така класифікація дозволяє розмежувати класичні та сучасні підходи до побудови тепловізорів, що відрізняються як конструктивно, так і за характеристиками швидкодії, роздільної здатності та складності реалізації [2].

1.4.1. Системи з оптико-механічним скануванням

Системи з оптико-механічним скануванням є ранніми реалізаціями тепловізорів, у яких зображення формується шляхом послідовного зчитування випромінювання від окремих ділянок сцени [1]. Це здійснюється за допомогою рухомих оптичних елементів, які по черзі спрямовують ІЧ-випромінювання на одиночний детектор або лінійку детекторів.

Формування зображення відбувається через лінійне або двовимірне сканування з подальшою синхронізацією сигналу з положенням сканувального механізму [4]. До переваг таких систем належать використання високочутливих детекторів і відносна простота електроніки, однак їм притаманні суттєві недоліки: наявність рухомих частин, обмежена швидкодія, низька придатність до мініатюризації та чутливість до вібрацій [2].

Через ці обмеження оптико-механічні тепловізори поступово втратили актуальність у портативних і високошвидкісних системах теплової візуалізації [2].

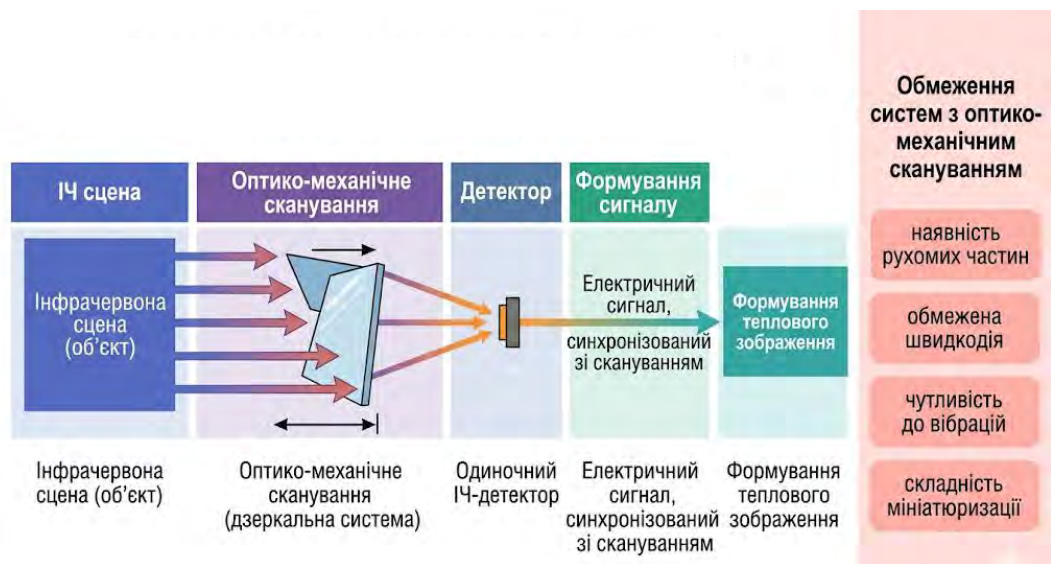


Рисунок 1.7. Системи з оптико-механічним скануванням у тепловізорах

1.4.2. Сучасні системи на основі матричних приймачів випромінювання

Сучасні тепловізійні системи будуються на основі матричних приймачів інфрачервоного випромінювання (FPA), які забезпечують паралельне формування теплового зображення без використання механічного сканування [1]. Інфрачервоне випромінювання через оптичну систему проєктується на фокальну площину матриці, де кожен піксель перетворює його в електричний сигнал, після чого формується теплове зображення [2].

Основними перевагами таких систем є відсутність рухомих частин, висока швидкодія, компактність і можливість роботи в реальному часі [4]. Для портативних тепловізорів найчастіше використовуються неохолоджувані мікроболометричні матриці, які не потребують криогенного охолодження та мають помірне енергоспоживання [2].

Недоліками є складність електронної обробки та необхідність корекції неоднорідності пікселів, однак сучасні алгоритми значною мірою вирішують ці проблеми [4]. Таким чином, матричні системи є найбільш ефективним рішенням для сучасних портативних тепловізорів [1].

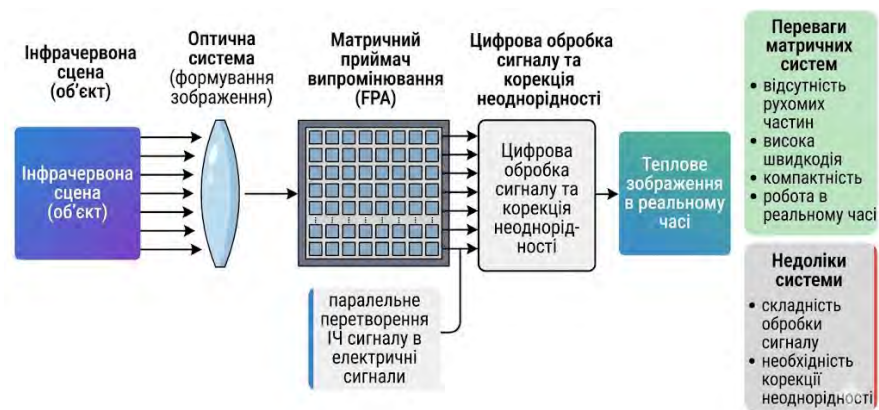


Рисунок 1.8. Тепловізійні системи на основі матричних приймачів випромінювання (FPA)

1.5. Елементна база приймачів інфрачервоного випромінювання

Приймачі інфрачервоного випромінювання є ключовими елементами тепловізійних систем, оскільки саме вони забезпечують перетворення оптичного сигналу в електричний [1]. Від їх характеристик значною мірою залежать чутливість, швидкодія та загальна ефективність тепловізора [2].

За принципом дії ІЧ-детектори поділяються на дві основні групи: фотонні та теплові [4]. Фотонні детектори реагують на поглинання фотонів і зміну електронних властивостей матеріалу, тоді як теплові базуються на зміні температури чутливого елемента та відповідній зміні його параметрів [2]. Кожен тип має свої переваги та обмеження, що визначає сферу його застосування [1].

1.5.1. Фотонні детектори

Фотонні детектори працюють на основі внутрішнього фотоефекту в напівпровідниках, коли поглинання фотона з достатньою енергією призводить до утворення вільних носіїв заряду [1]. Це викликає зміну провідності матеріалу або появу фотоструму, який реєструється електронною схемою [4].

До основних типів фотонних детекторів належать фотопровідні елементи, фотодіоди та квантові ямні детектори (QWIP) [2]. Для роботи в довгохвильовому ІЧ-

діапазоні вони потребують матеріалів з вузькою забороненою зоною, однак за кімнатної температури виникає значний темновий струм, що погіршує чутливість. Тому більшість фотонних детекторів потребують криогенного охолодження [4].

Перевагами фотонних детекторів є висока температурна чутливість, швидка реакція та висока квантова ефективність [2]. Водночас їх основними недоліками є необхідність охолодження, висока складність і вартість виготовлення, а також обмежена надійність і тривалий час виходу на робочий режим [1]. Тому їх застосовують переважно у спеціалізованих високоточних системах.

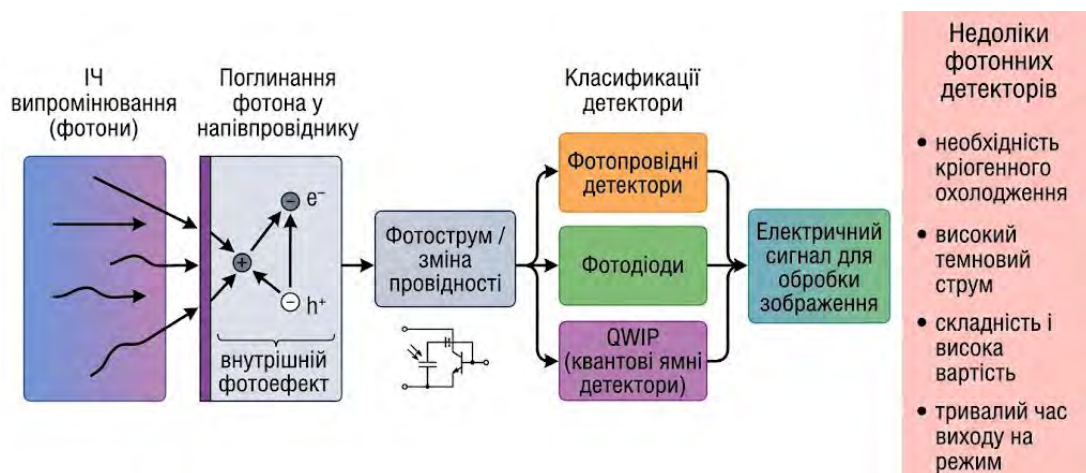


Рисунок 1.9. Принцип роботи фотонних детекторів інфрачервоного випромінювання

1.5.2. Теплові детектори

Теплові детектори працюють на основі зміни температури чутливого елемента при поглинанні інфрачервоного випромінювання [1]. На відміну від фотонних, їхня дія визначається сумарним тепловим потоком, тому вони можуть ефективно функціонувати за кімнатної температури без охолодження [2].

До основних типів теплових детекторів належать болометри, піроелектричні та термоелектричні елементи [4]. У сучасних портативних тепловізорах найширше застосовуються мікроболометри на основі MEMS-технологій, у яких зміна температури викликає зміну електричного опору чутливого шару (VO_x або a-Si) [2].

Перевагами таких детекторів є відсутність потреби в охолодженні, компактність, низька вартість, висока надійність і швидкий запуск [1]. Основними обмеженнями є нижча температурна чутливість порівняно з фотонними системами, більша інерційність та необхідність термостабілізації [4].

Попри це, мікроболометричні матриці забезпечують найкращий баланс між характеристиками, вартістю та габаритами, що робить їх основою сучасних портативних тепловізорів [2].



Рисунок 1.10. Принцип роботи теплових детекторів інфрачервоного випромінювання

1.6. Аналіз характеристик неохолоджуваних мікроболометричних матриць

Ефективність портативного тепловізора визначається характеристиками матричного приймача випромінювання, розташованого у фокальній площині [1]. Для неохолоджуваних мікроболометричних матриць ключовими параметрами є просторова роздільна здатність, температурна чутливість, інерційність і рівень шумів [2].

Ці характеристики визначають здатність системи виявляти та розпізнавати об'єкти в умовах теплових завад і впливають на загальну якість формованого теплового зображення [4].

1.6.1. Роздільна здатність та геометричні параметри пікселя

Роздільна здатність матричного приймача визначається кількістю пікселів по горизонталі та вертикалі [2]. У сучасних неохолоджуваних тепловізорах найпоширенішими є формати від 160×120 до 640×480 пікселів. Вища роздільна здатність забезпечує кращу деталізацію зображення, але потребує складнішої обробки сигналів і більш дорогих оптичних компонентів [1].

Важливим параметром є крок пікселя (pixel pitch) — відстань між центрами сусідніх елементів. Сучасні мікроболометри мають крок 17–12 мкм, а в перспективних розробках — до 10 мкм [4]. Зменшення кроку дозволяє підвищити компактність системи та зменшити габарити оптики, однак знижує кількість поглинутого випромінювання на піксель, що висуває підвищені вимоги до чутливості матеріалів [2].

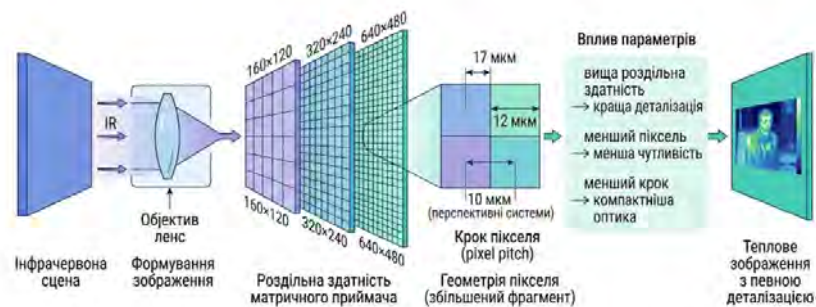


Рисунок 1.11. Роздільна здатність та геометричні параметри пікселя матричного тепловізійного приймача

1.6.2. Температурна чутливість

Еквівалентна шуму різниця температур (NETD) є одним із ключових показників якості тепловізора, що визначає мінімальну різницю температур, яку система здатна розрізнити на фоні власних шумів детектора [2]. Вона може бути виражена як відношення шумової складової сигналу до температурної чутливості перетворення [1].

Для сучасних мікроболометрів на основі VO_x або a-Si типові значення NETD становлять 30–50 мК (0,03–0,05 °C) [4]. Менше значення NETD означає кращу здатність розрізняти слабконтрастні теплові деталі, особливо в складних умовах спостереження [2].

Інерційність мікроболометрів характеризується постійною часу τ , яка визначається відношенням теплоємності пікселя до його теплової провідності [1]:

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (1.5)$$

де C — теплоємність пікселя, G — теплова провідність.

Типові значення становлять 7–15 мс, що забезпечує баланс між швидкістю та чутливістю [4]. Збільшення τ покращує чутливість, але погіршує динамічну реакцію, тоді як зменшення підвищує швидкість, але знижує чутливість. Для більшості застосувань це узгоджується з частотою кадрів 25–60 Гц [2].

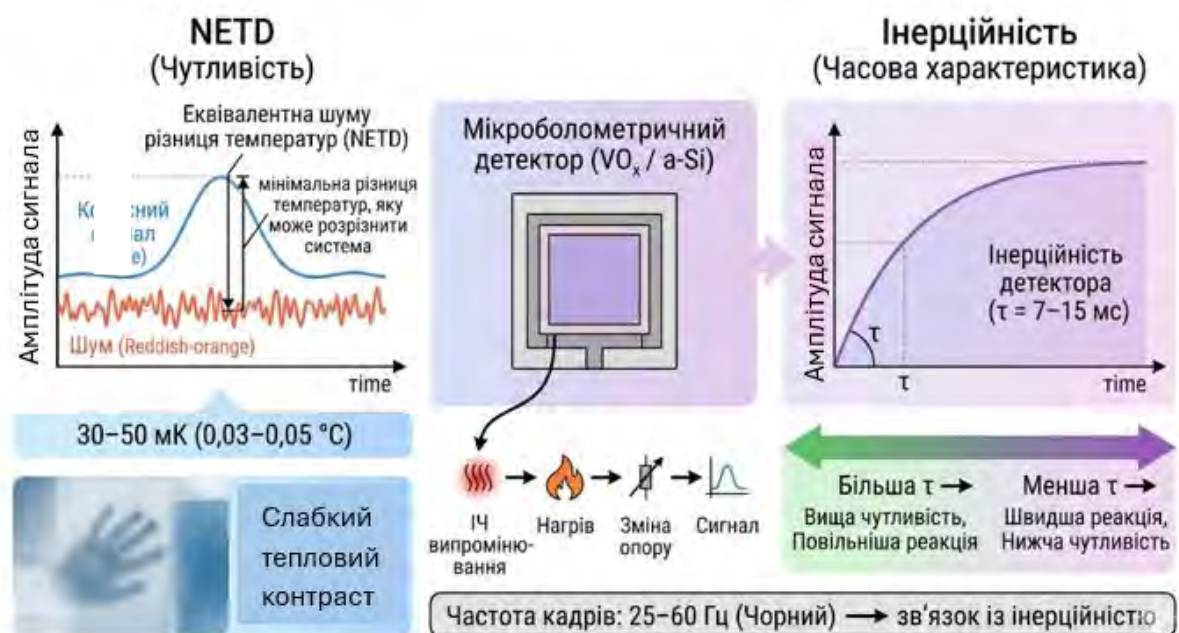


Рисунок 1.12. Еквівалентна шуму різниця температур та інерційність детекторів

1.6.3. Вплив шумів на якість зображення

Робота неохолоджуваної матриці супроводжується наявністю кількох типів шумів, які обмежують її граничні характеристики [1]. Основним є тепловий шум, зумовлений хаотичним рухом носіїв заряду в опорі болометричного елемента. Також значний вплив має низькочастотний шум типу $1/f$, характерний для матеріалів VO_x та a-Si , який зростає при зменшенні частоти та погіршує стабільність сигналу [4]. Окремо виділяють температурний флуктуаційний шум, що визначається випадковим теплообміном між пікселем і навколишнім середовищем та формує фундаментальну межу чутливості [2].

Крім часових шумів, існує просторовий шум, пов'язаний з неоднорідністю параметрів пікселів. Для його компенсації застосовуються алгоритми корекції неоднорідності та механічні затвори, що дозволяє вирівнювати відгук матриці [2].

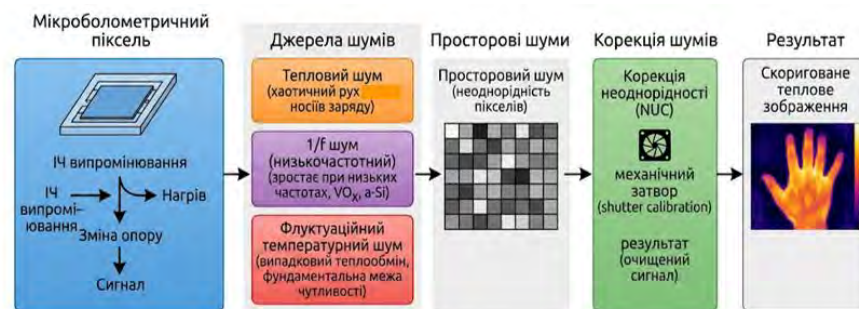


Рисунок 1.13. Вплив шумів та методи їх компенсації в мікроболометричних тепловізійних матрицях

1.7. Обґрунтування напрямку розробки та вибір компонентної бази

Розробка портативного тепловізора орієнтована на створення компактного, енергоефективного та простого у використанні пристрою для реєстрації просторового розподілу інфрачервоного випромінювання в режимі реального часу [2]. Основною метою є забезпечення достатньої інформативності теплового зображення при мінімальних габаритах, вартості та енергоспоживанні.

До основних вимог до системи належить здатність формувати стабільне теплове зображення з достатньою просторовою деталізацією для виявлення локальних температурних аномалій [1]. Система повинна забезпечувати високу температурну чутливість, що дозволяє розрізняти незначні перепади температур, а також достатню швидкість для відображення змін у реальному часі без помітних затримок [4].

Важливою вимогою є низьке енергоспоживання, оскільки пристрій передбачається як портативний і автономний. Також система повинна мати високу надійність і стабільність роботи в умовах змінного зовнішнього середовища, включаючи коливання температури та наявність теплових завад [3].

Окремо враховується компактність конструкції та зручність інтеграції всіх функціональних вузлів у єдиний пристрій, що забезпечує можливість його практичного використання в польових умовах [2].

Висновок до розділу 1

У першому розділі дипломного проєкту проведено аналітичний огляд методів та засобів тепловізійної візуалізації, що дозволило обґрунтувати актуальність теми дослідження та визначити основні напрями розробки портативної тепловізійної системи [2]. Розглянуто фізичні основи інфрачервоного випромінювання, зокрема закони теплового випромінювання, спектральні діапазони роботи тепловізорів та вплив емісивності поверхні на точність вимірювань [1].

Виконано порівняльний аналіз контактних і безконтактних методів вимірювання температури, в результаті чого встановлено, що безконтактні методи є найбільш доцільними для задач теплової візуалізації завдяки їх швидкодії, інформативності та можливості дистанційного контролю [2]. Проаналізовано принципи побудови тепловізійних систем і показано переваги сучасних матричних приймачів випромінювання над оптико-механічними системами [4].

Окрему увагу приділено аналізу інфрачервоних детекторів, де визначено доцільність використання неохолоджуваних мікроболометричних матриць як оптимального рішення для портативних пристроїв [2]. Розглянуто їх основні

характеристики, зокрема роздільну здатність, температурну чутливість та вплив шумів на якість зображення [4].

На основі проведеного аналізу сформульовано основні вимоги до розроблюваної системи та обґрунтовано вибір напрямку розробки. Запропоновано структурну схему портативного тепловізора, яка відображає взаємодію основних функціональних блоків та забезпечує повний цикл отримання і відображення теплового зображення [1].

Таким чином, результати першого розділу створюють теоретичну та технічну основу для подальшої розробки тепловізійної системи, вибору елементної бази та реалізації програмно-апаратного комплексу.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ

Розробка портативної тепловізійної системи передбачає обґрунтований вибір елементної бази, оскільки саме характеристики компонентів визначають точність, швидкодію та енергоефективність пристрою [2]. У даному розділі здійснюється підбір апаратних рішень для реалізації функціональних блоків відповідно до структурної схеми з урахуванням вимог до чутливості, продуктивності, габаритів, сумісності елементів і надійності роботи системи в різних умовах експлуатації [1].

2.1. Розробка структурної схеми пристрою

Структурну схему портативного тепловізора будуюмо за функціональним принципом, який послідовно відображає всі етапи обробки інформації — від реєстрації інфрачервоного випромінювання до формування візуального теплового зображення [7]. У межах такої структури система розглядається як взаємопов'язаний комплекс функціональних блоків, кожен з яких виконує свою частину загального процесу вимірювання та відображення температурного поля.

Початковим елементом системи є ІЧ-сенсорний блок, який здійснює приймання інфрачервоного випромінювання від об'єкта спостереження [8]. У процесі роботи він перетворює енергію теплового випромінювання у відповідний електричний сигнал, параметри якого відображають розподіл температури в сцені [9].

Далі отриманий сигнал надходить до обчислювального (керуючого) блоку, де виконується його первинна обробка, фільтрація та перетворення у цифровий формат, придатний для подальшого аналізу та побудови зображення [10]. Окрім цього, даний блок забезпечує керування роботою всіх вузлів системи та синхронізацію їх взаємодії, що є необхідним для коректного функціонування пристрою в реальному часі.

Після обробки інформації дані передаються до блоку відображення, який формує теплове зображення та забезпечує його візуалізацію для користувача [8]. Завдяки цьому стає можливим інтерпретувати просторовий розподіл температури в режимі реального часу у зручному для сприйняття вигляді.

Живлення всіх функціональних блоків здійснюється від блоку живлення, який забезпечує стабільну подачу електроенергії, підтримує необхідні рівні напруги та гарантує автономну роботу системи [7].

У підсумку, усі перелічені блоки утворюють єдину функціональну структуру, що забезпечує повний цикл роботи портативного тепловізора — від прийому інфрачервоного випромінювання до формування та відображення теплового зображення [9].

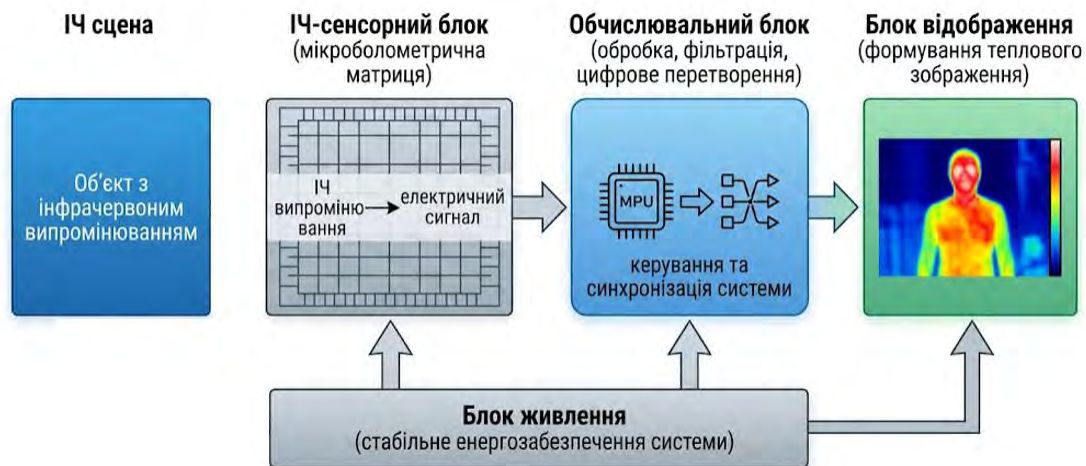


Рисунок 2.1. Структурна схема.

2.2. Розробка функціональної схеми

На рисунку 2.2 представлено функціональну схему портативної тепловізійної системи, яка відображає взаємодію основних блоків пристрою: інфрачервоного датчика, мікроконтролера, блоку візуалізації та системи живлення.

Основним джерелом інформації є інфрачервоний датчик, побудований на базі матриці термостовпчиків. У чутливому елементі відбувається перетворення інфрачервоного випромінювання об'єкта у електричний сигнал за рахунок термоелектричного ефекту. Отриманий слабкий аналоговий сигнал проходить стадію підсилення та нормалізації, після чого надходить до аналого-цифрового

перетворювача, де перетворюється у цифровий код. Подальша обробка та формування структури даних здійснюється блоком керуючої логіки датчика, після чого інформація передається до мікроконтролера через інтерфейс I2C.

Мікроконтролер виконує функції центрального керуючого елемента системи. Він здійснює приймання температурних даних, їх обробку, формування теплового зображення та керування периферійними модулями. Для обміну даними з датчиком використовується інтерфейс I2C, а для передачі зображення на дисплей — високошвидкісний інтерфейс SPI.

Сформоване теплове зображення передається до драйвера дисплея, який забезпечує керування графічним модулем та відображення псевдокольорової термограми у зручному для користувача вигляді.

Живлення системи реалізовано окремим блоком, що включає акумулятор та модуль керування зарядом. Блок живлення забезпечує стабільну подачу напруги на мікроконтролер та інші компоненти пристрою, а також можливість заряджання акумулятора від зовнішнього джерела.

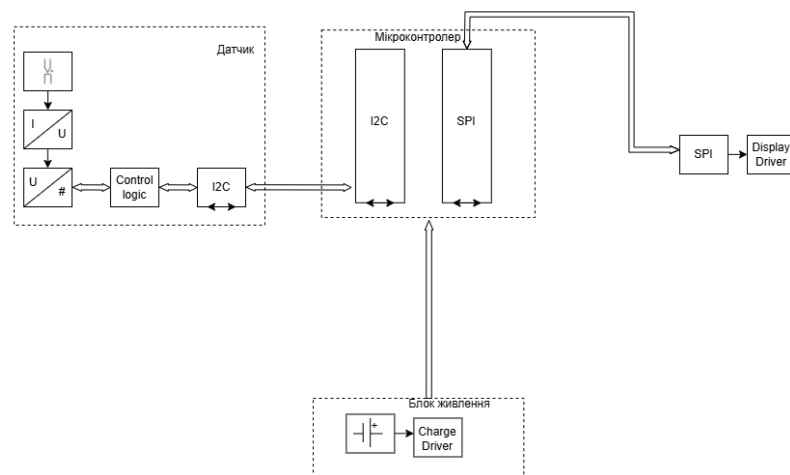


Рисунок 2.2. Функціональна схема

2.3. Порівняльний аналіз та вибір моделі інфрачервоного матричного детектора

Інфрачервоний матричний детектор є ключовим елементом тепловізійної системи, оскільки саме його характеристики визначають просторову роздільну здатність теплового зображення, точність вимірювання температури та можливість

роботи пристрою в режимі реального часу [11]. Для обґрунтування вибору сенсора проведено порівняльний аналіз поширених неохолоджуваних інфрачервоних матричних детекторів, зокрема Panasonic AMG8833 (Grid-EYE), Melexis MLX90641, FLIR Lepton 3.5 та Melexis MLX90640, що застосовуються в компактних тепловізійних системах [12].

Сенсор Panasonic AMG8833 (Grid-EYE) має низьку роздільну здатність 8×8 елементів, що суттєво обмежує деталізацію теплового зображення навіть із використанням інтерполяції [13].



Рисунок 2.3. Сенсор Panasonic AMG8833 (Grid-EYE)

Melexis MLX90641 з матрицею 16×12 забезпечує кращу точність і стабільність вимірювань, однак його роздільна здатність також є недостатньою для формування інформативної термограми без складної цифрової обробки [14].



Рисунок 2.4. Melexis MLX90641

Професійний модуль FLIR Lepton 3.5 (160×120) забезпечує високу якість зображення та чутливість, проте характеризується високою вартістю, складною інтеграцією та значними вимогами до обчислювальних ресурсів, що обмежує його використання в доступних портативних системах [12].



Рисунок 2.5. FLIR Lepton 3.5 (160×120)

Проміжним рішенням є MLX90640 з роздільною здатністю 32×24 пікселі, який забезпечує достатню деталізацію теплого зображення при помірних вимогах до обчислювальної системи [15]. Сенсор має можливість налаштування частоти оновлення до 64 Гц, вбудоване калібрування та інтерфейс I2C, що спрощує його інтеграцію з сучасними мікроконтролерами [14].



Рисунок 2.6. MLX90640

У підсумку, з урахуванням співвідношення роздільної здатності, точності, складності інтеграції та вартості, у даній дипломній роботі як основний інфрачервоний матричний детектор обрано MLX90640, що найкраще відповідає вимогам портативної тепловізійної системи [11].

2.4. Обґрунтування вибору засобів візуалізації та інтерфейсу користувача

Модуль індикації в портативному тепловізорі визначає зручність сприйняття термограми та впливає на вимоги до продуктивності обчислювального тракту,

оскільки формування псевдокольорового зображення і його відображення здійснюються в режимі, близькому до реального часу [20]. Для обґрунтованого вибору дисплея розглянуто основні типи рішень, що застосовуються у вбудованих системах, зокрема монохромні OLED дисплеї на базі SSD1306/SH1106, компактні TFT-модулі ST7735, сучасні IPS/TFT-дисплеї ST7789, а також TFT LCD-модулі ILI9341, які порівнюються за роздільною здатністю, кольоровістю, інтерфейсом підключення, швидкодією оновлення, енергоспоживанням та придатністю для відображення теплового поля [16–20].

Показано, що монохромні OLED-дисплеї (SSD1306/SH1106), незважаючи на низьке енергоспоживання та простоту інтеграції, не забезпечують можливості повноцінного псевдокольорового відображення температурного поля і мають обмежену роздільну здатність, що знижує інформативність термограми [16], [17].



Рисунок 2.7. Монохромний OLED дисплей

Компактні TFT-дисплеї на ST7735 забезпечують кольорове зображення, однак їх роздільної здатності недостатньо для комфортного одночасного відображення теплової карти та елементів інтерфейсу користувача [18]. IPS/TFT-модулі ST7789 мають кращу якість зображення та більшу роздільну здатність, але можуть вимагати додаткового налаштування програмного забезпечення та графічних бібліотек у мікроконтролерних системах [19].

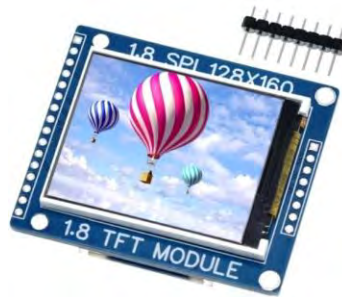


Рисунок 2.8. TFT дисплей (ST7735)

TFT LCD-модуль на контролері ILI9341 є поширеним рішенням для відображення графічної інформації у вбудованих системах і забезпечує кольорове зображення з роздільною здатністю 240×320 пікселів, що дозволяє одночасно виводити термограму та елементи інтерфейсу користувача [20]. Підтримка 16-бітної кольорової моделі RGB565 забезпечує коректне відображення псевдокольорових температурних градієнтів, а інтерфейс SPI спрощує апаратне підключення та забезпечує достатню швидкість оновлення зображення [20]. Крім того, контролер ILI9341 має широку програмну підтримку та добре інтегрується з мікроконтролерними платформами, а можливість підключення резистивної сенсорної панелі додатково розширює функціональність пристрою, що в сукупності робить даний модуль доцільним вибором для портативної тепловізійної системи [20].



Рисунок 2.9. TFT LCD модуль на контролері ILI9341

Окремо перевірено вимоги до пропускної здатності інтерфейсу передачі даних, які залежать від розміру кадру та частоти оновлення зображення. Для роздільної здатності 240×320 пікселів при форматі RGB565 обсяг одного кадру становить 153 600 байт, що при частоті оновлення 20–30 кадр/с вимагає пропускної здатності порядку 25–37 Мбіт/с з урахуванням накладних витрат. Це підтверджує необхідність використання оптимізованого SPI-інтерфейсу та часткового оновлення екрана для забезпечення стабільної роботи системи в реальному часі.

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що саме TFT LCD-модуль на базі ILI9341 є найбільш збалансованим рішенням за критеріями інформативності, продуктивності, сумісності та доступності, тому його обрано як основний модуль індикації портативної тепловізійної системи [20].

2.5. Розрахунок та вибір обчислювальної системи для обробки теплових даних

Обчислювальна система портативного тепловізора повинна забезпечувати зчитування даних з інфрачервоного сенсора через інтерфейс I2C, виконання температурних розрахунків із використанням калібрувальних коефіцієнтів, інтерполяцію матриці 32×24 до роздільної здатності дисплея, формування псевдокольорового зображення та його виведення на TFT-екран через SPI, а також обробку подій користувацького інтерфейсу і сенсорної панелі в режимі реального часу [21]. Для виконання цих задач необхідно обрати мікроконтролер, який має достатню обчислювальну продуктивність, обсяг оперативної пам'яті та підтримку сучасних інтерфейсів обміну даними, тому розглянуто кілька поширених платформ: Arduino Uno/Nano (ATmega328P), STM32F103, Raspberry Pi Pico (RP2040) та ESP32-S3 DevKitC-1 [22].

Arduino Uno/Nano на базі ATmega328P мають обмежені ресурси (16 МГц, 2 КБ SRAM), що є недостатнім для обробки матриці температур, інтерполяції та формування графічного буфера для дисплея 240×320 , тому вони не забезпечують необхідної продуктивності та швидкодії [23]. STM32F103 (Cortex-M3, до 72 МГц, 20–128 КБ RAM) демонструє кращі обчислювальні можливості, однак обмежений обсяг

оперативної пам'яті ускладнює реалізацію повноцінного графічного інтерфейсу та зберігання буферів зображення, що критично для тепловізійної системи [24].



Рисунок 2.10. Arduino Nano на базі ATmega328P

Raspberry Pi Pico на базі RP2040 (до 133 МГц, 264 КБ RAM) забезпечує достатню продуктивність для обробки даних і графіки, однак відсутність вбудованих бездротових інтерфейсів та обмежені можливості розширення пам'яті знижують гнучкість системи [25].

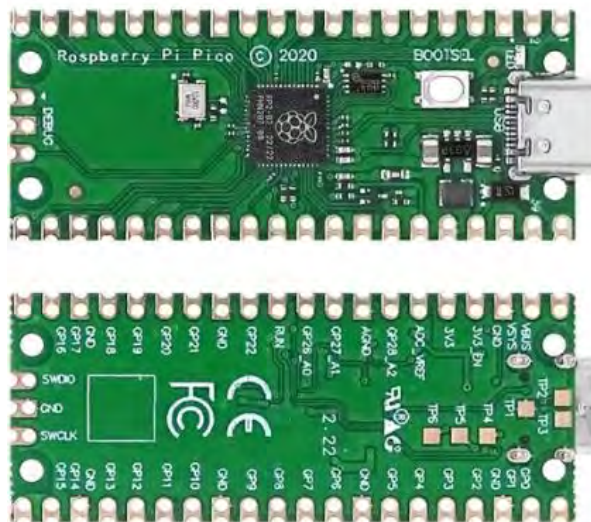


Рисунок 2.11. Raspberry Pi Pico на базі RP2040

Поширеним рішенням є ESP32-S3-DEVKITC-1-N8, який поєднує двоядерний процесор з частотою до 240 МГц, достатній обсяг оперативної пам'яті з можливістю підключення PSRAM, а також вбудовані модулі Wi-Fi і Bluetooth для розширення

функціональності системи [26]. Завдяки цьому забезпечується виконання всіх необхідних обчислювальних задач у реальному часі, включаючи обробку даних сенсора, інтерполяцію зображення та формування інтерфейсу користувача, що робить дану платформу оптимальним вибором для портативного тепловізора [21].

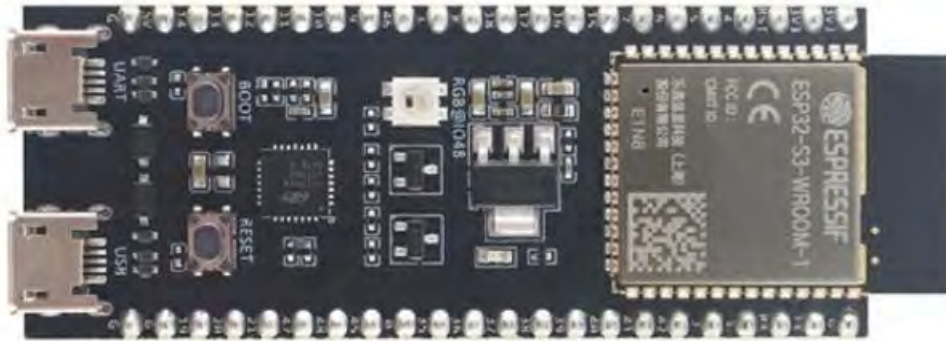


Рисунок 2.12. ESP32-S3-DEVKITC-1-N8

Для оцінки необхідності використання зовнішньої PSRAM розглянуто обсяг даних, що обробляються в системі: вихідний масив MLX90640 (32×24) становить 768 значень температури, що займає близько 3 КБ, а після інтерполяції до 128×96 обсяг зростає приблизно до 49 КБ. Додатково буфер зображення для дисплея 240×320 у форматі RGB565 займає близько 153,6 КБ, не враховуючи графічні ресурси та службові дані, що перевищує можливості внутрішньої SRAM більшості мікроконтролерів [26]. Тому використання 8 МБ PSRAM в ESP32-S3 дозволяє без обмежень розміщувати всі буфери та забезпечує стабільну роботу системи.

Обсяг флеш пам'яті також є критичним, оскільки прошивка включає FreeRTOS, драйвери, бібліотеки, алгоритми обробки зображень та графічні ресурси інтерфейсу, тому 16 МБ флеш забезпечує достатній запас для коду та додаткових даних [21].

Таким чином, інші платформи є обмеженими за пам'яттю або функціональністю, тоді як ESP32-S3 DevKitC-1 з 8 МБ PSRAM і 16 МБ флеш є найбільш збалансованим рішенням для реалізації тепловізійної системи [26].

2.6. Розрахунок основних параметрів та енергоспоживання системи

Етап розрахунку енергоспоживання є критично важливим для проектування портативного пристрою, оскільки він визначає вимоги до джерела живлення, вибір компонентів системи стабілізації напруги та тепловий режим роботи корпусу [27]. На цьому етапі також необхідно обрати концепцію живлення — роботу від зовнішнього джерела або автономну роботу від акумуляторного блоку, оскільки від цього залежать габарити, маса, час безперервної роботи, вимоги до схеми заряджання та захисту елементів живлення [28]. У даному підрозділі проведено аналіз сумарного струму споживання основних вузлів тепловізора, порівняно можливі варіанти живлення та обґрунтовано вибір схеми живлення для розроблюваного пристрою.

2.6.1. Порівняльний аналіз та вибір концепції живлення пристрою

На етапі проектування розглянуто два основні підходи до організації живлення тепловізійної системи: стаціонарне живлення від зовнішнього джерела (USB або мережевий адаптер) та автономне живлення від вбудованих акумуляторів [27]. Стаціонарне живлення забезпечує необмежений час роботи пристрою та відсутність необхідності контролю рівня заряду, однак суттєво обмежує мобільність системи.

Автономне живлення на базі літій-іонних акумуляторів позбавлене цих недоліків і забезпечує повну мобільність пристрою, що є критично важливим для портативного тепловізора [29]. Крім того, акумуляторне живлення забезпечує стабільну напругу з меншим рівнем завад, що позитивно впливає на роботу чутливих елементів [30].

З урахуванням призначення пристрою обрано концепцію автономного живлення на основі двох літій-іонних акумуляторів типорозміру 18650, з'єднаних паралельно, що забезпечує оптимальне поєднання ємності та габаритів [29].

2.6.2. Аналіз струму споживання компонентів системи

Для оцінки максимального струму споживання системи при напрузі живлення 3,3 В розглянуто основні її вузли та їхні пікові режими роботи [26]. Мікроконтролер ESP32-S3 при повному завантаженні споживає в середньому 100–150 мА, при цьому пікові значення можуть досягати 300–350 мА [26]. ІЧ-сенсор MLX90640 має типовий струм близько 23 мА [14], TFT-дисплей ILI9341 — до 60–80 мА [20], а допоміжні елементи — близько 15 мА.

Таким чином, сумарний максимальний струм споживання системи:

$$I_{total} \approx 150 + 23 + 80 + 15 = 268 \text{ мА} \quad (2.1)$$

2.6.3. Розрахунок параметрів акумуляторної системи

Для реалізації системи живлення використано два літій-іонні акумулятори типорозміру 18650 ємністю по 2500 мА·год, з'єднані паралельно [29]. У такій конфігурації напруга становить 3,7 В, а сумарна ємність — 5000 мА·год.



Рисунок 2.13. Акумулятор 18650 ємністю по 2500 мА·год

Очікуваний час роботи визначається як:

$$T = \frac{5000}{268} \approx 18.7 \text{ год} \quad (2.2)$$

З урахуванням втрат, пікових навантажень та реальних умов експлуатації фактичний час автономної роботи становить 12–15 годин [30].

Для заряджання акумуляторного блоку передбачено використання модуля TP4056 з інтерфейсом USB Type-C, який забезпечує стабільний заряд Li-ion елементів струмом до 1 А та має вбудований контроль процесу заряджання [28].



Рисунок 2.14. Модуль заряджання TP4056

2.7. Розробка алгоритму

Розробка алгоритму роботи портативної тепловізійної системи є завершальним етапом формування її функціональної структури та визначає послідовність виконання всіх основних операцій пристрою [31]. Саме алгоритм забезпечує узгоджену взаємодію апаратних і програмних компонентів, визначених на етапі вибору елементної бази та реалізованих у схмотехнічній побудові тепловізійної системи, починаючи від ініціалізації мікроконтролера та сенсорів і завершуючи формуванням та відображенням теплового зображення в режимі реального часу [32].

2.7.1. Схмотехнічна реалізація тепловізійної системи

Схмотехнічна реалізація тепловізійної системи визначає принципи з'єднання електронних компонентів між собою та спосіб їхньої інтеграції з мікроконтролером, а також організацію обміну даними між функціональними вузлами пристрою [33]. Загальна схема підключення елементів портативного тепловізора до мікроконтролера ESP32-S3 наведена на рисунку 2.28.

Інфрачервоний сенсор MLX90640 підключається до ESP32-S3 через інтерфейс I2C, який використовується для передачі матриці температурних значень у цифровому вигляді [14]. Відображення отриманої інформації реалізується за допомогою TFT-

дисплея ILI9341, що працює через інтерфейс SPI, який забезпечує високу швидкість передавання даних і дозволяє оновлювати зображення в режимі реального часу [20]. У випадку використання сенсорної панелі її підключення також здійснюється до мікроконтролера для реалізації елементів керування інтерфейсом користувача [34].

Живлення системи організовано на базі акумуляторного блоку з елементів 18650, який підключається до модуля заряджання TP4056 через USB Type-C [28]. Далі вихід модуля подається на стабілізатор напруги, який формує стабільні 3,3 В для живлення мікроконтролера ESP32-S3, ІЧ-сенсора MLX90640, дисплея ILI9341 та інших периферійних вузлів [27]. Така побудова забезпечує одночасне заряджання акумуляторів і живлення пристрою, а також стабільну роботу всіх компонентів без просідань напруги.

У результаті схема гарантує коректну взаємодію елементів, стабільну передачу даних і надійну роботу тепловізійної системи [33].

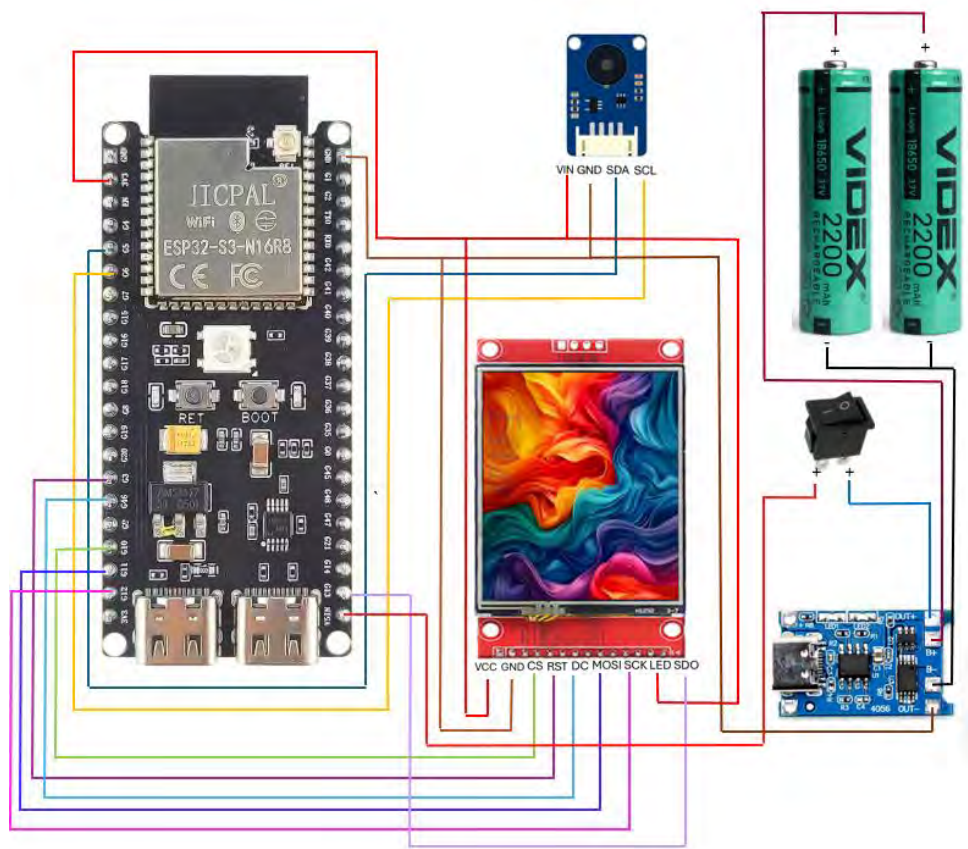


Рисунок 2.15. Схемотехнічна реалізація тепловізійної системи

2.7.2. Розробка алгоритму тепловізійної системи

Алгоритм роботи портативної тепловізійної системи відображає послідовність ініціалізації компонентів, зчитування даних та формування термограми в режимі реального часу [31].

На початку роботи виконується етап ініціалізації мікроконтролера, під час якого налаштовується UART-інтерфейс для діагностичного виводу [21]. Далі ініціалізується TFT-дисплей для відображення теплового зображення та елементів інтерфейсу [20]. Після цього виконується налаштування шини I2C для обміну даними з інфрачервоним сенсором MLX90640 [14]. На завершальному етапі ініціалізації конфігурується сенсор (режим Chess mode, 18-bit ADC, частота оновлення 8 Гц), що забезпечує стабільне отримання температурних даних [14].

Після завершення налаштування система переходить у основний цикл роботи. На цьому етапі відбувається зчитування повного кадру з MLX90640, який містить 768 температурних значень [14]. У разі успішного прийому даних виконується обчислення мінімального та максимального значень температур (T_{min} і T_{max}), після чого здійснюється згладжування меж діапазону за допомогою експоненційного фільтра для зменшення шумів та стабілізації зображення [35].

Далі виконується побудова термограми, накладання графічного інтерфейсу користувача та формування кольорової шкали температур для псевдокольорового відображення [20]. Паралельно формується діагностична інформація, яка передається через UART і включає частоту кадрів (FPS), T_{min} , T_{max} та середню температуру сцени [21].

У випадку помилки зчитування кадру система виконує затримку (≈ 50 мс) і повторює спробу отримання даних, що підвищує стабільність роботи пристрою [31]. Після завершення всіх етапів цикл повторюється безперервно, забезпечуючи оновлення теплового зображення в режимі реального часу.

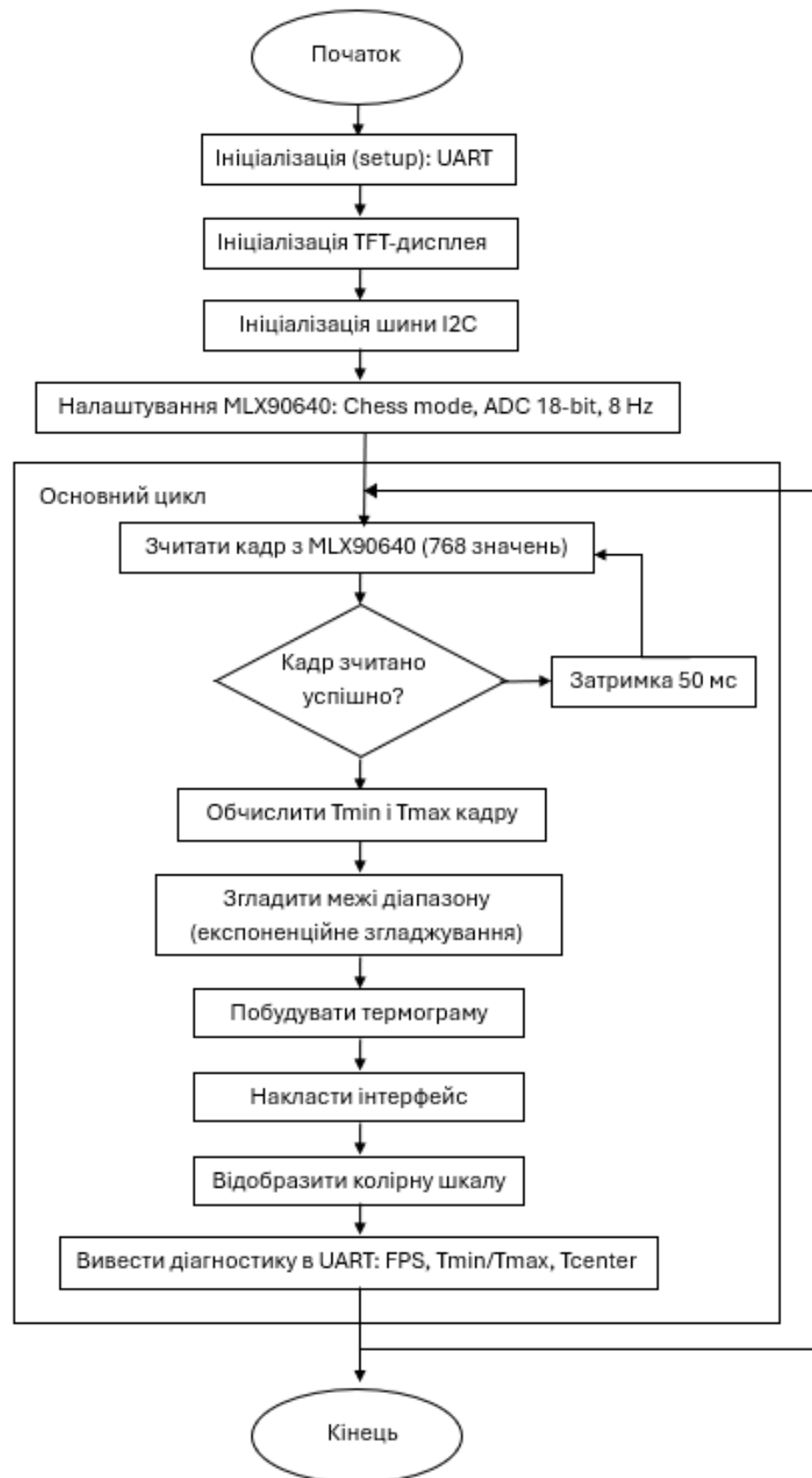


Рисунок 2.16. Алгоритм роботи тепловізійної системи.

Висновок до розділу 2

У другому розділі проведено комплекс науково-технічних розрахунків та обґрунтування вибору апаратної частини портативної тепловізійної системи [36]. На основі порівняльного аналізу сучасних компонентів було сформовано оптимальну архітектуру пристрою, що поєднує високу функціональність та енергоефективність.

Ключовим рішенням стало обрання інфрачервоного матричного детектора Melexis MLX90640 з роздільною здатністю 32×24 пікселі, який забезпечує достатню деталізацію термограми при прийнятній вартості [14]. Для управління системою обрано двоядерний мікроконтролер ESP32-S3 з 8 МБ PSRAM, що дозволяє виконувати обробку масивів даних та підтримувати роботу графічного буфера у реальному часі [26]. Візуалізація результатів реалізована на базі TFT LCD модуля з контролером ILI9341, що забезпечує відображення псевдокольорових градієнтів та інтерфейсу користувача [20].

Проведено розрахунок енергоспоживання системи, на основі якого спроектовано автономне джерело живлення на базі двох паралельно з'єднаних акумуляторів типу 18650 ємністю 5000 мА·год [29]. Це забезпечує тривалу автономну роботу пристрою (до 15 годин) та можливість безпечного заряджання через інтерфейс USB Type-C [28].

Розроблено електричну схему з'єднань та алгоритм функціонування системи, який охоплює всі етапи роботи: від ініціалізації периферійних інтерфейсів I2C/SPI до формування фінального зображення [31].

Таким чином, у розділі сформовано апаратний фундамент системи, що дозволяє перейти до етапу програмної реалізації та конструкторського проектування корпусу тепловізора [36].

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Вибір інструментарію та бібліотек розробки

Програмне забезпечення портативного тепловізора розробляється на основі фреймворку Arduino Core для мікроконтролера ESP32-S3, що забезпечує зручний доступ до апаратних ресурсів мікросхеми через високорівневі програмні інтерфейси та дозволяє ефективно інтегрувати оптимізовані бібліотеки для роботи з периферійними пристроями. Як основне середовище розробки обрано Visual Studio Code з розширенням PlatformIO, що забезпечує структуроване керування проєктом, зручну систему залежностей, а також підвищену швидкість компіляції та тестування прошивки.

Функціональність пристрою реалізується із застосуванням спеціалізованих бібліотек, зокрема Adafruit_MLX90640 для організації взаємодії з інфрачервоною термальною матрицею, Adafruit_ILI9341 для керування TFT-дисплеєм, а також Adafruit_GFX, яка використовується для формування графічного інтерфейсу та відображення оброблених даних у зручному візуальному вигляді. Робота з апаратними інтерфейсами організована на базі стандартних протоколів обміну даними Wire (I2C) та SPI, які налаштовані на підвищену швидкодію відповідно до вимог обраної елементної бази та необхідної частоти оновлення тепловізійного зображення.

3.2. Розробка програмного алгоритму роботи системи

Розробка алгоритму програмної роботи портативного тепловізора є ключовим етапом створення програмного забезпечення, оскільки визначає логіку функціонування системи та послідовність виконання всіх операцій обробки даних. Він описує повний цикл роботи програми — від ініціалізації апаратних модулів до зчитування даних з ІЧ-матриці, їх первинної обробки та формування термограми на дисплеї в режимі реального часу. Алгоритм також враховує вимоги до швидкодії,

стабільності оновлення зображення та коректного відображення температурних значень.

3.2.1. Алгоритм збору та первинної обробки даних

Програмна архітектура пристрою побудована за циклічним принципом, у якому основна логіка реалізується в безперервному циклі `loop()`. У межах цього циклу здійснюється послідовне зчитування одного кадру даних з інфрачервоної матриці MLX90640. Отримання повного масиву з 768 температурних значень у форматі `float` виконується за допомогою функції `mlx.getFrame()`, яка автоматично враховує заводські калібрувальні коефіцієнти, збережені в пам'яті сенсора (EEPROM).

Після отримання даних для кожного кадру виконується визначення мінімального та максимального значень температури, що необхідно для подальшої нормалізації та побудови колірної шкали. Для забезпечення стабільності відображення та усунення різких змін зображення при переході між сценами застосовується алгоритм експоненційного згладжування з коефіцієнтом 0.9. Це дозволяє плавно адаптувати динамічний діапазон термограми до поточних умов вимірювання та підвищує візуальну стабільність системи.

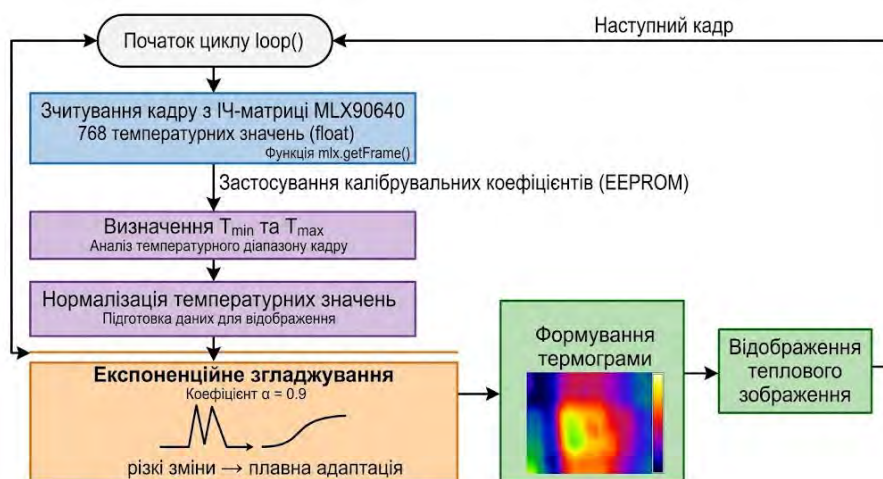


Рисунок 3.1. Програмна архітектура обробки даних тепловізора

3.2.2. Візуалізація термограми та інтерфейс користувача

Процес візуалізації полягає у масштабуванні кожного пікселя матриці 32×24 до розміру 7×7 пікселів на дисплеї, що формує робочу область термограми. Кожен елемент масиву розфарбовується відповідно до його температури за допомогою функції `getColor()`, яка реалізує градієнтний перехід від синього (холодні зони) до червоного (гарячі зони). Окрім теплової карти, на екран виводиться інформаційна панель із числовими показниками температури в центрі кадру, а також мінімальним та максимальним значеннями по всьому полю зору. У нижній частині дисплея формується динамічна колірна шкала, що слугує візуальним еталоном для інтерпретації отриманих даних користувачем.

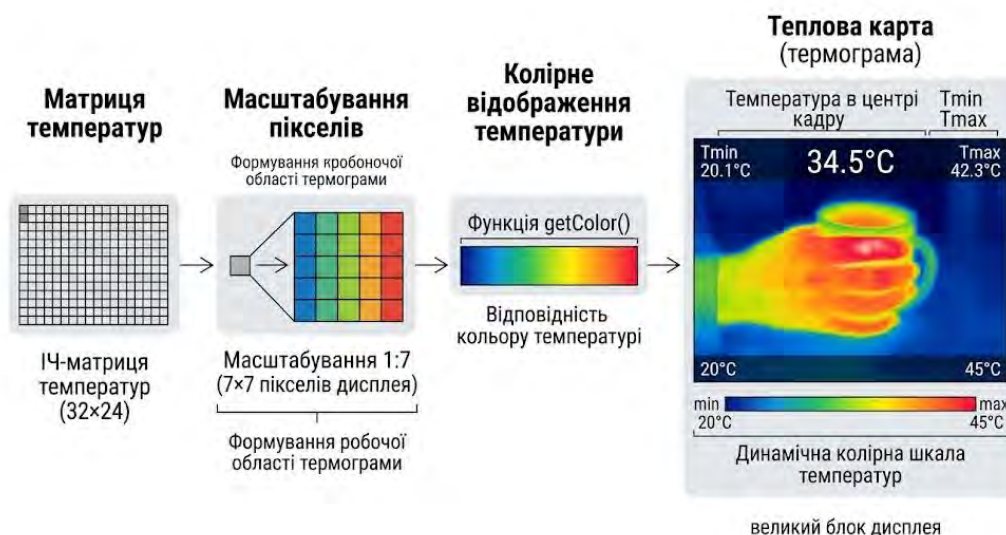


Рисунок 3.2. Візуалізація температурного поля з використанням кольорової шкали

3.2.3. Конфігурація апаратних ресурсів та діагностика

На етапі ініціалізації системи у функції `setup()` виконується конфігурація всіх необхідних апаратних інтерфейсів та параметрів роботи пристрою. Зокрема, шина I2C налаштовується на частоту 400 кГц із використанням виводів GPIO 5 та GPIO 6, тоді як інтерфейс SPI конфігурується для роботи на частоті до 80 МГц із підключенням до

пінів GPIO 11, GPIO 12 та GPIO 13. Це забезпечує високошвидкісну передачу даних між мікроконтролером та периферійними пристроями.

Інфрачервоний сенсор MLX90640 переводиться в режим «Chess Pattern», який забезпечує оптимальну черговість зчитування пікселів, а також встановлюється роздільна здатність АЦП 18 біт і частота оновлення 8 Гц, що є компромісом між точністю вимірювань і швидкодією системи. Додатково для контролю коректності роботи та спрощення налагодження реалізовано виведення діагностичної інформації через UART-інтерфейс, зокрема поточного значення частоти кадрів (FPS) та результатів самодіагностики сенсора. Така конфігурація забезпечує стабільну роботу системи та дозволяє досягти частоти оновлення термозображення на рівні 8–10 кадрів за секунду.



Рисунок 3.3 Алгоритм ініціалізації апаратних інтерфейсів та сенсора тепловізора

3.2.4. Алгоритм формування псевдокольорового зображення

Ключовим етапом обробки даних у розроблюваному тепловізорі є перетворення одновимірного масиву температурних значень у наочну візуальну термограму. Оскільки людське око значно краще сприймає колірні відтінки порівняно з градаціями сірого, у системі реалізовано метод псевдокольорового кодування.

Основою алгоритму є функція `getColor()`, яка виконує нормалізацію температурного значення кожного пікселя відносно поточного робочого діапазону $[T_{\min}, T_{\max}]$. Отримане нормалізоване значення n у межах від 0 до 1 використовується для визначення інтенсивностей складових RGB-каналів та подальшого формування відповідного кольору.

Для підвищення інформативності та контрастності зображення застосовано п'ятисегментну градієнтну модель переходу кольорів: синій $\rightarrow$ ціан $\rightarrow$ зелений $\rightarrow$ жовтий $\rightarrow$ червоний. Реалізація базується на поділі нормалізованого діапазону на кілька зон, у межах яких відбувається лінійна зміна інтенсивності відповідних колірних каналів. Наприклад, у першому діапазоні (0–25%) формується перехід від синього до ціанового кольору, де синій канал залишається максимальним, червоний дорівнює нулю, а зелений поступово зростає.

Такий підхід забезпечує плавні колірні переходи без різких меж, що суттєво покращує візуальне сприйняття температурних градієнтів і підвищує інформативність термограми.

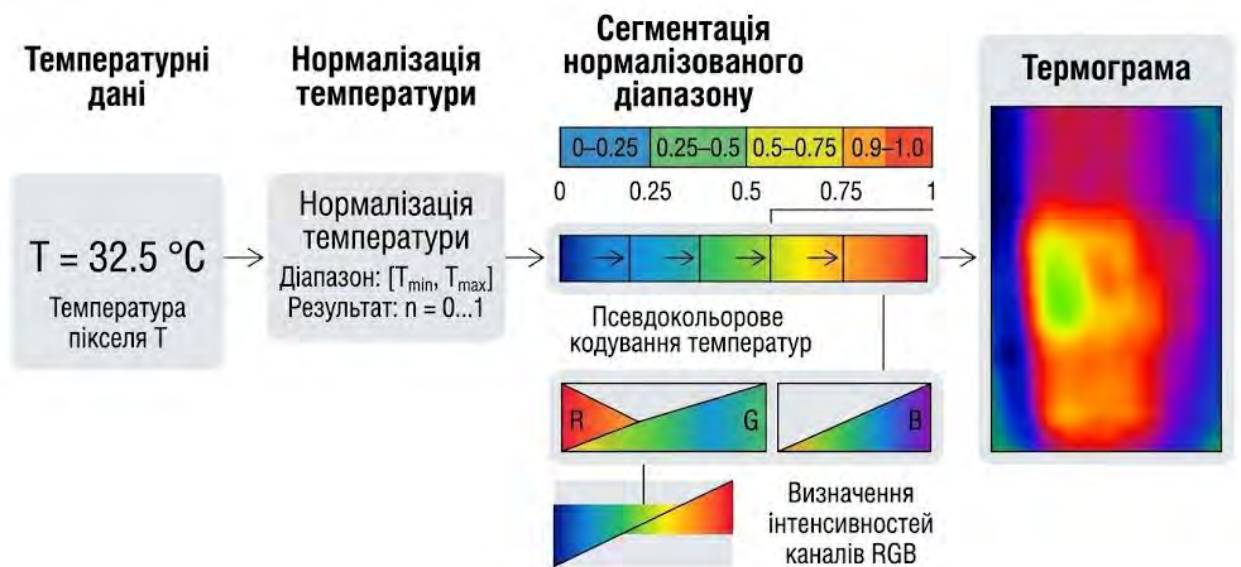


Рисунок 3.4 Алгоритм псевдокольорового кодування температур

3.2.5. Динамічна адаптація температурного діапазону

Однією з особливостей реалізованого алгоритму є система автоматичного підбору контрастності (Auto-scaling). Оскільки температура об'єктів у кадрі може суттєво змінюватися (наприклад, при переході від спостереження за людиною до аналізу нагрітих елементів електроніки), фіксований діапазон температур призвів би до втрати деталізації. Програма в реальному часі аналізує кожен кадр, знаходячи абсолютний мінімум та максимум температури серед 768 точок.

Для запобігання візуальному «мерехтінню» зображення при незначних коливаннях температури або шумах сенсора, у системі впроваджено алгоритм експоненційного згладжування меж діапазону. Нові значення T_{min} та T_{max} розраховуються як сума 90% попереднього значення та 10% значення з поточного кадру. Це забезпечує інерційність колірної шкали, роблячи візуалізацію стабільною та комфортною для сприйняття, водночас дозволяючи системі адаптуватися до нової сцени за частки секунди.

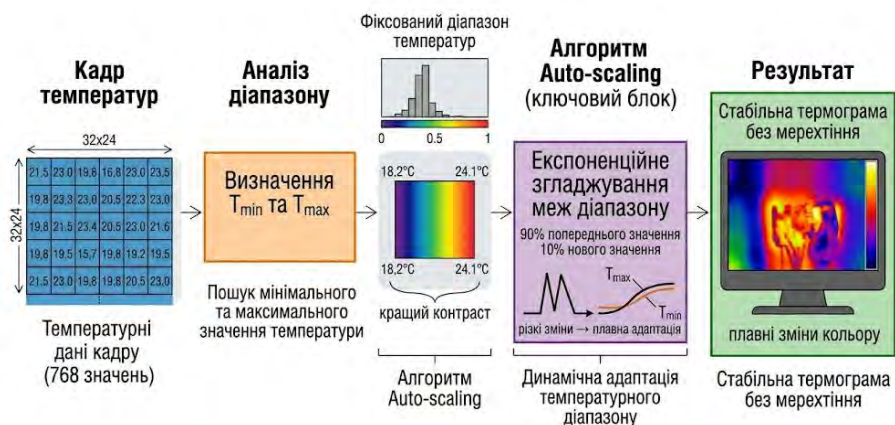


Рисунок 3.5. Алгоритм динамічної адаптації температурного діапазону в тепловізійній системі

3.2.6. Масштабування та графічна побудова інтерфейсу

Фізична роздільна здатність сенсора MLX90640 (32×24 пікселі) є недостатньою для прямого відображення на дисплеї ILI9341 (320×240 пікселів). Для вирішення цієї

проблеми застосовано метод дискретного масштабування, де кожен температурний піксель відображається як зафарбований прямокутник розміром 7 x 7 апаратних пікселів дисплея. Це дозволяє заповнити основну частину екрана, зберігаючи при цьому високу швидкість оновлення кадрів (FPS), оскільки мікроконтролеру не потрібно виконувати ресурсомістку білінійну інтерполяцію для кожного кадру.

Додатково алгоритм включає формування сервісної графіки: прицільної мітки в центрі екрана та інформаційних полів. Температура в точці прицілу зчитується безпосередньо з центрального індексу масиву (піксель [16, 12]) і виводиться збільшеним шрифтом. У нижній частині екрана програмно генерується колірна легенда — градієнтна смуга, що відображає відповідність кольорів конкретним температурам у поточному кадрі. Це перетворює тепловізор з пристрою якісного спостереження на вимірювальний інструмент, що дозволяє користувачу кількісно оцінювати тепловий стан об'єктів.

Блок-схему реалізованого алгоритму роботи пристрою, що відображає послідовність етапів зчитування даних з MLX90640, формування термограми та виведення сервісної інформації на дисплей, наведено на рис. 3.2.

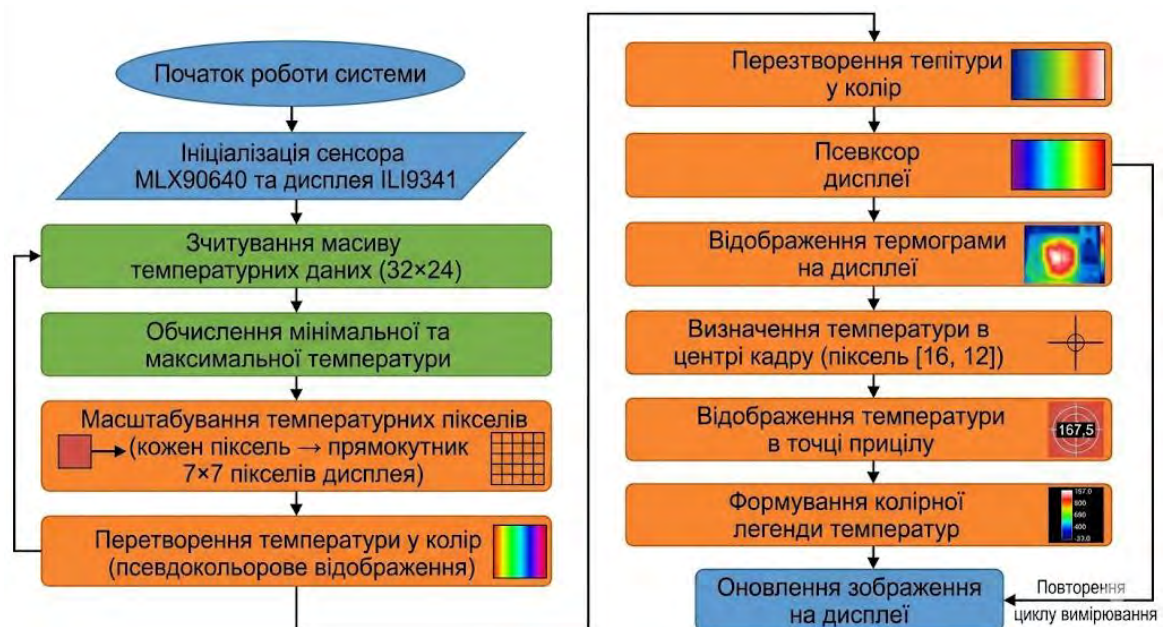


Рисунок 3.6. Алгоритм масштабування температурних даних і відображення термограми на дисплеї

3.2.7. Алгоритм передачі теплового знімка через BLE

У нормальному режимі роботи мікроконтролер ESP32-S3 безперервно зчитує температурні дані з інфрачервоного сенсора MLX90640, який формує тепловий кадр розміром 32×24 пікселі, та відображає теплове зображення на дисплеї ILI9341. У цей час модуль Bluetooth Low Energy вимкнений, а обмін даними по шині I2C відбувається у штатному режимі.

Передача теплового знімка розпочинається після натискання кнопки користувачем. Мікроконтролер зберігає поточний масив температурних значень разом із мінімальною, максимальною та центральною температурою, після чого тимчасово зупиняє зчитування нових кадрів із сенсора. Далі ініціалізується модуль Bluetooth Low Energy з іменем пристрою ThermalCam і створюється GATT сервер з характеристиками для передачі даних, отримання інформації про знімок та приймання команди запуску передачі. Після цього пристрій переходить у режим очікування підключення клієнта.

Після встановлення з'єднання та отримання команди на початок передачі формується пакет даних, що містить температурні значення кадру. Цей пакет розбивається на менші частини і послідовно передається через Bluetooth Low Energy. Після завершення передачі надсилається спеціальний маркер завершення, модуль Bluetooth вимикається, виконується повторна ініціалізація сенсора, і система повертається до нормального режиму роботи.

На стороні персонального комп'ютера програмний скрипт періодично сканує ефір у пошуках пристрою ThermalCam. Після його виявлення встановлюється з'єднання, зчитуються параметри знімка та надсилається команда на початок передачі. Комп'ютер приймає послідовність пакетів даних, об'єднує їх у єдиний масив температурних значень і виконує побудову теплового зображення шляхом масштабування даних до потрібної роздільної здатності та застосування кольорової карти. Отримане зображення зберігається у файл, після чого програма повертається до режиму очікування наступного підключення.

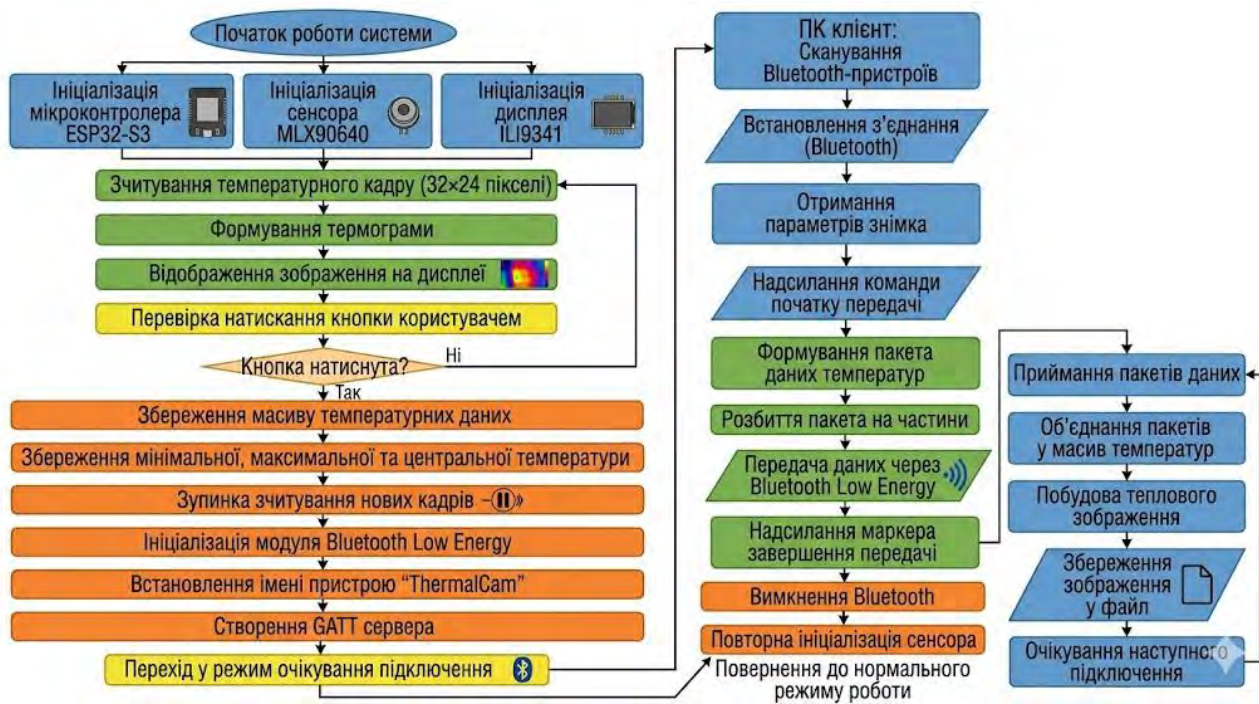


Рисунок 3.7. Алгоритм передачі теплового знімка через BLE

Висновок до розділу 3

У третьому розділі виконано розробку програмного забезпечення портативної тепловізійної системи на базі мікроконтролера ESP32-S3 із використанням фреймворку Arduino Core та середовища PlatformIO. Програмна частина забезпечує повний цикл роботи пристрою: від ініціалізації апаратних модулів і зчитування даних з інфрачервоного сенсора MLX90640 до їх обробки, візуалізації та передачі користувачу.

У процесі реалізації було розроблено алгоритм збору та первинної обробки температурних даних із врахуванням калібрувальних коефіцієнтів сенсора. Отримані значення перетворюються у наочне теплове зображення за допомогою псевдокольорового кодування, що дозволяє ефективно відображати температурні градієнти. Для підвищення стабільності зображення застосовано механізм динамічної адаптації температурного діапазону з експоненційним згладжуванням, що усуває різкі зміни контрасту та покращує візуальне сприйняття термограм.

Окрему увагу приділено оптимізації швидкодії системи. Використання дискретного масштабування зображення та високошвидкісних інтерфейсів SPI і I2C

дозволило забезпечити стабільну частоту оновлення кадрів, достатню для роботи в режимі реального часу. Реалізовано графічний інтерфейс користувача, який відображає не лише теплову карту, але й числові значення температури та допоміжну інформацію.

Додатково розроблено алгоритм передачі теплових знімків через Bluetooth Low Energy, що дозволяє передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер для подальшого аналізу та збереження. Це значно розширює функціональні можливості пристрою та підвищує його практичну цінність.

Таким чином, програмна реалізація забезпечує коректну, стабільну та швидкодію роботу всієї системи, повністю розкриваючи можливості апаратної частини та забезпечуючи зручну взаємодію користувача з пристроєм.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСУ ТЕПЛОВІЗОРА

4.1. Проєктування конструкції корпусу в Solidworks

Моделювання корпусу пристрою виконувалося в системі автоматизованого проєктування SolidWorks з урахуванням габаритних розмірів усіх функціональних вузлів пристрою: інфрачервоного сенсора MLX90640 (10×10×5 мм), мікроконтролерної плати ESP32-S3-DevKitC-1 (57×27 мм), TFT-дисплея ILI9341 (85×53 мм), акумуляторної батареї та інтерфейсних роз'ємів. Такий підхід дозволив забезпечити раціональне компонування елементів, оптимальні габарити корпусу та зручність експлуатації пристрою.

Конструкція корпусу розроблена за модульним принципом і складається з п'яти основних частин:

Верхня частина корпусу — містить дисплейне вікно та виконує функцію захисної кришки, забезпечуючи захист внутрішніх компонентів від механічних пошкоджень, пилу та зовнішніх впливів.

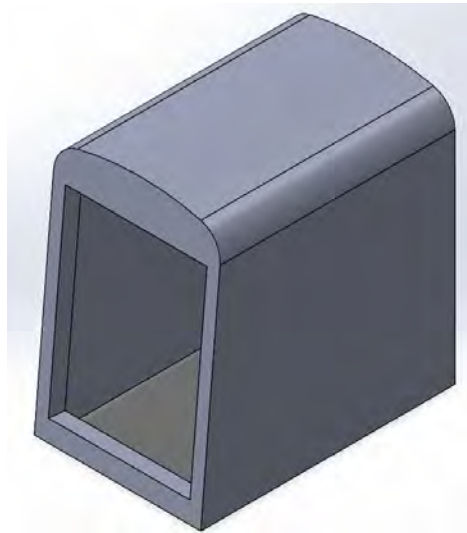


Рисунок 4.1. Верхня частина корпусу

Середня частина корпусу — є основним конструктивним елементом, у якому розміщуються мікроконтролерна плата, схема обробки сигналів, посадочне місце для інфрачервоного сенсора та органи керування пристроєм.

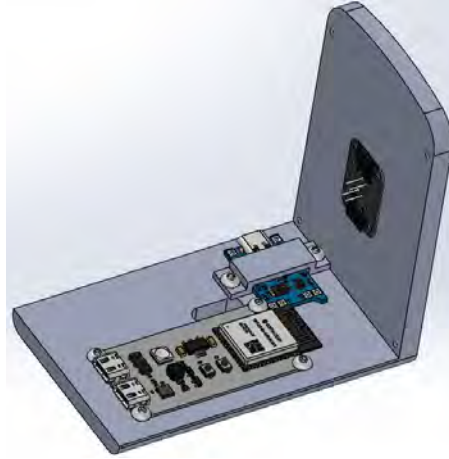


Рисунок 4.2. Середня частина корпусу

Ручка корпусу — призначена для забезпечення зручного утримання пристрою під час експлуатації та містить інтегрований акумуляторний відсік, що дозволяє оптимально розподілити масу пристрою та покращити його ергономічні характеристики.



Рисунок 4.3. Ручка корпусу

Нижня частина корпусу — виконує функцію відсіку для розміщення акумуляторної батареї та системи живлення, а також містить виведений порт для зарядки пристрою.

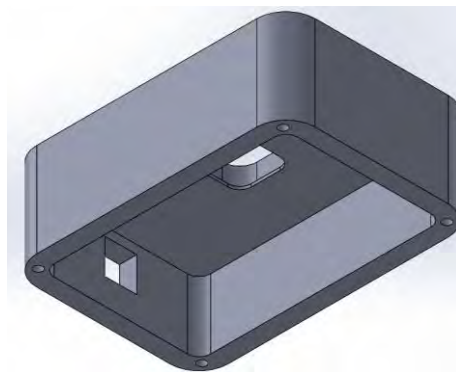


Рисунок 4.4. Нижня частина корпусу

Кришка акумуляторного відсіку — окремий конструктивний елемент, призначений для закриття нижньої частини ручки та фіксації акумуляторної батареї всередині корпусу.

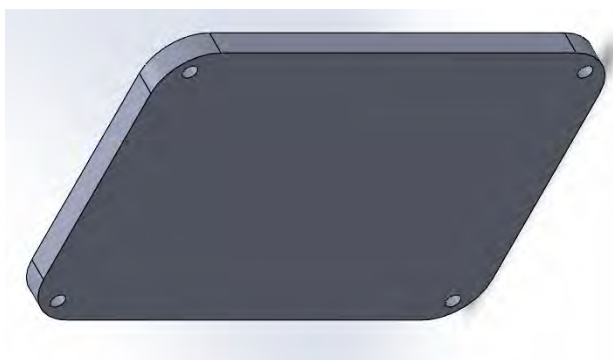


Рисунок 4.5. Кришка акумуляторного відсіку

Модульна архітектура корпусу забезпечує повну розбірність конструкції, що дозволяє оперативно отримати доступ до внутрішніх компонентів для проведення технічного обслуговування, заміни елементів або модернізації пристрою. Окремі частини корпусу з'єднуються між собою за допомогою механічних кріплень (гвинти типорозміру М3), що забезпечує надійність з'єднання без застосування клейових матеріалів та спрощує процес складання і розбирання виробу.



Рисунок 4.6. З'єднання окремих частин корпусу за допомогою гвинтового з'єднання

Важливою конструктивною особливістю є розміщення порту для зарядки у нижній частині корпусу. Таке рішення дозволяє здійснювати заряджання акумуляторної батареї без необхідності розбирання пристрою, що значно підвищує ресурс механічних з'єднань та зручність експлуатації для кінцевого користувача. Порт розташований у спеціальному технологічному отворі, який забезпечує додатковий захист від випадкового потрапляння пилу та вологи.



Рисунок 4.7. Розташування порту для зарядки

Для забезпечення ергономічності та зручності використання пристрою передбачена ручка, яка забезпечує надійний і комфортний хват. Розміри корпусу оптимізовані з урахуванням вимог портативності: загальні габарити становлять приблизно $230 \times 100 \times 70$ мм, а маса пристрою — близько 500 г, що дозволяє зручно переносити та використовувати пристрій однією рукою протягом тривалого часу.

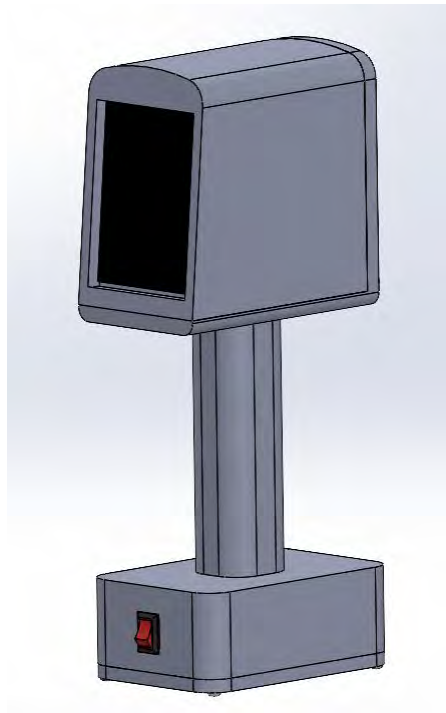


Рисунок 4.8. Зображення ручки для тримання тепловізора

У фронтальній частині корпусу передбачено отвір для візуалізації зображення на дисплеї з оптимальним кутом огляду, з раціональним кутом нахилу, що забезпечує ефективне спостереження об'єктів контролю, а також посадочне місце для інфрачервоного сенсора.

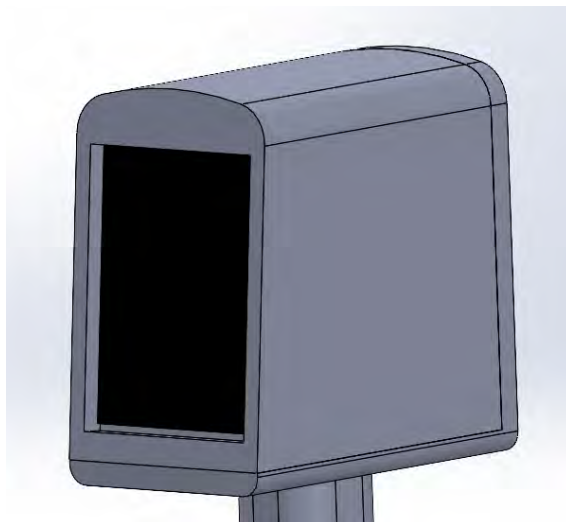


Рисунок 4.9. Зображення отвору для дисплея



Рисунок 4.10. Зображення отвору під сенсор

Особливу увагу при проектуванні було приділено розміщенню органів керування пристроєм. Кнопка увімкнення розташована у нижній частині корпусу з фронтальної сторони. Таке конструктивне рішення обрано з метою підвищення надійності експлуатації приладу. На відміну від розміщення кнопки на ручці, де існує висока ймовірність випадкового натискання під час транспортування або утримання пристрою, фронтальне розміщення на нижній частині корпусу забезпечує захист від небажаного ввімкнення або вимкнення приладу. Це дозволяє запобігти передчасному розряду акумулятора та підвищує загальну надійність роботи тепловізійної системи.

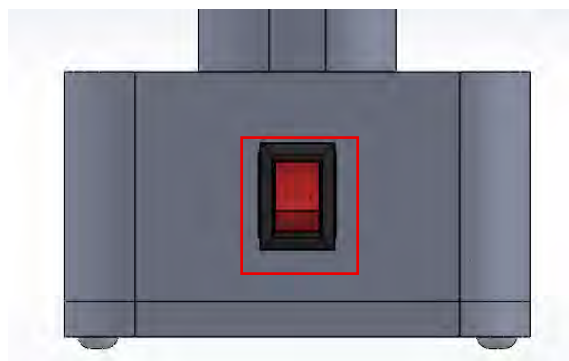


Рисунок 4.11. Розміщення кнопки увімкнення та вимкнення

Наявність окремої кришки акумуляторного відсіку забезпечує експлуатаційну гнучкість пристрою. Вона спроектована таким чином, щоб гарантувати надійну фіксацію батареї під час переміщення або роботи пристрою, запобігаючи її зміщенню всередині корпусу. Кришка кріпиться до нижньої частини корпусу за допомогою

гвинтового з'єднання, що дозволяє за необхідності швидко замінити акумуляторну батарею без повного розбирання всього корпусу пристрою.

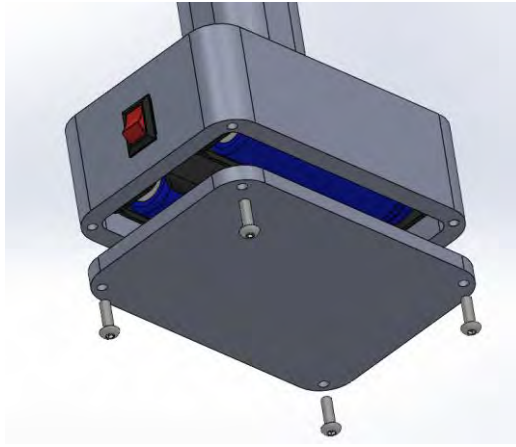


Рисунок 4.12. Кришка акумуляторного відсіку

Додатково конструкція корпусу передбачає використання гвинтових з'єднань для фіксації всіх основних електронних компонентів пристрою. Мікроконтролерна плата, інфрачервоний сенсор, дисплейний модуль та інші функціональні вузли встановлюються у відповідні посадочні місця та закріплюються за допомогою гвинтів, що забезпечує надійну механічну фіксацію елементів під час експлуатації та транспортування пристрою.

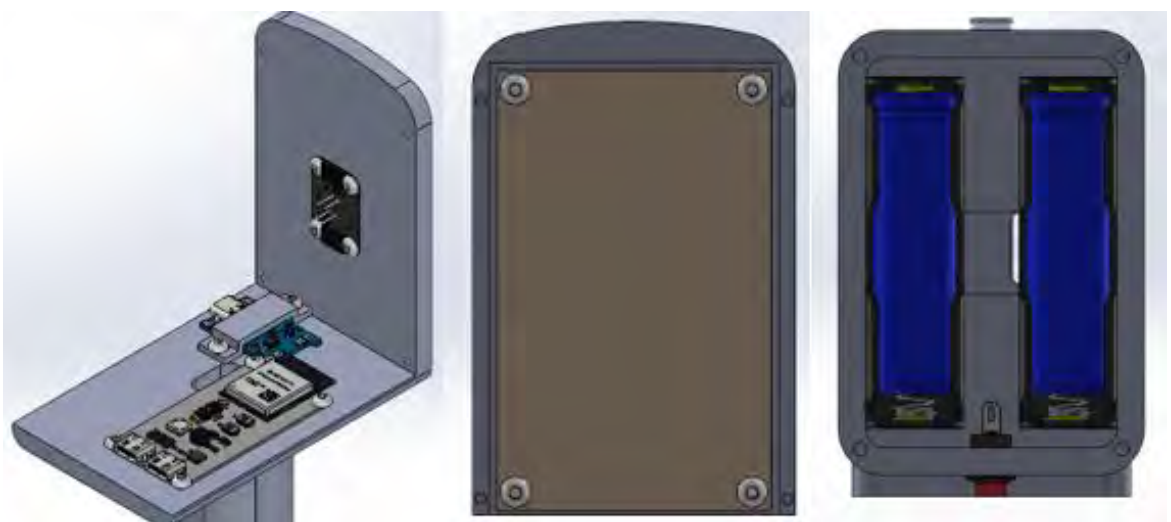


Рисунок 4.13. Закріплення електронних компонентів.

4.2. Вибір матеріалу для 3d-друку

При проєктуванні корпусу портативного тепловізора важливим завданням було обрання матеріалу для виготовлення деталей методом 3D-друку, який забезпечує необхідну механічну міцність, теплостійкість, точність розмірів та економічну ефективність [37]. Для аналізу було розглянуто три найбільш поширені матеріали для FDM-друку: PLA, ABS та PETG [38].

Матеріал PLA характеризується низькою температурою друку в межах 190–210 °C, високою точністю виготовлення з відхиленням приблизно $\pm 0,3\text{--}0,5$ мм та простотою використання [39]. Основним недоліком цього матеріалу є відносно низька теплостійкість на рівні близько 60 °C, а також підвищена крихкість при механічних навантаженнях [37].

Матеріал ABS забезпечує вищу механічну міцність і теплостійкість до приблизно 100 °C, однак потребує складніших умов друку та має схильність до деформації під час охолодження (ефект викривлення) [38].

Матеріал PETG поєднує достатню механічну міцність і відносну простоту друку, проте характеризується дещо вищою вартістю та потребує більш точного налаштування параметрів друку [39].

За результатами проведеного аналізу для виготовлення корпусу портативного тепловізора було обрано матеріал PLA як оптимальний варіант [37]. Такий вибір обґрунтований тим, що пристрій працює переважно в умовах кімнатної температури, тому теплостійкість матеріалу є достатньою для забезпечення надійної експлуатації [38]. Крім того, використання PLA дозволяє спростити процес виготовлення корпусу, забезпечити можливість швидкого внесення конструктивних змін та зменшити витрати на виробництво при збереженні необхідної механічної міцності та точності виготовлення [39].

4.3. Технологія 3d-друку та параметри виготовлення

Виготовлення корпусу портативного тепловізора здійснювалося методом 3D-друку за технологією FDM, що передбачає пошарове нанесення розплавленого полімерного матеріалу [40]. Друк виконувався на 3D-принтері з використанням PLA-пластику діаметром нитки 1,75 мм. Вибір параметрів друку здійснювався з урахуванням рекомендацій виробника матеріалу, технологічних вимог до якості виробу та досвіду виготовлення попередніх прототипів [39].

Для забезпечення необхідної точності розмірів, механічної міцності та стабільності геометрії корпусу були встановлені такі основні параметри друку [41]:

- температура сопла становила 200–210 °C;
- температура платформи підтримувалася в межах 50–60 °C;
- висота шару була обрана на рівні 0,2 мм, що забезпечує достатню якість поверхні та точність виготовлення деталей;
- швидкість друку становила 50 мм/с, що є оптимальним значенням для поєднання якості друку та часу виготовлення;
- щільність заповнення внутрішнього об'єму деталей становила 15–20 %, що забезпечує необхідну механічну міцність конструкції при раціональному використанні матеріалу;
- кількість зовнішніх стінок становила три, що підвищує жорсткість корпусу та забезпечує надійну фіксацію елементів конструкції.

Орієнтація деталей під час друку була визначена з урахуванням особливостей геометрії корпусу та напрямків можливих механічних навантажень [40]. Деталі розташовувалися таким чином, щоб мінімізувати використання підтримуючих структур і підвищити міцність конструкції у найбільш навантажених зонах. Критичні поверхні, зокрема дисплейне вікно та посадочні місця для електронних компонентів, орієнтувалися паралельно платформі принтера для забезпечення максимальної точності розмірів і високої якості поверхні [41].

Тривалість виготовлення корпусу становила приблизно 12–15 годин залежно від складності геометрії деталей та встановлених параметрів друку. Загальна маса виготовленого корпусу становить близько 200 г, що відповідає вимогам до портативних пристроїв та забезпечує зручність експлуатації тепловізора [39].

4.4 Постобробка та монтаж компонентів

Після завершення процесу 3D-друку корпус піддавався мінімальній постобробці, необхідній для забезпечення належної якості поверхні та точності посадочних місць. Основні операції постобробки включали видалення підтримуючих структур, очищення поверхонь від залишків пластику, що утворилися під час друку, а також легке шліфування критичних поверхонь дрібнозернистим абразивним матеріалом із зернистістю 400–600. Застосування шліфування дозволило покращити якість поверхні деталей та усунути незначні дефекти, пов'язані з пошаровим формуванням виробу.

На рисунку 4.14 представлено надрукований та постоброблений прототип корпусу без встановлених електронних компонентів.

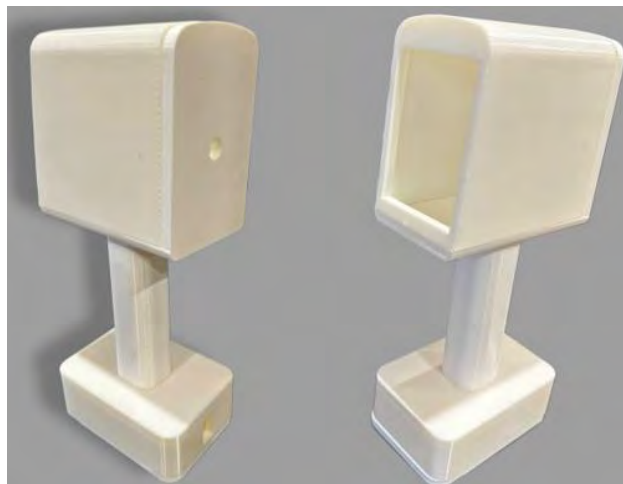


Рисунок 4.14. Надрукований та постоброблений прототип корпусу без встановлених електронних компонентів

Результати виготовлення корпусу методом 3D-друку підтвердили правильність прийнятих конструктивних рішень. Усі елементи корпусу відповідали розрахунковим

геометричним розмірам із допуском приблизно $\pm 0,5$ мм, що дозволило виконати монтаж електронних компонентів без додаткових механічних доробок. Посадочні місця для мікроконтролерної плати, дисплея та інфрачервоного сенсора забезпечили надійну фіксацію компонентів і точне позиціонування в межах конструкції корпусу.

Монтаж електронних компонентів у корпус виконувався послідовно з урахуванням конструктивних особливостей пристрою та зручності складання. Спочатку встановлювалася мікроконтролерна плата та схема обробки сигналів, після чого монтувався інфрачервоний сенсор. Далі здійснювалося встановлення TFT-дисплея та акумуляторної батареї. Така послідовність забезпечила зручність монтажу та зменшила ризик пошкодження компонентів під час складання.

Усі електронні компоненти фіксувалися в корпусі за допомогою гвинтових з'єднань типорозміру М3 та стандартних кріпильних елементів, що забезпечило надійність механічної фіксації, стійкість до вібрацій і можливість багаторазового розбирання конструкції у разі проведення технічного обслуговування або модернізації пристрою.

На рисунку 4.15 представлено виготовлений прототип корпусу зі встановленими електронними компонентами.



Рисунок 4.15. Виготовлений прототип корпусу зі встановленими електронними компонентами

Висновок до розділу 4

У четвертому розділі виконано проєктування, виготовлення та складання корпусу портативного тепловізора з урахуванням вимог до ергономічності, міцності та зручності експлуатації. Конструкцію корпусу розроблено в середовищі SolidWorks із урахуванням габаритів усіх електронних компонентів, що дозволило забезпечити раціональне компоновання та компактність пристрою.

Корпус спроектовано за модульним принципом, що забезпечує простоту складання, обслуговування та можливість модернізації. Особливу увагу приділено ергономіці: передбачено зручну ручку для утримання, оптимальне розташування дисплея, сенсора та органів керування, а також доступ до зарядного порту без необхідності розбирання пристрою.

Для виготовлення корпусу обрано матеріал PLA, який забезпечує достатню міцність, точність виготовлення та простоту 3D-друку при мінімальних витратах. Визначено оптимальні параметри друку, що дозволили отримати якісні деталі з необхідною геометричною точністю та механічною надійністю.

Після виготовлення виконано постобробку деталей та монтаж електронних компонентів. Результати показали відповідність виготовленого корпусу розрахунковим параметрам і забезпечили надійну фіксацію всіх елементів без додаткових доробок. Застосування гвинтових з'єднань підвищило надійність конструкції та забезпечило можливість багаторазового розбирання.

Таким чином, у четвертому розділі успішно реалізовано конструктивну частину проєкту, що забезпечує механічну цілісність, зручність використання та готовність пристрою до практичного застосування.

РОЗДІЛ 5. ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

5.1. Термограма долоні людини

На рисунку 5.1 наведено термограми долоні людини, отримані портативним тепловізором з відстані приблизно 0,4–0,5 м. Зображення демонструє характерний розподіл температури по поверхні кисті: найтепліші ділянки, зокрема центральна частина долоні та області біля основи пальців, відображаються жовто-червоними відтінками. Максимальна температура у кадрі становить приблизно 31,0–32,1 °С.

Периферійні області долоні та пальців мають нижчу температуру і відображаються зеленими або жовто-зеленими відтінками. Фон навколишнього середовища візуалізується синіми тонами; мінімальна температура у кадрі становить близько 19,5–20,9 °С. У центрі кадру відображається температура контрольної точки, яка для наведених прикладів становить приблизно 27,1 °С та 30,3 °С.

Отримані результати підтверджують придатність розробленого пристрою для наочного контролю теплового розподілу та скринінгових вимірювань, водночас можливості детального аналізу дрібних температурних градієнтів залишаються обмеженими.

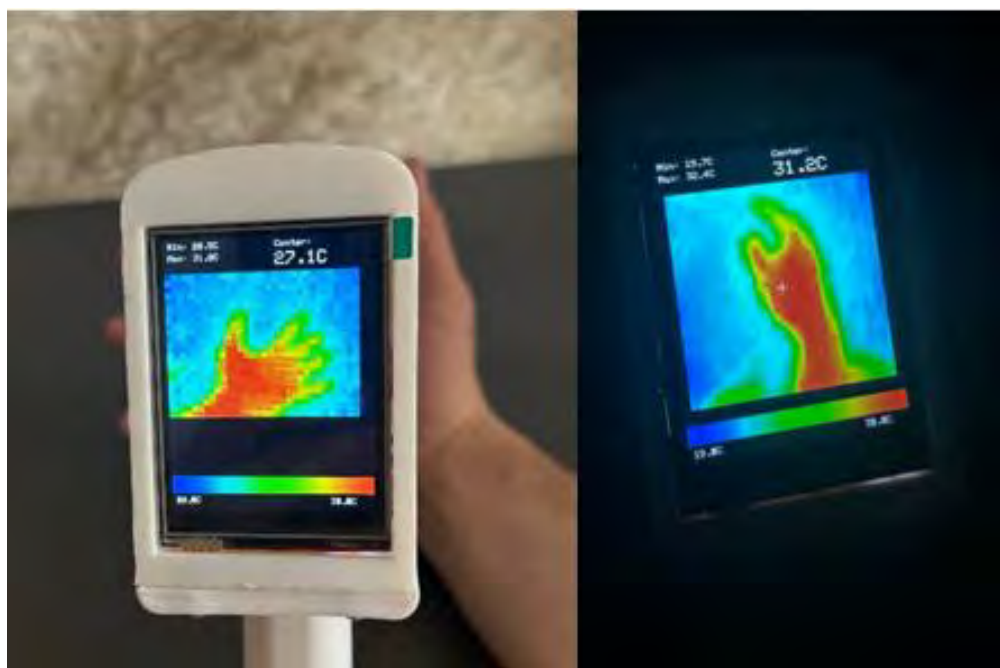


Рисунок 5.1 Термограма долоні людини до інтерполяції та після

5.2. Термограма чашки з гарячою рідиною

Рисунок 5.2 демонструє термограму керамічної чашки, наповненої гарячою водою. На зображенні чітко виділяється зона з підвищеною температурою в центральній частині чашки, що відповідає нагрітій рідині; максимальна температура у кадрі становить близько $58,8^{\circ}\text{C}$, а температура в контрольній точці в центрі — $54,9^{\circ}\text{C}$. Стінки чашки мають дещо нижчу температуру внаслідок теплової інерції кераміки та візуалізуються жовто-помаранчевими відтінками. Ручка чашки, яка не перебуває в безпосередньому контакті з гарячою водою, залишається значно холоднішою і відображається зеленими тонами. Навколишнє середовище (поверхня столу та фон) має температуру, близьку до кімнатної, що підтверджується мінімальним значенням $21,4^{\circ}\text{C}$ та відображенням у синіх відтінках. Отримана термограма наочно ілюструє здатність розробленого тепловізора реєструвати температурні градієнти та контраст між нагрітими і холодними об'єктами, що є важливим для контролю процесів нагрівання та побутової теплової діагностики.

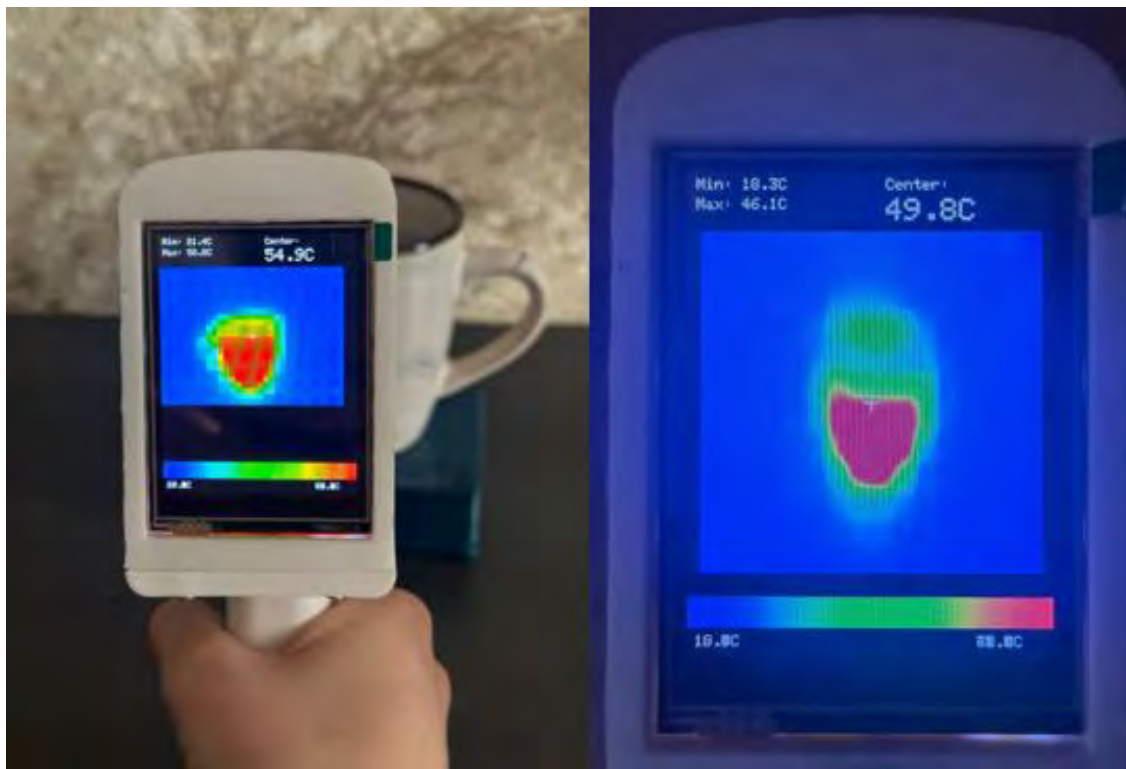


Рисунок 5.2 Термограма чашки з гарячою рідиною до та після інтерполяції.

5.3. Термограма електронного пристрою

а рисунку 5.3 наведено термограму працюючого ноутбука після 20–30 хвилин роботи під навантаженням. Ноутбук розміщено у перевернутому положенні, при цьому в полі зору тепловізора знаходиться зона виходу нагрітого повітря з системи охолодження. На зображенні чітко виділяється локальна область підвищеної температури (жовто-червоні відтінки), що відповідає потоку теплого повітря, яке відводиться від внутрішніх компонентів. Максимальна температура у кадрі становить близько 37,7 °С, а температура в контрольній точці — 39,8 °С. Навколишні ділянки корпусу та фону мають температуру, близьку до кімнатної, і візуалізуються зеленими та синіми відтінками (мінімум близько 20,4 °С). Через обмежену просторову роздільну здатність матриці тепловізора неможливо ідентифікувати окремі електронні компоненти, однак отримана термограма дозволяє наочно оцінити ефективність роботи системи охолодження та характер розсіювання тепла електронного пристрою.

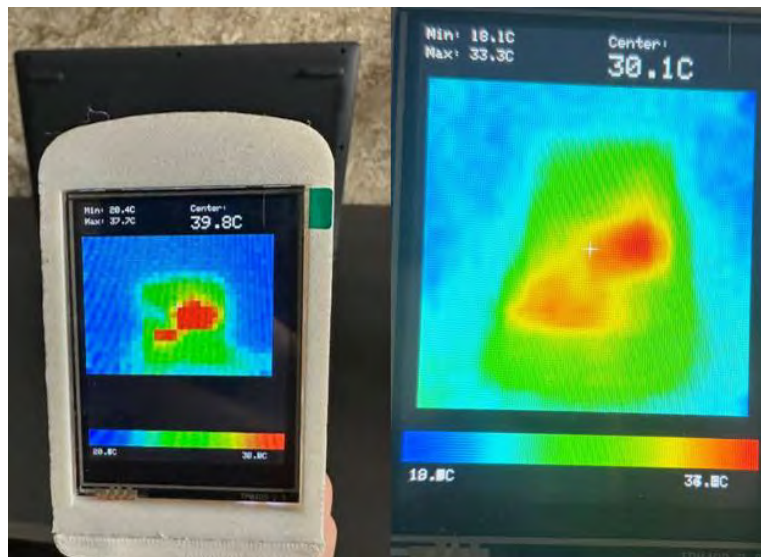


Рисунок 5.3 Термограма електронного пристрою до та після інтерполяції.

5.4. Термограма тіла тварини та людини

На рисунку 5.4 наведено результати тестування розробленого портативного тепловізора під час спостереження за тепловим полем біологічних об'єктів —

чоловічого та жіночого тіла, а також тіла домашньої тварини (кота). Об'єкти дослідження розміщувалися на відстані близько 0,4–0,6 м від пристрою, що забезпечувало стабільне формування термограми та достатню деталізацію температурного розподілу.

На отриманих термограмах чітко простежуються характерні контури досліджуваних об'єктів, що дозволяє візуально ідентифікувати тип об'єкта — тіло людини або тварини. Зокрема, на зображеннях добре помітні форма тулуба, положення рук, а також компактні розміри та характерна форма тіла кота. Найбільш нагріті ділянки відображаються у жовто-червоних відтінках і відповідають зонам інтенсивного тепловиділення, таким як грудна клітка, голова та кінцівки. Менш нагріті області навколишнього середовища візуалізуються зеленими та синіми кольорами.

Максимальні значення температури під час тестування перебували в межах приблизно 33–34 °C для людини та дещо нижчими для тварини, тоді як температура фону становила близько 19–20 °C. Незважаючи на обмежену просторову роздільну здатність сенсора, отримані термограми демонструють достатню інформативність і дозволяють чітко розрізняти різні типи біологічних об'єктів за їх тепловим випромінюванням.

У підсумку, результати тестування підтверджують працездатність розробленої системи та її здатність формувати наочні термограми, на яких чітко відображаються контури чоловічого та жіночого тіла, а також тіла кота, що свідчить про коректну роботу алгоритмів збору та візуалізації теплових даних

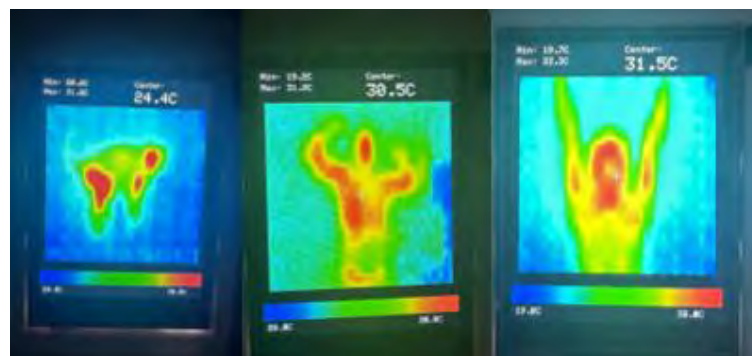


Рисунок 5.4. Термограма тіл людей та тварин

Висновок до розділу 5

У п'ятому розділі проведено експериментальне дослідження розробленої тепловізійної системи з метою перевірки її працездатності та оцінки якості отриманих результатів. Тестування виконувалося на різних об'єктах, зокрема на людському тілі, нагрітих предметах та електронних пристроях, що дозволило оцінити здатність системи відображати температурні розподіли в реальних умовах.

Отримані термограми підтвердили коректність роботи сенсора, алгоритмів обробки даних та візуалізації. Пристрій продемонстрував достатню чутливість для виявлення температурних відмінностей, а також стабільність роботи без суттєвих спотворень чи збоїв. Динамічна адаптація температурного діапазону забезпечила хорошу контрастність зображень незалежно від умов спостереження.

Окремо перевірено зручність використання пристрою та функціонування додаткових можливостей, зокрема передачі даних. Результати тестування показали, що система є придатною для практичного застосування в задачах контролю температурних режимів та візуалізації теплових процесів.

Таким чином, проведені випробування підтвердили працездатність, надійність та ефективність розробленого тепловізора, а також відповідність його характеристик поставленим вимогам.

ВИСНОВОК

У результаті виконання дипломного проекту було розроблено портативну тепловізійну систему, призначену для безконтактного контролю температурних полів об'єктів у реальному часі. Проведено ґрунтовний аналіз існуючих методів теплового контролю, фізичних основ інфрачервоного випромінювання та сучасних технічних рішень у галузі тепловізійної техніки, що дозволило обґрунтувати вибір безконтактного методу як найбільш ефективного для поставленої задачі.

У роботі здійснено вибір та обґрунтування елементної бази системи. Як основний сенсор обрано інфрачервону матрицю MLX90640, що забезпечує оптимальне співвідношення вартості, роздільної здатності та простоти інтеграції. Для обробки даних використано мікроконтролер ESP32-S3, який забезпечує достатню продуктивність для реалізації алгоритмів обробки та візуалізації теплових даних у режимі реального часу. В якості засобу відображення обрано TFT-дисплей на базі контролера ILI9341, що дозволяє формувати інформативні псевдокольорові термограми.

Було розроблено структурну та схемотехнічну реалізацію пристрою, а також алгоритми збору, обробки та візуалізації температурних даних. Реалізовано програмне забезпечення, яке включає алгоритми нормалізації температур, псевдокольорового кодування, динамічної адаптації діапазону та формування інтерфейсу користувача. Додатково реалізовано функцію передачі теплових знімків через BLE, що розширює функціональні можливості системи.

Окрему увагу приділено розробці конструкції корпусу пристрою з використанням САПР SolidWorks та його виготовленню методом 3D-друку. Обрано матеріал PLA як оптимальний з точки зору вартості, технологічності та умов експлуатації. Проведено збірку прототипу та інтеграцію всіх компонентів у єдину систему.

Результати експериментального тестування підтвердили працездатність розробленого тепловізора та його здатність виявляти температурні аномалії, формувати наочні термограми та забезпечувати достатню інформативність для

практичних задач. Пристрій успішно продемонстрував можливість використання для діагностики біологічних об'єктів, електронних пристроїв та побутових систем.

У висновку, поставлена мета дипломного проекту досягнута, а розроблена портативна тепловізійна система може бути використана як доступний інструмент для теплового контролю в різних сферах застосування. Перспективами подальшого розвитку є підвищення роздільної здатності, оптимізація алгоритмів обробки зображення та розширення функціональних можливостей пристрою.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

- [1] Maldague X. P. V. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York : Wiley, 2001. 684 p.
- [2] Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F. G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*. 2014. Vol. 14, No. 7. P. 12305–12348.
- [3] Протасов А. Г., Лисенко Ю.Ю. Технології теплового неруйнівного контролю. 2021р.133 стор. Електронна форма: <https://ela.kpi.ua/items/4e633b39-2e61-4dc6-b4ca-ff297b8c7f8b>
- [4] ISO 18434-1:2008. *Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures*. Geneva : International Organization for Standardization, 2008.
- [5] Bentley J. P. *Principles of Measurement Systems*. 4th ed. Harlow : Pearson Education, 2005. 594 p.
- [6] Doebelin E. O., Manik D. N. *Measurement Systems: Application and Design*. 6th ed. New York : McGraw-Hill, 2011. 928 p.
- [7] Holst G. C. *Electro-Optical Imaging System Performance*. 4th ed. Bellingham : SPIE Press, 2008. 864 p.
- [8] Rogalski A. *Infrared Detectors*. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2010. 876 p.
- [9] Kruse P. W. *Uncooled Thermal Imaging: Arrays, Systems, and Applications*. Bellingham : SPIE Press, 2001. 703 p.
- [10] FLIR Systems. *Infrared Camera Technology and Applications*. Technical Notes. Wilsonville : FLIR Systems, 2011.
- [11] Bhowmik B., Mahato S. *Recent Advances in Uncooled Infrared Detector Technology*. Singapore : Springer, 2020. 320 p.
- [12] Kaplan H. *Commercial Thermal Imaging: Applications and Hardware*. Bellingham : SPIE Press, 2017. 350 p.
- [13] Panasonic Industrial Devices. *Grid-EYE (AMG88) Infrared Array Sensor Technical Specifications*. Osaka : Panasonic Corporation, 2021.

- [14] Melexis Microelectronic Systems. *MLX90640 32×24 IR Array Datasheet*. Rev. 3. Tessenderlo : Melexis, 2022.
- [15] Mesas-Carrascosa F. J., Santano D. V. et al. Analysis of a low-cost thermal camera MLX90640 for surveillance and control. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 3.
- [16] Solomon Systech Limited. *SSD1306: 128 × 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller Datasheet*. Hong Kong : Solomon Systech Ltd.
- [17] Sino Wealth Electronic Ltd. *SH1106: 132 × 64 Dot Matrix OLED/LCD Controller Driver Datasheet*. Shanghai : Sino Wealth Electronic Ltd.
- [18] Sitronix Technology Corp. *ST7735/ST7735S: 262K Color Single-Chip TFT Controller/Driver Datasheet*. Hsinchu : Sitronix Technology Corp.
- [19] Sitronix Technology Corp. *ST7789V: TFT LCD Single Chip Driver Datasheet*. Hsinchu : Sitronix Technology Corp.
- [20] ILITEK Corp. *ILI9341: a-Si TFT LCD Single Chip Driver 240RGB × 320 Resolution and 262K Colors Datasheet*. Hsinchu : ILITEK Corp.
- [21] Barr M., Massa A. *Programming Embedded Systems*. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2006. 336 p.
- [22] Monk S. *Programming Arduino: Getting Started with Sketches*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2016. 192 p.
- [23] Microchip Technology. *ATmega328P Datasheet*. Chandler : Microchip Technology Inc.
- [24] STMicroelectronics. *STM32F103 Reference Manual*. Geneva : STMicroelectronics.
- [25] Raspberry Pi Ltd. *RP2040 Datasheet*. Cambridge : Raspberry Pi Ltd.
- [26] Espressif Systems. *ESP32-S3 Technical Reference Manual*. Shanghai : Espressif Systems, 2023.
- [27] Erickson R. W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics*. 2nd ed. New York : Springer, 2001. 883 p.
- [28] Texas Instruments. *Battery Charging and Power Path Management for Portable Devices*. Dallas : Texas Instruments, 2020.

- [29] Panasonic. *Lithium-Ion Batteries Technical Handbook*. Osaka : Panasonic Corporation, 2019.
- [30] Linden D., Reddy T. B. *Handbook of Batteries*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 2011. 1500 p.
- [31] Buttazzo G. C. *Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications*. 3rd ed. New York : Springer, 2011. 514 p.
- [32] FreeRTOS Foundation. *FreeRTOS Reference Manual*. 2023.
- [33] Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 1220 p.
- [34] XPT2046. *Touch Screen Controller Datasheet*.
- [35] Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 4th ed. Harlow : Pearson, 2018. 1168 p.
- [36] Heath S. *Embedded Systems Design*. 2nd ed. Oxford : Newnes, 2003. 456 p.
- [37] Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. 3rd ed. Cham : Springer, 2021. 760 p.
- [38] Chua C. K., Leong K. F. *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*. 5th ed. Singapore : World Scientific, 2017. 400 p.
- [39] Ultimaker B. V. *Material Guide for PLA, ABS and PETG*. Utrecht : Ultimaker, 2022.
- [40] Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172–196.
- [41] Prusa Research. *3D Printing Handbook*. Prague : Prusa Research, 2022.
- [42] Технології теплового неруйнівного контролю. Лабораторний практикум: навчальний посібник / А.Г. Протасов, Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 90 с.
- [43] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

- [44] Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
- [45] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
- [46] Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
- [47] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [48] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
- [49] Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С. Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 5. с. 25-29.
- [50] Image Fusion as an Augmentation Method to Improve the Classification Efficiency of Thermal Images / D. Storozhyk, A. Protasov, I. Lysenko, Y. Steshenko, A. Alexiev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2025. – Volume 8, Issue 2. – 77-84 pp. ISSN: 2603-4018, eISSN: 2603-4646
- [51] Storozhyk D., A. Protasov, Y. Kuts, O. Muraviov, I. Lysenko, Y. Mirchev (2024) Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol.54, pp. 242-252.