

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»
УДК 004.932.2

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
« ____ » _____ 2024

Магістерська дисертація

**на здобуття ступеня магістра за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка» на тему: «Комп'ютерно-інтегрований портативний
теплорегулятор»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПО-31мп
Залізняка Максим Ігорович _____

Керівник:

д.т.н., професор
Боровицький Володимир Миколайович _____

Консультант зі стартап-проекту:

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної
кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського
Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

Доцент, к.т.н.,
Дорожинська Ганна Василівна _____

Засвідчую, що у цій
магістерській дисертації
немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма - «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента

Залізняка Максиму Ігоровичу

1. Тема дисертації «Комп'ютерно-інтегрований портативний теплопеленгатор», науковий керівник дисертації Боровицький Володимир Миколайович, д.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від

« ___ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації: 9 грудня 2024 року

3. Об'єкт дослідження: теплопеленгатор з матричним фотоприймачем.

4. Предмет дослідження: формування, обробка та відображення сигналів в теплопеленгаторі.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Порівняльний аналіз тепlopеленгаторів та приймачів оптичного випромінювання для тепlopеленгаторів.

5.2. Дослідження формування сигналів в тепlopеленгаторі, вибір та обґрунтування методу цифрової обробки сигналів в тепlopеленгаторі.

5.3. Вибір та обґрунтування побудови апаратної частини комп'ютерно інтегрованого тепlopеленгатора.

5.4. Розробка програмного забезпечення комп'ютерно-інтегрованого тепlopеленгатора.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: структурна та функціональна схеми тепlopеленгатора, 3D модель тепlopеленгатора, схема електрична принципова тепlopеленгатора ОЕС з мікроконтролером, структурна схема програмного забезпечення та блок-схеми алгоритмів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 стаття в матеріалах конференції

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання 30 жовтня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Порівняльний аналіз теплопеленгаторів та приймачів оптичного випромінювання для теплопеленгаторів	10.11.2024	
2.	Дослідження формування сигналів в теплопеленгаторі	15.11.2024	
3.	Вибір та обґрунтування методу цифрової обробки сигналів в теплопеленгаторі	15.11.2024	
4.	Вибір та обґрунтування побудови апаратної частини комп'ютерно-інтегрованого теплопеленгатора	30.11.2024	
5.	Розробка програмного забезпечення комп'ютерно-інтегрованого теплопеленгатора	30.11.2024	
6.	Розроблення стартап-проєкту	30.11.2024	
7.	Підготовка графічного (ілюстративного) матеріалу	9.12.2024	
8.	Підготовка магістерської дисертації	9.12.2024	

Студент

Максим ЗАЛІЗНЯК

Науковий керівник дисертації

Володимир БОРОВИЦЬКИЙ

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Комп'ютерно-інтегрований портативний
теплопеленгатор»

РЕФЕРАТ

Основною метою даної магістерської дисертації присвячена створенню сучасного портативного тепlopеленгатора з використанням мікроконтролера ESP, який призначений для виявлення та аналізу теплових зображень у різних умовах.

Метою дослідження є розробка компактного та ефективного пристрою, здатного реєструвати теплові випромінювання об'єктів. На відміну від попередніх розробок, цей тепlopеленгатор поєднує мінімальні розміри, низьке енергоспоживання та високу точність визначення температурних змін. У процесі роботи було проаналізовано існуючі технічні рішення в сфері теплової діагностики. Особливу увагу приділено вибору найбільш чутливих теплових сенсорів та розробці алгоритмів обробки зображень, які дозволяють миттєво перетворювати теплове випромінювання на зрозумілу картину.

Практична цінність проєкту полягає в універсальності застосування тепlopеленгатора. Він може бути корисним у багатьох сферах - від військової промисловості, промислової діагностики обладнання до пошукових операцій та наукових досліджень.

Розроблений пристрій демонструє високу надійність та точність визначення температурних відмінностей. Завдяки компактній конструкції та продуманій електронній начинці, тепlopеленгатор здатен працювати в складних польових умовах.

Результати дослідження показують перспективність подальшого розвитку портативних тепlopеленгаційних систем та їх потенціал для впровадження в різноманітні галузі людської діяльності.

Ключові слова: комп'ютерно-інтегрована система, оптико-електронна система, мікроконтролер ESP32, мікроконтролер STM32, оптичні сенсори, обробка даних, програмне забезпечення, апаратні компоненти, автоматизація, цифрова обробка сигналів

ABSTRACT

The main purpose of this thesis is to create a modern portable thermal imager using an ESP microcontroller, which is designed to detect and analyze thermal images in various conditions.

The aim of the research is to develop a compact and efficient device capable of recording thermal radiation of objects. Unlike previous developments, this thermal imager combines minimal size, low power consumption, and high accuracy of temperature changes. In the course of the work, existing technical solutions in the field of thermal diagnostics were analyzed. Particular attention was paid to the selection of the most sensitive thermal sensors and the development of image processing algorithms that allow for instant conversion of thermal radiation into a clear picture.

The practical value of the project lies in the versatility of the thermal direction finder. It can be useful in many areas - from the military industry, industrial equipment diagnostics to search operations and scientific research.

The developed device demonstrates high reliability and accuracy in determining temperature differences. Due to its compact design and sophisticated electronic filling, the heat finder is able to operate in difficult field conditions. The results of the study show the prospects for further development of portable heat direction finding systems and their potential for implementation in various fields of human activity.

Keywords: computer-integrated system, optoelectronic system, microcontroller ESP32, microcontroller STM32, optical sensors, data processing, software, hardware components, automation, digital signal processing

Зміст

Розділ 1. Порівняльний аналіз тепlopеленгаторів та їх приймачів оптичного випромінювання	10
1.1 Огляд та розвиток тепlopеленгаторів	12
1.2 Аналіз існуючих моделей на ринку	14
Висновок до розділу 1	21
Розділ 2. Математична модель формування сигналів в комп'ютерно-інтегрованому портативному тепlopеленгаторі	23
2.1 Огляд датчика MLX90640	23
2.2 Інтерполяція теплових даних	24
2.3 Оптичні міркування: числова апертура	27
2.4 Дискретизація Найквіста і просторова роздільна здатність	29
2.5 Обмежена дифракцією роздільна здатність	31
2.6 Обробка сигналів: Синусоїдальні функції та гексагональні сітки	33
Висновок до розділу 2	35
Розділ 3. Апаратне забезпечення комп'ютерно-інтегрованого портативного тепlopеленгатора	36
3.1 Мікроконтролер STM32F401 та ESP32	36
3.2 Дисплей ST7789	38
3.3 Тепловий сенсор MLX90640	40
3.4 Корпус	41
Висновок до розділу 3	47
Розділ 4. Розробка програмного забезпечення комп'ютерно-інтегрованого тепlopеленгатора	48
4.1 Підключення дисплея	48
4.2 Конфігурація мікроконтролера	50
4.3 Програмна ініціалізація та результат	53
4.4 Протокол I ² C	55
4.5 Розробка ПЗ на ESP32	56
Висновок до розділу 4	66
Розділ 5. Розроблення стартап-проєкту «Комп'ютерно-інтегрований портативний тепlopеленгатора»	68
5.1 Опис ідеї проєкту	68
5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту	73

5.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту	86
5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	93
5.5 Бізнес-модель та реалізація стартап-проєкту	100
Висновок до стартап-проєкту	104
Висновок	105

Перелік умовних значень і скорочень

МК – Мікроконтролер

ППО - Протиповітряна оборона

GPS - Global Positioning System (система глобального позиціонування)

FOV - Field of view (поле зору)

ІЧ - Інфрачервоне випромінювання

ПЗ – Програмне забезпечення

GND - загальний провід

VCC - живлення 3.3В

SCL - тактовий сигнал SPI

SDA - лінія передачі даних

RES - сигнал скидання

DC - вибір типу даних (команди/дані)

BLK - керування яскравістю підсвітки

Розділ 1. Порівняльний аналіз тепlopеленгаторів та їх приймачів оптичного випромінювання

Вступ

Тепlopеленгатори тісно пов'язані з тепловізорами, вони є високотехнологічними пристроями, які відіграють важливу роль у сучасних системах виявлення та відстеження об'єктів. Ці прилади працюють на принципі детектування та аналізу інфрачервоного випромінювання, що дозволяє їм визначати напрямок джерела теплового випромінювання навіть в умовах обмеженої видимості або повної темряви.

Ці прилади мають унікальну здатність візуалізувати теплове випромінювання об'єктів, перетворюючи невидиме для людського ока інфрачервоне випромінювання у видиме зображення. Теплові камери з деякою точністю фіксують температуру різних об'єктів у кадрі, а потім призначають кожній температурі відтінок кольору, який дозволяє побачити, скільки тепла об'єкт випромінює в порівнянні з іншими об'єктами навколо нього. Більш низькій температурі відповідає синьому, пурпуровому або зеленому кольору, тоді як більш високій температурі може бути призначений червоний, помаранчевий або жовтий колір. Деякі теплові камери використовують градації сірого для представлення теплового зображення. Тепlopеленгатори являють собою синтез досягнень у галузі інфрачервоної технології, оптики та цифрової обробки сигналів, що робить їх незамінними в багатьох сферах застосування. Історія розвитку тепlopеленгаторів тісно пов'язана з прогресом у галузі інфрачервоної техніки та військових технологій. Перші прототипи цих пристроїв з'явилися в середині ХХ століття і спочатку використовувалися виключно у військовій сфері. З часом, завдяки вдосконаленню технологій та зниженню вартості виробництва, тепlopеленгатори знайшли застосування і в цивільних галузях.

У сучасному світі тепlopеленгатори широко застосовуються у різноманітних сферах. У військовій справі вони є ключовим компонентом систем

протиповітряної оборони, дозволяючи виявляти та відстежувати літальні апарати противника за їх тепловим випромінюванням. Системи наведення ракет часто використовують теплопеленгатори для точного визначення цілі. У сфері безпеки та охорони теплопеленгатори застосовуються для виявлення несанкціонованого проникнення на об'єкти, що охороняються, особливо в нічний час або в умовах поганої видимості.

У промисловості теплопеленгатори знаходять застосування в системах моніторингу та діагностики обладнання, дозволяючи виявляти теплові випромінювання у режимі роботи механізмів ще до виникнення серйозних несправностей. У енергетичному секторі ці пристрої використовуються для контролю стану ліній електропередач та трансформаторних підстанцій, допомагаючи запобігати аваріям та оптимізувати обслуговування інфраструктури.

Медична галузь також активно впроваджує тепловізійні технології для діагностики запальних процесів та скринінгу на наявність підвищеної температури, що особливо актуально в умовах епідемії.

Екологи та дослідники природи застосовують теплопеленгатори для вивчення поведінки тварин у природному середовищі, особливо нічних або прихованих видів.

У сфері пошуково-рятувальних операцій ці прилади допомагають знаходити людей у складних умовах, наприклад, під завалами або в лісових масивах.

Принцип роботи теплопеленгатора базується на детектуванні інфрачервоного випромінювання, яке випромінюють всі об'єкти з температурою вище абсолютного нуля. Зараз теплопеленгатори використовують матриці високочутливих інфрачервоних детекторів, які перетворюють теплове випромінювання в електричні сигнали. Цей сигнал потім обробляється за допомогою алгоритмів, що дозволяє не тільки виявляти джерела тепла, але й визначати їх напрямок, відстань, а в деяких випадках навіть форму та розміри.

Ключовими компонентами тепlopеленгатора є оптична система, що фокусує інфрачервоне випромінювання, детектор або матриця детекторів, система охолодження (для деяких типів приладів), електронні схеми обробки сигналів, мікроконтролер (МК) та пристрої відображення інформації (дислей). Сучасні тепlopеленгатори часто інтегруються з іншими системами, такими як GPS, цифрові карти та системи зв'язку, що розширює їх функціональні можливості.

1.1 Огляд та розвиток тепlopеленгаторів

Теплове випромінювання як фізичне явище вивчали з XVIII століття. Дослідження почалися з відкриття інфрачервоного випромінювання Вільямом Гершелем у 1800 році. Це стало основою для подальшого розуміння теплових процесів і розроблення приладів, здатних реєструвати інфрачервоне випромінювання.

У XIX столітті було винайдено кілька приладів, таких як болометр (Семюель Ленглі, 1878), які використовувалися для вимірювання змін температури. Хоча ці пристрої не могли точно визначати напрямок та джерело тепла, вони заклали основи інфрачервоних технологій.

У першій половині XX століття почали з'являтися перші прилади для роботи з ІЧ. Під час Першої світової війни технології інфрачервоного виявлення почали використовуватися в найпростіших оптичних системах, проте їх ефективність була мала.

Під час Другої світової війни розвиток технологій значно прискорився. Німеччина розробила прилади нічного бачення та інфрачервоні прожектори для виявлення цілей у темряві. Хоча ці пристрої були громіздкими і вимагали значного енергоспоживання, вони стали прообразами майбутніх тепlopеленгаторів.

Після Другої світової війни почалося активне розроблення інфрачервоних систем у США і СРСР. У 1950-х роках технології інфрачервоної термографії були адаптовані для використання у військових цілях, таких як виявлення

теплових слідів від двигунів літаків і наземних транспортних засобів.

Теплопеленгатори почали розроблятися як спеціалізовані пристрої для визначення напрямку джерела тепла. Застосування таких систем включало:

- системи наведення ракет: для наведення на теплову сигнатуру двигунів.
- Пошук цілей: виявлення рухомих об'єктів на тлі навколишнього теплового шуму.

У цей період широке застосування знайшли теплові детектори на основі термопар і пірометрів, які використовувалися в перших теплопеленгаторах (Рис. 1).



Рис. 1 - Су-24М

З розвитком напівпровідникових технологій у 1980-х роках з'явилися детектори на основі фотоприймачів (наприклад, ПЗС-матриці), які забезпечували високу точність виявлення теплового випромінювання.

Системи теплопеленгації почали доповнюватися елементами автоматизації, що дало змогу використовувати алгоритми штучного інтелекту для аналізу теплових даних у майбутньому.

Сучасні пристрої стали компактними та енергоефективними. Вони оснащуються такими компонентами, як:

- Інфрачервоні матриці з високою роздільною здатністю.
- Лазерні далекоміри для визначення відстані до об'єкта.
- Інтеграція з системами штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання об'єктів.

1.2 Аналіз існуючих моделей на ринку

Теплопеленгатори та приймачі оптичного випромінювання є ключовими компонентами сучасних систем теплового виявлення, які широко застосовуються у військовому ділі, безпеці, промисловості, медицині та дослідженнях. Порівняльний аналіз таких пристроїв дозволяє оцінити їх ефективність, технічні характеристики та відповідність різним завданням.

Традиційні теплопеленгатори використовують інфрачервоні датчики, такі як болометри, термопари або фотодіоди. Вони дозволяють визначати джерела теплового випромінювання на основі різниці температур між об'єктами та фоном. Сучасні розробки все частіше включають мікроболометри або матриці на основі пірометричних матеріалів, що забезпечує високу точність і швидкість роботи. Наприклад, модулі FLIR і SEEK тепловізори орієнтовані на споживчий ринок та дають хорошу якість зображення при досить невеликій ціні. Їх популярність обумовлена інтеграцією в мобільні пристрої, що спрощує використання. Проте такі системи часто потребують спеціального програмного забезпечення для обробки даних.

Приймачі оптичного випромінювання для теплопеленгаторів бувають активними або пасивними. Активні системи включають лазерні або світлодіодні джерела, які підвищують контрастність виявлення. Сенсор MLX90640 - пасивний приймач, який має невелику потужність, але більш придатний для портативних і автономних пристроїв. MLX90640 виділяється своєю високою

роздільною здатністю серед аналогів, таких як MLX90614 або AMG8833, і дозволяє отримувати точні теплові показники в реальному часі при низькому енергоспоживанні.

Іншим важливим фактором порівняння є програмна складова. Наприклад, конкурентні системи на основі FLIR підтримують API для інтеграції з зовнішніми платформами, тоді як доступніші варіанти, наприклад, на базі MLX90640, можуть бути складнішими для програмування, але забезпечують значно більшу гнучкість і масштабованість.

На ринку представлено широкий спектр тепловизорів, які варіюються за технічними характеристиками, розмірами, ціною та сферою застосування. Основні виробники та моделі цих пристроїв включають FLIR Systems, SEEK Thermal, Hikmicro, Optris, та менш відомі бренди. Проведемо аналіз їх основних характеристик.



Рис. 2 - FLIR C5

FLIR є провідним виробником тепловизорів, які використовуються в промисловості, безпеці та для персонального застосування. Їх моделі, такі як FLIR C5 (Рис. 2), забезпечують компактність, зручність у використанні, інтеграцію з хмарними сервісами та високу роздільну здатність теплових зображень (160x120 пікселів). Такі пристрої оснащені функцією MSX, яка додає

візуальні деталі до теплового зображення, покращуючи інтерпретацію даних.

Моделі FLIR часто використовуються в професійних сферах через їх точність та надійність, але вони є дорогими, це робить їх менш доступними для широкого кола користувачів.

Характеристики FLIR C5:

- **Теплова роздільна здатність:** 160 x 120 пікселів.
- **Температурний діапазон:** від -20°C до +400°C.
- **Оптична камера:** 5 МП для покращення якості зображення.
- **Чутливість:** <70 мК для точного визначення різниць температур.
- **Поле зору:** 54° x 42°.
- **Розміри дисплея:** 3,5 дюйма, сенсорний екран.
- **Захищеність:** IP54 (пил та бризки).
- **Батарея:** літій-іонна, до 4 годин роботи.
- **Особливості:** Wi-Fi для передачі даних, вбудований LED-ліхтарик, можливість зберігати зображення у хмарі FLIR Ignite.

Ціна:

- Вартість складає близько \$759–819 залежно від продавця та комплектації. Пристрій націлений на професійне використання в інспекціях будівель, ремонті електромереж, HVAC-систем та інших задачах.

SEEK Thermal пропонує більш доступні моделі, наприклад, SEEK Compact Pro, які мають високу роздільну здатність (320x240 пікселів) і можливість інтеграції зі смартфонами. Вони відзначаються мобільністю та низькою вартістю порівняно з FLIR. Ці пристрої користуються попитом серед звичайних користувачів і невеликих компаній для виявлення витоків тепла. Однак їх програмна частина має обмежені можливості порівняно з FLIR.

Seek Thermal Compact Series пропонує кілька моделей, що відрізняються технічними характеристиками і ціною (Рис. 3). Ці пристрої використовуються в різних сферах, включаючи будівництво, інспекцію будівель, ремонт обладнання, а також для пошуково-рятувальних операцій.



Рис. 3 - Seek Compact

1. Seek Compact

- **Роздільна здатність сенсора:** 206 x 156.
- **Поле зору:** 36°.
- **Діапазон температур:** від -40 °C до 330 °C.
- **Частота кадрів:** <9 Гц.
- **Ціна:** \$199.
- **Особливості:** простий у використанні, портативний, включає водонепроникний чохол, підключається до смартфонів Android та iOS.

2. Seek CompactXR

- **Роздільна здатність сенсора:** 206 x 156.
- **Поле зору:** 20°.
- **Дальність виявлення:** до 550 м.
- **Ціна:** \$239.
- **Особливості:** вузьке поле зору забезпечує кращу деталізацію об'єктів на відстані.

3. Seek CompactPRO

- **Роздільна здатність сенсора:** 320 x 240.
- **Поле зору:** 32°.

- **Діапазон температур:** від -40 °С до 330 °С.
- **Частота кадрів:** >15 Гц.
- **Ціна:** \$399.
- **Особливості:** можливість ручного фокусування, широкий функціонал, включаючи контроль рівня і діапазону температур. Придатний для професійного використання в інспекції та пошуково-рятувальних операціях.

Ці моделі є прикладами портативних, доступних і високоефективних тепловізорів, орієнтованих на споживачів і професіоналів, які потребують термографії на мобільних пристроях. Нікмікро є порівняно новим гравцем на ринку тепловизорів. Їх пристрої, такі як Нікмікро Pocket2 (Рис. 4), пропонують хорошу роздільну здатність теплових сенсорів (256x192 пікселів) та вбудовані функції, включаючи Wi-Fi і можливості для збереження зображень. Нікмікро позиціонує себе як компанія, що пропонує оптимальне співвідношення ціни та якості. Проте вони менш відомі і часто програють FLIR у репутації та тривалості гарантії.



Рис. 4 - Нікмікро Pocket 2 об'єктами та фономю Сучасні розробки все частіше включають мікроболометри

1. Hikmicro Pocket 2

- **Роздільна здатність:** 256 × 192.
- **Температурний діапазон:** -20 °С до +550 °С.
- **Частота кадрів:** 25 Гц.
- **Екран:** 3,5” сенсорний дисплей (640 × 480).
- **Ціна:** близько \$599.
- **Особливості:** функція накладання термо та оптичного зображення, вбудована пам'ять на 16 ГБ, точність ± 2 °С, зручність для інспекцій у будівництві, HVAC, і ремонті.

2. Hikmicro B20

- **Роздільна здатність:** 256 × 192.
- **Температурний діапазон:** -20 °С до +550 °С.
- **Частота кадрів:** 25 Гц.
- **Ціна:** близько \$850.
- **Особливості:** вищий рівень деталізації завдяки технології Fusion, режиму PIP і чотирьом кольоровим палетам. Водонепроникний корпус (IP54).



Рис. 5 - Optris PI 160

Optris зосереджується на промислових системах. Їх моделі, такі як Optris PI, надають високу точність вимірювань і можливість безперервного моніторингу в реальному часі через ПК (Рис. 5). Ці пристрої ідеально підходять для інтеграції в автоматизовані системи, але вони дорогі та менш портативні, що обмежує їх використання для польових завдань.

1. Optris PI 160

- **Роздільна здатність:** 160×120 .
- **Температурний діапазон:** $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Частота кадрів:** 120 Гц.
- **Ціна:** від \$3,000.
- **Особливості:** висока частота кадрів для динамічних об'єктів, підключення до ПК для аналізу зображень.

2. Optris PI 400/450

- **Роздільна здатність:** 382×288 .
- **Температурний діапазон:** $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Ціна:** від \$7,000.
- **Особливості:** професійний рівень з максимальною деталізацією для промислових і наукових завдань.

Для розробників існують рішення на базі датчиків, таких як MLX90640 (Рис. 6) і AMG8833 (Рис. 6.1). Вони є недорогими, компактними та енергоефективними, але потребують додаткової обробки даних через мікроконтролери або комп'ютери. MLX90640 забезпечує роздільну здатність 32×24 пікселі, що достатньо для простих завдань. Такі модулі часто використовуються у саморобних проєктах або в навчальних цілях.



Рис. 6 - MLX90640

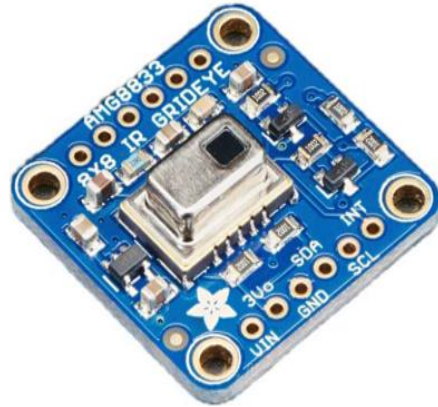


Рис. 6.1 - AMG8833

На ринку також представлені пристрої, інтегровані з мікроконтролерами, такими як STM32 або ESP32, які використовуються для обробки даних. Системи на базі ESP32 приваблюють низьким енергоспоживанням, розширеними можливостями підключення та підтримкою протоколів Wi-Fi і Bluetooth. Це робить їх оптимальними для портативних тепловеленгаторів, які використовуються для розвідки, пошуково-рятувальних операцій або моніторингу температурних дефектів.

Загалом, вибір тепловеленгатора та приймачів оптичного випромінювання залежить від таких факторів, як точність вимірювань, енергоспоживання, вартість і масштабованість системи. В сучасних умовах попит на портативність пристроїв зростає, тому поєднання датчиків високої роздільної здатності, таких як MLX90640, і МК з розширеною функціональністю, таких як ESP32, є перспективним напрямком.

Висновок до розділу 1

Теплові пеленгатори (тепловеленгатори) є важливим досягненням у сучасних системах виявлення та стеження. Вони поєднують в собі виявлення інфрачервоного випромінювання і цифрову обробку сигналу для перетворення

невидимої теплової енергії у видиме зображення. Історична еволюція цих пристроїв, починаючи з ранніх досліджень інфрачервоного випромінювання і закінчуючи військовим застосуванням, висвітлює значний технологічний прогрес, що призвів до створення компактних, надійних і універсальних інструментів.

Тепловізійні пеленгатори сьогодні використовуються в різних сферах, включаючи оборону, промислову діагностику, медичну візуалізацію та екологічні дослідження. Їх здатність працювати в умовах обмеженої видимості або повної темряви робить їх незамінними. Сучасні пристрої включають в себе такі функції, як інфрачервоні матриці, вдосконалену оптику та інтеграцію з GPS і системами штучного інтелекту, що підвищує їхню точність і зручність у використанні.

Розвиток таких систем базується на інноваціях в інфрачервоних технологіях, алгоритмах обробки сигналів та автоматизації. Ці пристрої пропонують цінність з точки зору безпеки, ефективності та точності, що відображає їх потенціал для ширшого впровадження та подальшого технологічного розвитку.

Розділ 2. Математична модель формування сигналів в комп'ютерно-інтегрованому портативному тепlopеленгаторі

2.1 Огляд датчика MLX90640

Датчик MLX90640 має матрицю 32x24 пікселів (Рис. 7). Поле зору (FOV) цього датчика може становити $55^\circ \times 35^\circ$, і кожен піксель фактично представляє підобласть цього FOV.

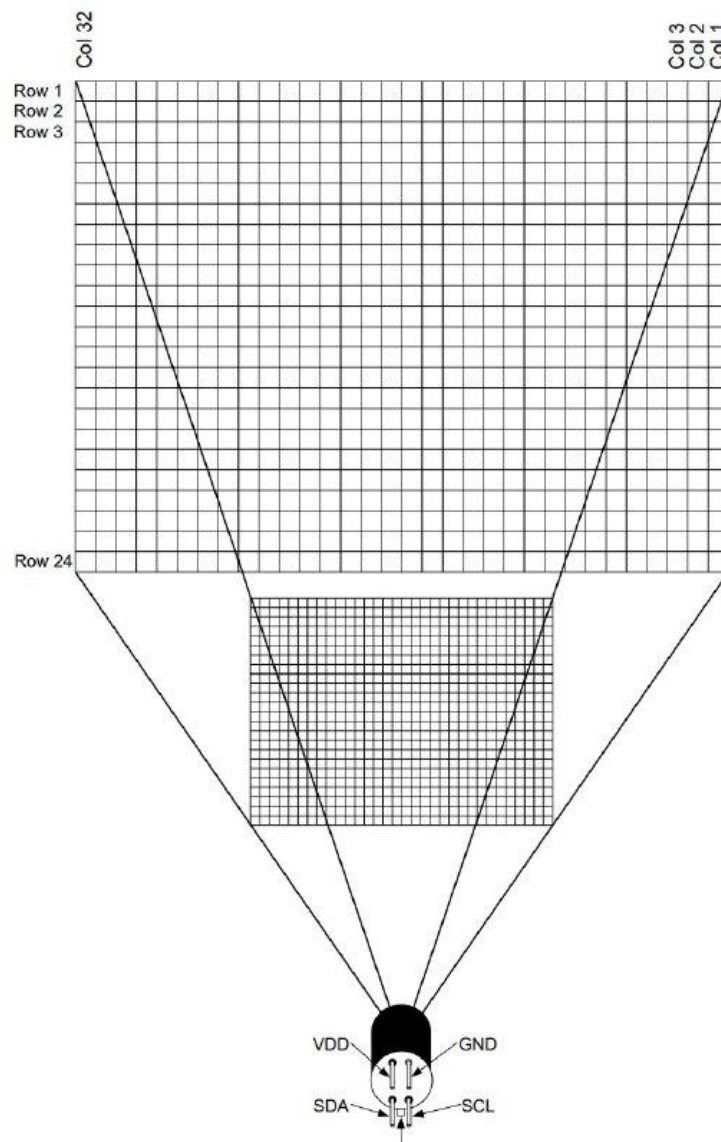


Рис. 7 - Піксель у повному куті огляду

В основі багатьох тепловізійних систем лежать такі датчики, як MLX90640ESF-BAВ - інфрачервоний масивний датчик з низькою роздільною здатністю, здатний виявляти теплове випромінювання в широкому полі зору (FOV). Пристрій дозволяє безконтактно вимірювати температуру з надзвичайною точністю, що робить його незамінним у сценаріях, які потребують теплового спостереження.

MLX90640 вимірює температуру за допомогою піксельних точок даних, надаючи необроблену інформацію, яка часто є зашумленою або розрідженою через фізичні обмеження пристрою.

Математичні інструменти та формули, такі як алгоритми інтерполяції та перетворення Фур'є, долають розрив між необробленими даними та практичними висновками. Наприклад: точна інтерполяція може перетворити 32×24 у набір даних з вищою роздільною здатністю без шкоди для точності вимірювань.

Обчислення частоти Найквіста гарантує, що просторові та часові частоти дискретизації даних є оптимальними, запобігаючи втраті інформації під час високошвидкісних застосувань.

2.2 Інтерполяція теплових даних

Інтерполяція теплових даних - це важливий процес для підвищення просторової роздільної здатності датчика MLX90640ESF-BAВ. При скромній кількості 32×24 пікселів, власної роздільної здатності недостатньо для детального теплового зображення в багатьох додатках. Методи інтерполяції, такі як лінійна та білінійна інтерполяція, дозволяють оцінити значення температури між вимірними точками, що призводить до отримання більш плавних теплових зображень з високою роздільною здатністю. Основна формула інтерполяції, що використовується для 1D-даних, має такий вигляд:

$$U_{int} = U1 \cdot \Delta x + U2 \cdot \frac{step - \Delta x}{step}$$

Змінні:

U_1 - значення температури в першій точці.

U_2 - значення температури у другій точці.

Δx - відносна відстань від першої точки.

Step - загальна відстань між точками U_1 і U_2 .

Ця формула обчислює інтерпольовану температуру U_{int} на основі зваженого внеску двох найближчих точок сітки.

Нехай ми вимірюємо температури у двох точках теплової мережі:

$U_1 = 30^\circ\text{C}$

$U_2 = 40^\circ\text{C}$,

$\Delta x = 1.5$ одиниці,

Step = 4 одиниці.

Використовуємо формулу інтерполяції:

$$U_{int} = 30 \cdot 1.5 + 40 \cdot (4 - 1.5) / 4.$$

$$U_{int} = 70^\circ\text{C}.$$

Результат: Інтерпольована температура в заданому місці становить 70°C .

Розширення до 2D білінійної інтерполяції

Для 2D-сіток (як у датчика MLX90640) використовується білінійна інтерполяція. Формула має вигляд:

$$I(x, y) = (1 - a)(1 - b)I_{11} + a(1 - b)I_{21} + (1 - a)bI_{12} + abI_{22},$$

де

$I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$ - інтенсивності (значення температури) в чотирьох найближчих точках сітки.

a та b - відносні відстані між цільовою точкою та цими точками сітки.

1. Лінійна інтерполяція: простий графік, що показує лінійне зростання температури між двома точками (Рис. 8).

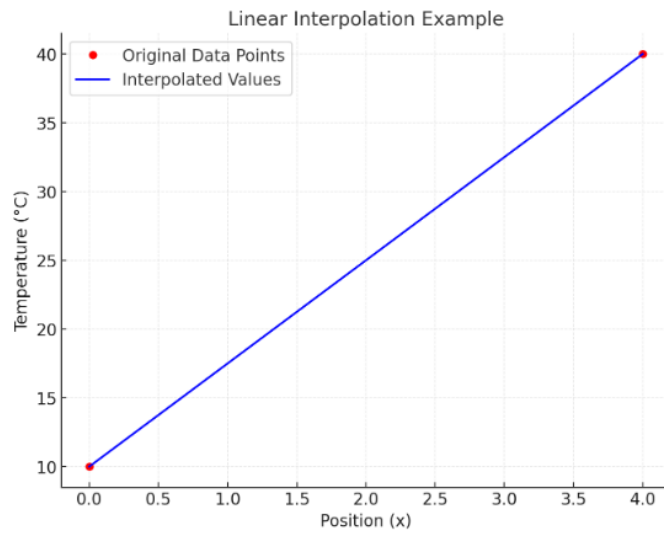


Рис. 8 - Лінійна інтерполяція

2. Білінійна інтерполяція: 2D сітка з плавними температурними переходами візуалізується як градієнтна теплової карти, де обчислюються проміжні значення (Рис. 9).

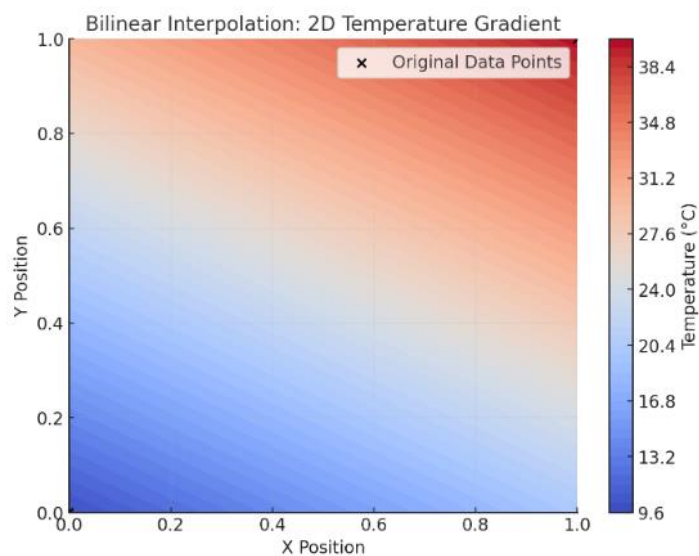


Рис. 9 - Білінійна інтерполяція

Для датчика MLX90640 інтерполяція має важливе значення при перетворенні сітки 32×24 в більш високу роздільну здатність, наприклад, 128×96.

Покращена просторова роздільна здатність гарантує, що температурні градієнти і гарячі точки краще розпізнаються для виявлення теплових джерел.

2.3 Оптичні міркування: числова апертура

Числова апертура (ЧА) оптичної системи відіграє велику роль у визначенні якості тепловізійних зображень, отриманих такими датчиками, як MLX90640ESF-BAВ. Апертура впливає на здатність системи збирати теплове випромінювання і фокусувати його на датчику, безпосередньо впливаючи на різкість і роздільну здатність зображення.

Чисельна апертура визначається так:

$$\text{ЧА} = n \cdot \sin(\theta),$$

де

n - показник заломлення середовища (наприклад, повітря, $n=1$).

θ - напівкут конуса світла, що входить в систему.

Для тепловізійних систем зазвичай приймається $n=1$, оскільки повітря і є середовище.

Просторова частота зрізу V_0 , яка вказує на максимальну роздільну частоту, пов'язана з ЧА і довжиною хвилі λ теплового випромінювання:

$$V_0 = \frac{2 \cdot \text{ЧА}}{\lambda}.$$

Для датчика MLX90640ESF-BAВ, який виявляє інфрачервоне випромінювання в діапазоні 8-14 мкм, ця формула визначає найвищу просторову частоту (деталізацію), яку він може розпізнати. Числова апертура також визначає дифракційну роздільну здатність Δz :

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{ЧА}^2}.$$

Ця межа роздільної здатності визначається хвильовою природою теплового випромінювання і розміром апертури.

Приклади розрахунків

1. Числова апертура: нехай:

$n=1$ (повітря),

$\theta=30^\circ$.

Тоді

$$\text{ЧА} = n \cdot \sin(\theta) = 1 \cdot \sin(30^\circ) = 0.5.$$

2. Частота зрізу: для $\lambda=10$ мкм:

$$V_0 = \frac{2 \cdot \text{ЧА}}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0.5}{10} = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$$

Діаграма числової апертури: конус світла, що входить в апертуру датчика, показує залежність між θ і ЧА.

Роздільна здатність проти довжини хвилі: графік, що ілюструє, як роздільна здатність покращується зі зменшенням довжини хвилі та збільшенням ЧА.

Вищий показник ЧА призводить до кращої здатності збирати світло і більш дрібних деталей на ІЧ-зображеннях.

У таких системах, як MLX90640, використання зовнішньої оптики з високим значенням ЧА може розширити можливості датчика, особливо для виявлення невеликих температурних відмінностей.

2.4 Дискретизація Найквіста і просторова роздільна здатність

Тепловізійні датчики, такі як MLX90640ESF-BAВ, збирають дані в точках піксельної сітки. Для забезпечення точної реконструкції теплової сцени без аліасингу застосовується концепція дискретизації Найквіста. Частота Найквіста визначає максимальну просторову або часову частоту, яка може бути надійно дискретизована дискретною системою.

Формула для частоти Найквіста має вигляд:

$$vN = \frac{1}{2 \cdot \Delta x_{min}}.$$

Змінні:

vN - частота Найквіста (циклів на одиницю відстані або часу).

Δx_{min} - мінімальна відстань між точками відліку (наприклад, відстань між пікселями на сітці датчика).

Просторова роздільна здатність MLX90640

Датчик MLX90640ESF-BAВ має роздільну здатність 32×24 пікселів і поле зору (FOV) $55^\circ \times 35^\circ$. Кутова роздільна здатність на піксель становить:

$$\Delta x_{min} = \frac{FOV}{Number\ of\ Pixels}.$$

Для роздільної здатності по горизонталі:

$$\Delta x_{min, horizontal} = \frac{55^\circ}{32} \approx 1.72^\circ.$$

Для роздільної здатності по вертикалі:

$$\Delta x_{min, vertical} = \frac{35^\circ}{24} \approx 1.46^\circ.$$

За допомогою формули Найквіста:

1. Для горизонтальної роздільної здатності:

$$vN, \text{ horizontal} = \frac{1}{2 \cdot 1.72^\circ} \approx 0.29 \text{ cycles/degree.}$$

2. Для вертикальної роздільної здатності:

$$vN, \text{ vertical} = \frac{1}{2 \cdot 1.46^\circ} \approx 0.34 \text{ cycles/degree.}$$

Це показує максимальну частоту (зміну температури), яку MLX90640 може точно розпізнати в горизонтальному та вертикальному напрямках.

Якщо теплова сцена містить температурні коливання на частотах, вищих за частоту Найквіста, виникає аліасинг. Це призводить до того, що високочастотні деталі з'являються на тепловому зображенні як помилкові, що погіршує точність зображення.

Ілюстрація, на якій показано недостатню та правильну вибірку, щоб продемонструвати, як проявляється аліасинг (Рис. 10):

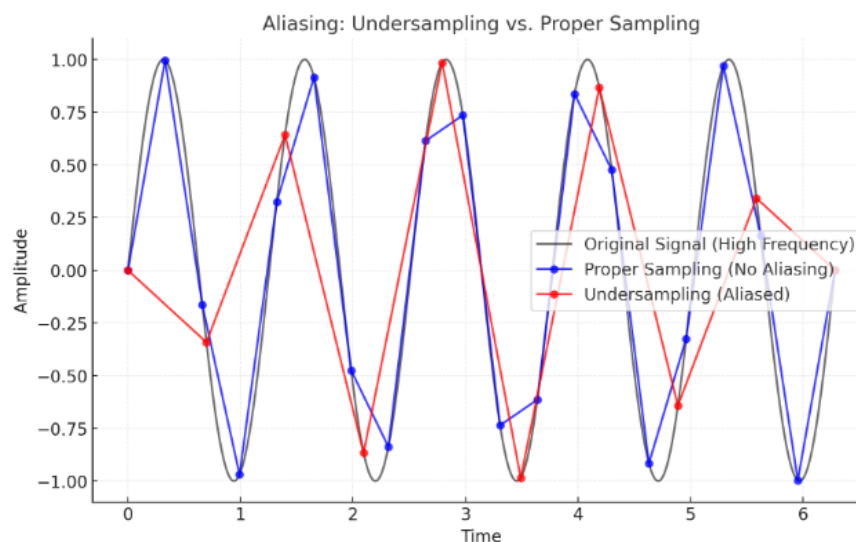


Рис. 10 - Недостатнє уцільнення проти правильне уцільнення

Чорна крива представляє вихідний високочастотний сигнал. Сині точки і крива ілюструють правильну дискретизацію зі швидкістю, яка задовольняє

критерій Найквіста, зберігаючи оригінальну форму сигналу.

Червоні точки і крива показують недостатню дискретизацію, яка не дозволяє захопити справжній сигнал, що призводить до аліасингу (спотвореного, більш низькочастотного сигналу). На графіку можна зобразити недостатню вибірку в порівнянні з правильною вибіркою, показуючи, як аліасинг проявляється, коли частота дискретизації недостатня.

2.5 Обмежена дифракцією роздільна здатність

Продуктивність тепловізійних систем, включаючи MLX90640ESF-BAВ, фундаментально обмежена дифракцією теплового випромінювання. Обмежена дифракцією роздільна здатність визначає найменшу просторову деталь, яку може розрізнити система. На це обмеження впливає довжина хвилі виявленого інфрачервоного випромінювання і ЧА оптичної системи.

Формула для дифракційно-обмеженої роздільної здатності має вигляд:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{ЧА}^2},$$

де

- Δz : мінімальна роздільна просторова деталь (межа роздільної здатності),
- λ : довжина хвилі теплового випромінювання,
- ЧА: числова апертура оптичної системи.

Ця залежність показує, що роздільна здатність покращується при меншій довжині хвилі і більшій числовій апертурі.

Обмеження роздільної здатності виникає через хвильову природу світла: теплове випромінювання розсіюється при проходженні через апертуру та дифракцію. Це розсіювання заважає системі розрізнити два близько розташовані об'єкти, якщо вони знаходяться на відстані меншій за Δz .

Нехай:

- Довжина хвилі $\lambda=10$ мкм,

- Числова апертура $ЧА=0.5$.

Використовуючи формулу:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2 \cdot ЧА^2},$$

Підставимо значення:

$$\Delta z = \frac{10}{2 \cdot 0.5^2} = 20 \mu m.$$

Результат: дифракційно-обмежена роздільна здатність становить 20 мкм, тобто деталі, менші за цю величину, не можуть бути розпізнані системою.

Розмір пікселя порівняно з дифракційною межею: крок пікселя датчика MLX90640 становить 3,75 мм. Якщо роздільна здатність, обмежена дифракцією (Δz), перевищує це значення, система використовується не повністю, оскільки деталі втрачаються через дифракцію.

Практичне значення: для оптимальної продуктивності дифракційна межа повинна бути меншою або дорівнювати кроку пікселя, що гарантує, що датчик фіксує максимально можливі деталі.

Дифракційна картина: графік розподілу інтенсивності, що показує центральний максимум і бічні пелюстки, спричинені дифракцією.

Роздільна здатність проти довжини хвилі: графік, що демонструє, як покращується роздільна здатність (менший Δz) при зменшенні довжини хвилі або збільшенні $ЧА$.

Збільшення числової діафрагми: використання оптичного об'єктива з більшою діафрагмою покращує роздільну здатність, збираючи більше світла.

Зменшення довжини хвилі: Робота в короткій частині інфрачервоного спектра (8 мкм проти 14 мкм) покращує роздільну здатність.

Методи надвисокої роздільної здатності: Алгоритми постобробки можуть

об'єднувати декілька кадрів для оцінки деталей, що виходять за межі фізичної роздільної здатності.

2.6 Обробка сигналів: Синусоїдальні функції та гексагональні сітки

Обробка сигналів дуже важлива у тепловізійній техніці для точного представлення та аналізу просторових даних, отриманих такими датчиками, як MLX90640ESF-BAВ. У цьому розділі досліджується роль синусоїдальних функцій в описі просторового відгуку системи та переваги використання гексагональних сіток для дискретизації.

Синусоїдальна функція є фундаментальною для опису просторової або частотної характеристики систем обробки зображень. Загальна форма має такий вигляд:

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}.$$

Для двовимірних систем реакція часто моделюється як:

$$h(x, y) = \text{sinc}(\psi x) \cdot \text{sinc}(\psi y),$$

де

$h(x, y)$ - просторова функція відгуку,

$\psi x, \psi y$ - кутові просторові частоти у напрямках x та y .

Ця функція описує, як система реагує на зміни температури в полі зору (FOV).

Чому гексагональна сітка? Шестикутні сітки є більш ефективними, ніж прямокутні, для вибірки просторових даних, тому що вони мінімізують аліасинг. Вони забезпечують більш щільне пакування, що призводить до кращого представлення просторових деталей.

Параметри шестикутної сітки: Просторова частота дискретизації

гексагональної сітки пропорційна кроку решітки d . Кутова частота відсікання f_{max} задається формулою:

$$f_{max} = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot d}.$$

Припустимо, що гексагональна решітка має крок решітки $d=2$ мм. Максимальна кутова частота дорівнює:

$$f_{max} = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot 2} \approx 0.577 \text{ mm}^{-1}.$$

Це означає, що сітка може точно дискретизувати просторові частоти до 0.577 mm^{-1} .

Прямокутна решітка проводить вибірку з меншою ефективністю (менш щільна упаковка).

Гексагональні сітки можуть досягти до 13,4% вищої ефективності дискретизації, зменшуючи ефект аліасингу при тій же щільності пікселів.

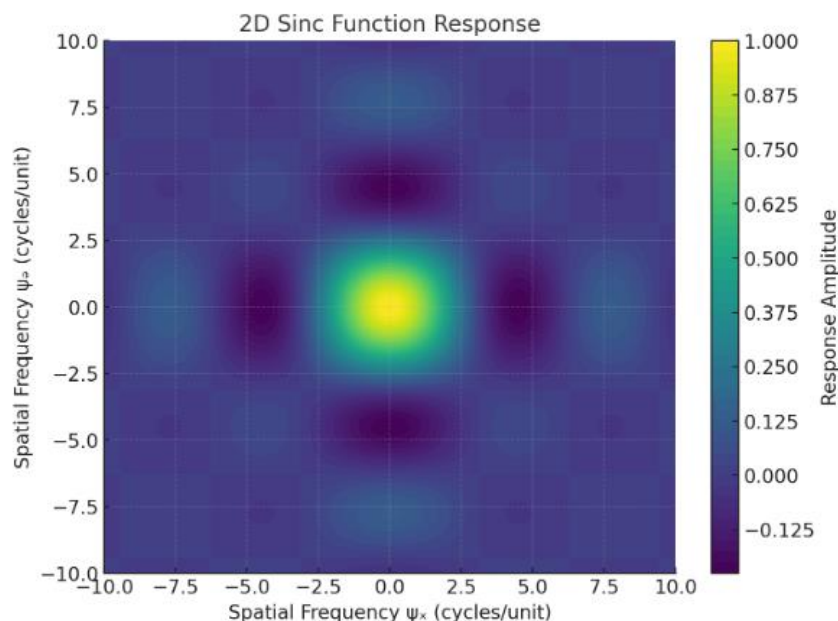


Рис. 11 - Відгук 2-ї синусоїдальної функції

2D-графік, що показує центральний пік і затухаючі коливання $\text{sinc}(\psi_x) \cdot \text{sinc}(\psi_y)$.

Діаграми, що порівнюють розташування сіток та їх шаблони дискретизації. Представлення в частотній області, що показує зменшення аліасингу в гексагональних сітках.

Покращення якості даних: хоча MLX90640 використовує прямокутну сітку, методи інтерполяції на основі гексагональних сіток можуть покращити якість просторових даних.

Зменшення згладжування: обробка сигналів з використанням sinc-функцій гарантує, що теплові дані будуть правильно реконструйовані, зменшуючи помилки.

Висновок до розділу 2

На основі цього розділу, дослідження заглиблюється у формування сигналів у тепловій системі пеленгування. Цей аналіз підкреслює, як сигнали обробляються для забезпечення точної інтерпретації теплових даних. Основні висновки включають використання передових методів, таких як синусоїдальні функції для моделювання просторового відгуку, підкреслюючи їхню роль в ефективному захопленні варіацій теплових полів.

У розділі також досліджується вибірка з гексагональною сіткою як альтернатива прямокутній сітці. Гексагональні сітки забезпечують більш щільну упаковку і мінімізують аліасинг, покращуючи представлення просторових деталей. Це нововведення підвищує точність тепловізійних систем, пропонуючи більш якісну реконструкцію даних.

Підсумовуючи, у цьому розділі описано найважливіші аспекти формування та обробки сигналу, які забезпечують надійне і точне теплове виявлення, прокладаючи шлях до підвищення продуктивності системи і розширення можливостей її застосування.

Розділ 3. Апаратне забезпечення комп'ютерно-інтегрованого портативного тепlopеленгатора

Для створення прототипу тепlopеленгатора було обрано три основні компоненти: мікроконтролер STM32F401 та ESP32, дисплей ST7789 та теплової сенсор MLX90640. Розглянемо кожен з них детальніше та обґрунтуємо їх вибір.

3.1 Мікроконтролер STM32F401 та ESP32

Мікроконтролер ESP32 (Рис. 13) та STM32F401 (Рис. 12) стали серцем нашого пристрою. Почнемо з STM32F401. Він працює на частоті до 100 МГц, що робить його досить швидким для обробки даних з теплового сенсора. Важливою особливістю цього мікроконтролера є наявність спеціального блоку для роботи з числами з плаваючою комою, що значно спрощує математичні розрахунки при обробці теплового зображення. Пам'яті у STM32F401 достатньо для всіх потреб проекту - 512 КБ для програми та 128 КБ оперативної пам'яті для обчислень. Мікроконтролер також дуже економно витрачає енергію - всього 100 мікроампер на кожен мегагерц частоти. Якщо порівнювати його з більш простим мікроконтролером ATmega328P, який часто використовується в Arduino, то STM32F401 працює набагато швидше та має більше можливостей для підключення різних пристроїв, залишаючись при цьому доступним за ціною.

Таблиця 1 - Характеристики мікроконтролера STM32F401

Тактова частота	100 МГц
Флеш-пам'ять	512 КБ
Оперативна пам'ять	128 КБ

Енергоспоживання	100 мкА/МГц
------------------	-------------

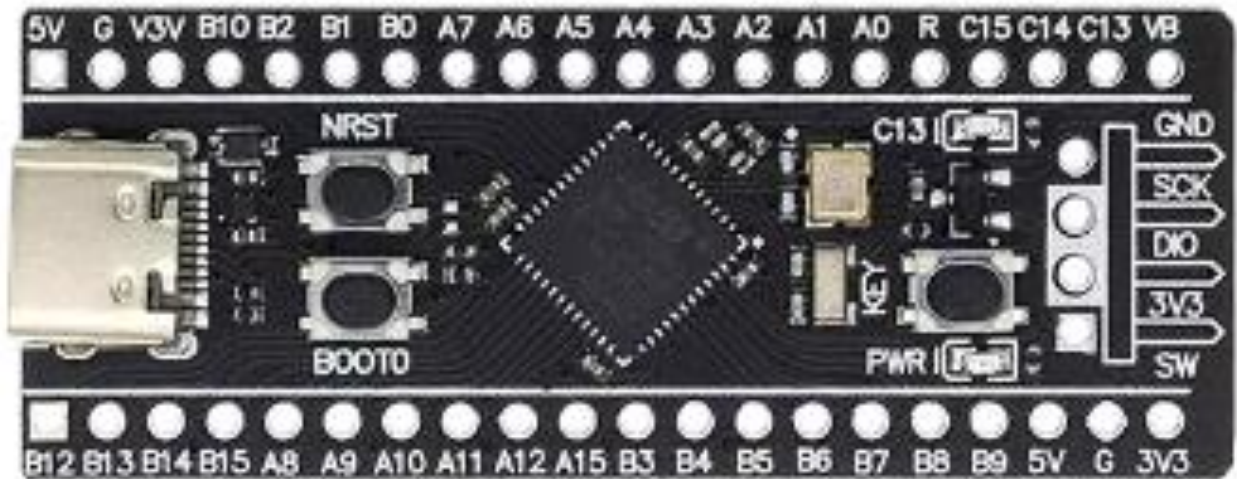


Рис. 12 - Мікроконтролер STM32F401

Плата розробника ESP-WROOM-32 (Wi-Fi+Bluetooth) побудована на новому мініатюрному високопродуктивному модулі ESP-WROOM-32 від популярного бренду, призначеного для широкого спектра застосувань, починаючи від мікро потужних мережевих датчиків до складних програм, наприклад, таких як кодування голосу, потокове передання музики та MP3 кодування. На модулі зібрана вся необхідна мінімальна периферія, достатня для швидкого та комфортного старту роботи з ESP-WROOM-32. Модуль розробника виконаний на базі популярного двоядерного чипсета ESP32, зі змінною тактовою частотою від 80 МГц до 240 МГц, можливістю індивідуального керування та живлення. Модуль розроблено для переносної та автономної електроніки і додатків інтернету речей. Мікромодуль має багату периферію, що містить різноманітні інтерфейси, роз'єм для SD карти, інфрачервоний порт, інтерфейс для підключення ємнісної сенсорної панелі. Однією з переваг модуля є наднизьке споживання електроенергії та гнучкий вибір «сплячих» режимів, що дають змогу отримати цифри до 20 мкА в режимі deep sleep mode. Модуль підтримує три режими роботи - AP + STA, AP і STA.

Таблиця 2 - Характеристики мікроконтролера ESP-WROOM-32

Тактова частота	240 МГц
Флеш-пам'ять	4 МБ
Оперативна пам'ять	520 КБ
Енергоспоживання	160–240 мА

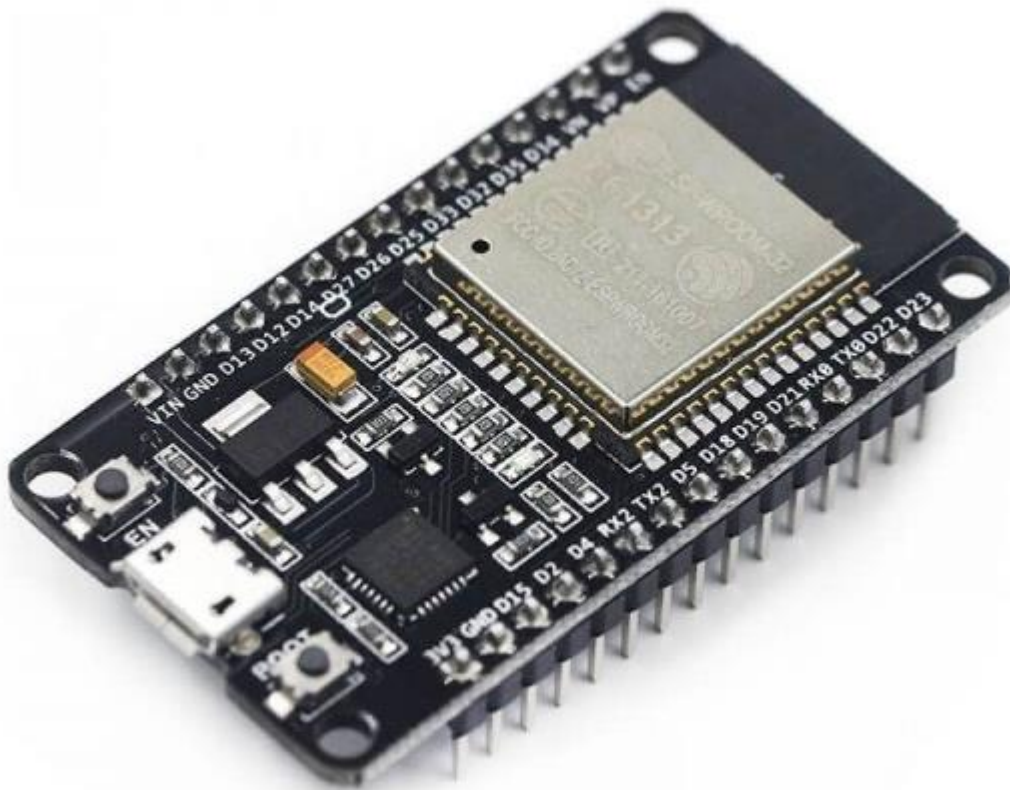


Рис. 13 - Мікроконтролер ESP-WROOM-32

3.2 Дисплей ST7789

Для відображення теплової картинки я обрав дисплей ST7789 (Рис. 14). Цей дисплей може показувати зображення розміром 240 на 320 точок, що цілком достатньо для відображення теплової карти. Він підтримує 65 тисяч різних кольорів, що дозволяє створити якісну візуалізацію розподілу температури. Дисплей має вбудований контролер, який самостійно виконує багато графічних операцій, розвантажуючи цим основний мікроконтролер. Він споживає дуже мало енергії - всього 380 мікроампер під час роботи. Зображення на ньому добре видно під кутом до 160 градусів. Цей дисплей забезпечує досить хорошу якість картинки та працює швидко, витрачаючи при цьому не велику кількість енергії.

Таблиця 3 - Характеристики дисплею ST7789

Роздільна здатність	240×320 пікселів
Глибина кольору	65К кольорів
Кут огляду	160°
Енергоспоживання	380 мкА



Рис. 14 - Дисплей ST7789

3.3 Тепловий сенсор MLX90640

Найважливішою частиною теплопеленгатора є тепловий сенсор MLX90640 (Рис. 15). Він створює теплове зображення розміром 32 на 24 точки, тобто одночасно вимірює температуру в 768 точках. Сенсор може вимірювати температуру від мінус 40 до плюс 300 градусів Цельсія з точністю до двох градусів. Оновлення даних відбувається до 64 разів на секунду, що дозволяє спостерігати за рухомими об'єктами. Сенсор охоплює досить широку область - 110 градусів по горизонталі та 75 градусів по вертикалі. Він має вбудовані системи для компенсації похибок та само калібрування, що робить вимірювання більш точними. Порівняно з простішим сенсором MLX90614, який вимірює температуру лише в одній точці, наш сенсор дає повноцінну теплову картинку. Існують і більш досконалі сенсори, наприклад FLIR Lepton, але вони коштують значно дорожче, тому для прототипу MLX90640 є найкращим вибором за співвідношенням ціни та можливостей.

Таблиця 4 - Характеристики теплового сенсора MLX90640

Роздільна здатність матриці	32×24 пікселі
Діапазон вимірювання	-40°C до +300°C
Точність	±2°C
Частота оновлення	до 64 Гц
Кут огляду	55° × 35°



Рис. 15 - Тепловий сенсор MLX90640

Всі ці компоненти добре працюють разом, забезпечуючи необхідну функціональність при розумних витратах на компоненти та низькому енергоспоживанні. Це робить їх ідеальним вибором для створення прототипу теплопеленгатора.

MLX90640ESF-BAВ збирає теплові дані в сітці 32×24 пікселів. Значення кожного пікселя зазвичай зберігається як 16-бітне ціле число, що представляє дані про температуру. Загальний розмір даних на кадр становить:

розмір даних (біт) = роздільна здатність \cdot розрядність.

розмір даних (біт) = $32 \cdot 24 \cdot 16 = 12,288$ біт.

розмір даних (кілобайт) = $12,288 \cdot 1,024 = 1,5$ кБ на кадр. Розмір даних (кілобайт) = $8 \cdot 1,024 \cdot 12,288 = 1,5$ кБ на кадр.

Для додатків, що працюють зі швидкістю 200 кадрів в секунду (fps) (максимальна частота кадрів):

швидкість передачі даних = $1,5$ кБ/кадр \cdot 200 fps = 300 кБ/с.

3.4 Корпус

Для розробки корпусу тепlopеленгатора використовувався онлайн-ресурс Tinkercad (Рис. 16), який дозволяє швидко створювати тривимірні моделі завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу. Основні параметри корпусу визначалися виходячи з габаритів компонентів пристрою, таких як ESP32, дисплей ST7789 і модуль теплової камери MLX90640.

Після аналізу розташування компонентів і їх з'єднань було створено корпус (Рис. 18) з такими розмірами:

- **Довжина:** 17 см.
- **Ширина:** 7 см.
- **Висота:** 8 см.

Додатково були передбачені:

- Отвори для кнопок керування та портів (USB, живлення).
- Монтажні отвори для кріплення електронних компонентів.
- Прорізи для екрану та сенсору.

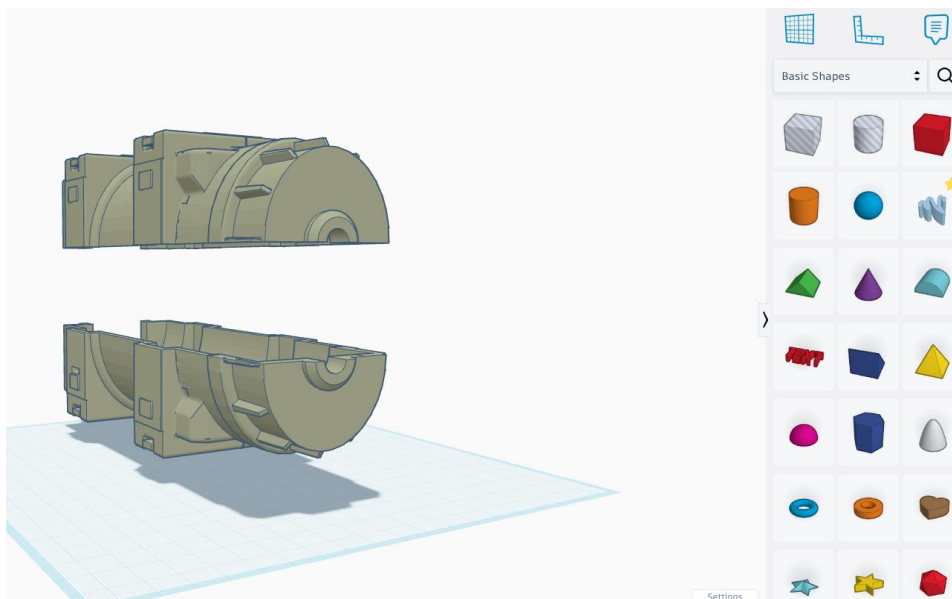


Рис. 16 – Інтерфейс онлайн-ресурсу Tinkercad

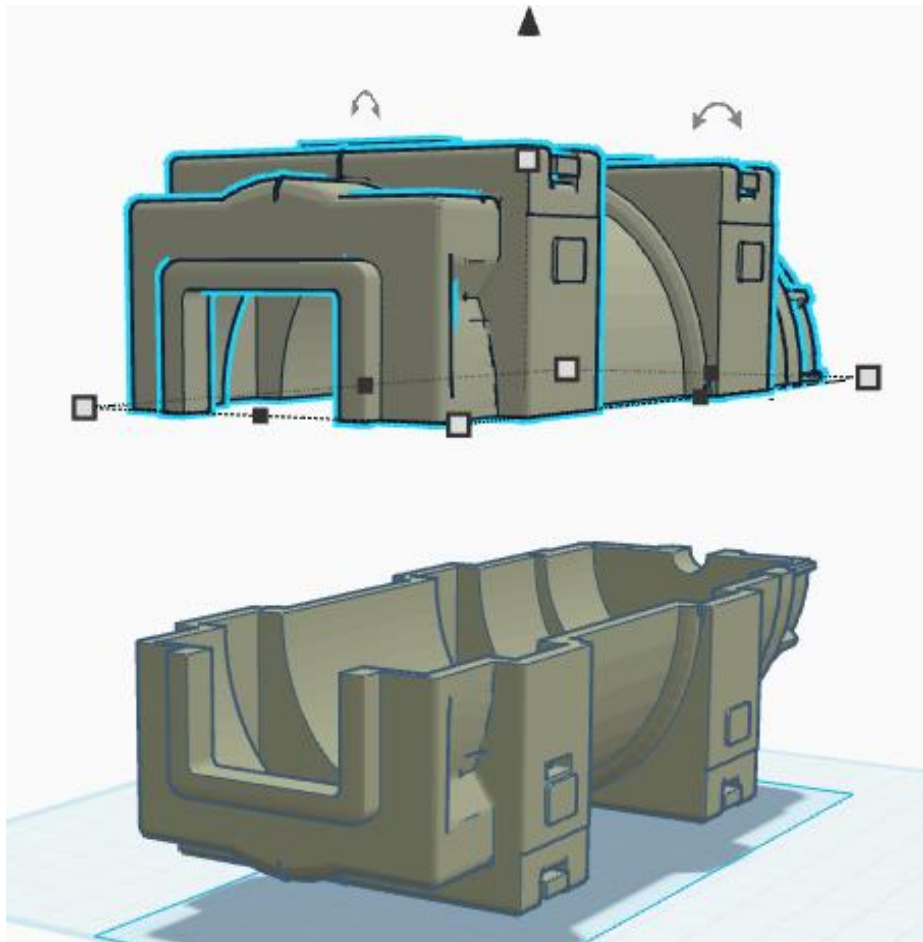


Рис. 17 – 3Д модель корпусу

Отримана модель була експортована у форматі STL, який є стандартом для більшості 3D-принтерів. Для друку використовувався 3D-принтер з діаметром сопла 1 мм, що дозволило прискорити процес друку, хоча й з дещо зниженою деталізацією поверхні.

Матеріалом для друку був обраний PLA-пластик завдяки його міцності та простоті обробки. Друк проводився при стандартних налаштуваннях:

- Температура екструзії: 200–210°C.
- Температура платформи: 60°C.
- Швидкість друку: 40–60 мм/с.

Час друку корпусу становив приблизно 7 з половиною годин залежно від використовуваних налаштувань.

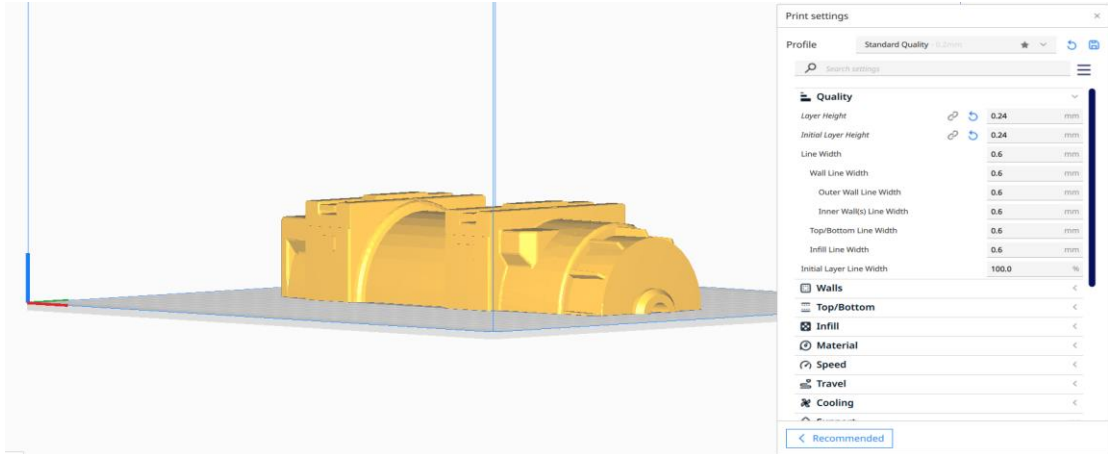


Рис. 18 - Середовище UltiMaker Cura

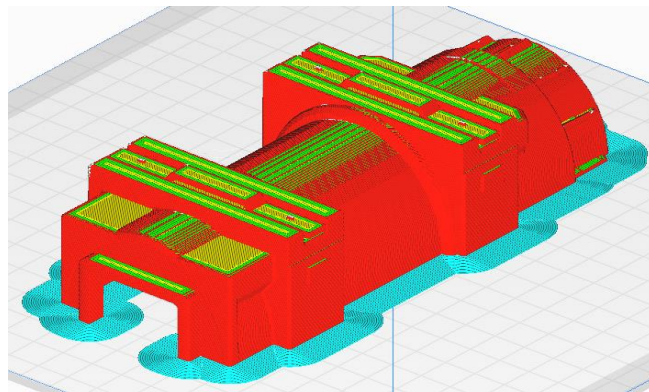


Рис. 19 - Середовище UltiMaker Cura

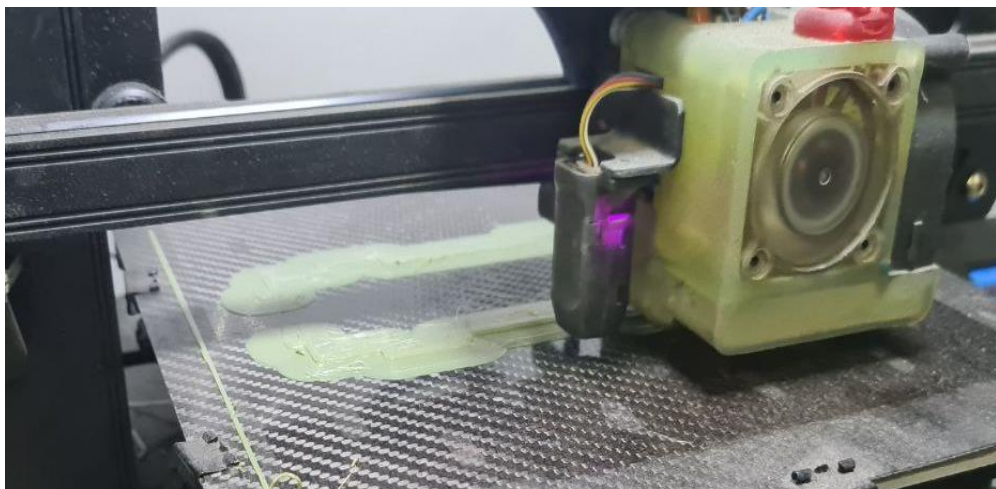


Рис. 20 – Друк корпусу на 3Д принтері (частина 1)

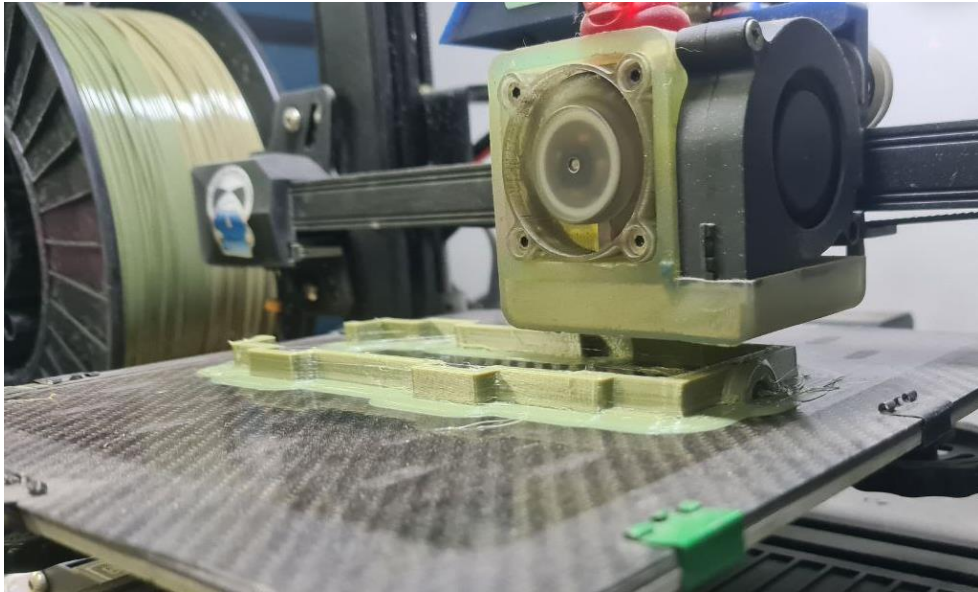


Рис. 21 - Друк корпусу на 3Д принтері (частина 2)

Постобробка корпусу

Після друку корпус піддавався мінімальній постобробці:

1. Зачистка країв і видалення залишків підтримок.
2. При необхідності отвори під кнопки та роз'єми були додатково розширені для точного монтажу компонентів.

В результаті отриманий корпус відповідав всім вимогам щодо міцності та зручності монтажу, забезпечуючи компактність і естетичний зовнішній вигляд.

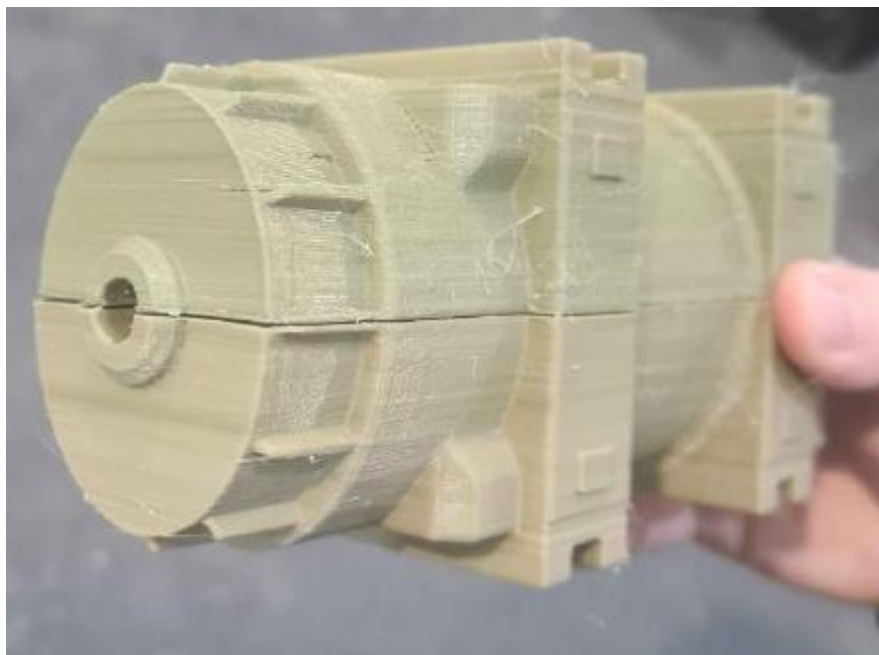


Рис. 22 – Роздрукований корпус (частина 1)



Рис. 23 - Роздрукований корпус (частина 2)

Висновок до розділу 3

У розділі 3 описано вибір та обґрунтування компонентів, використаних у тепловому пеленгаторі. Основними компонентами є мікроконтролери STM32F401 і ESP32, дисплей ST7789 і тепловий датчик MLX90640. Кожен компонент був обраний за його здатність підвищувати продуктивність, ефективність і точність.

Мікроконтролер STM32F401 забезпечує надійну обробку даних з високою енергоефективністю, що робить його придатним для задач, які вимагають швидкої обробки даних. ESP32 має двоядерну архітектуру, зручний інтерфейс та функцію бездротового зв'язку, що забезпечує підключення до ПК або мобільних пристроїв та розширену функціональність. Дисплей ST7789 забезпечує візуально насичений інтерфейс з підтримкою тепловізійних зображень з високою роздільною здатністю. Тепловий датчик MLX90640 забезпечує точне визначення температури в діапазоні 32×24 , підтримуючи різноманітні застосування від діагностики до моніторингу.

Разом ці компоненти створюють надійну основу для розробки ефективної, портативної та масштабованої тепловізійної системи. Вибір відображає баланс продуктивності, доступності та адаптивності, що забезпечує конкурентоспроможність пристрою як на промисловому, так і на споживчому ринках.

Розділ 4. Програмне забезпечення комп'ютерно-інтегрованого портативного теплопеленгатора

4.1 Підключення дисплея

Розглянемо декілька варіантів створення ПЗ, для STM32 та ESP32. Для підключення дисплея до мікроконтролера STM32 спочатку з'єднуємо відповідні виводи (Рис. 24 - 26):

- GND - загальний провід
- VCC - живлення 3.3В
- SCL - тактовий сигнал SPI
- SDA - лінія передачі даних
- RES - сигнал скидання
- DC - вибір типу даних (команди/дані)
- BLK - керування яскравістю підсвітки

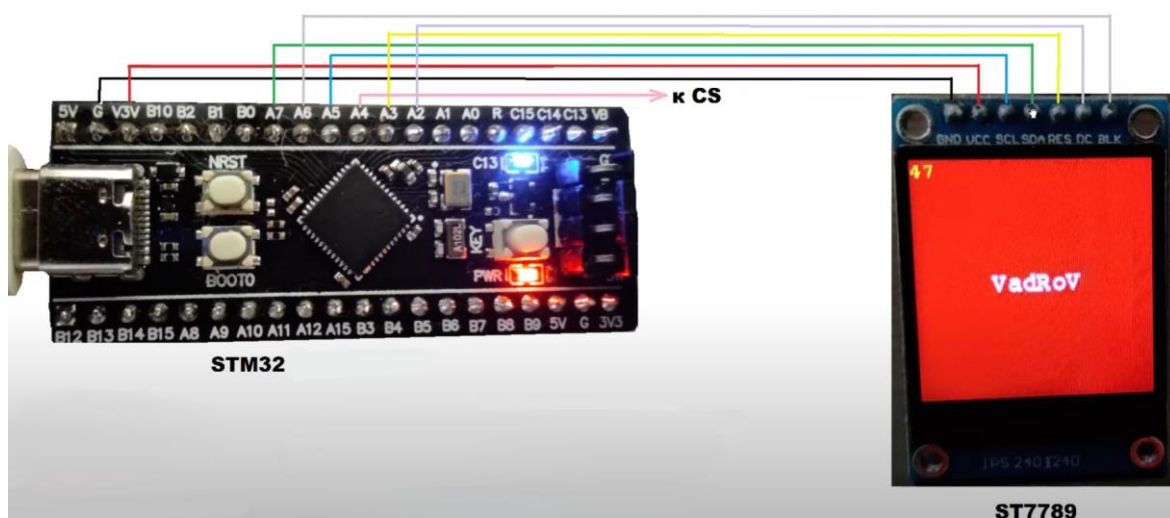


Рис. 24 - Огляд STM32 і опис пінів

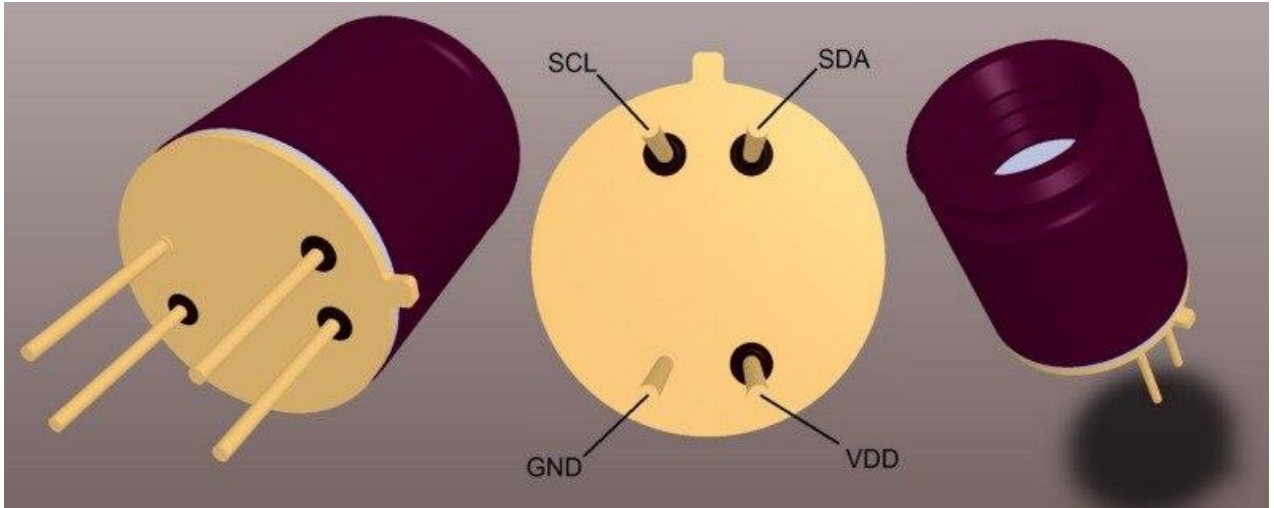


Рис. 25 - Огляд MLX90640 і опис пінів

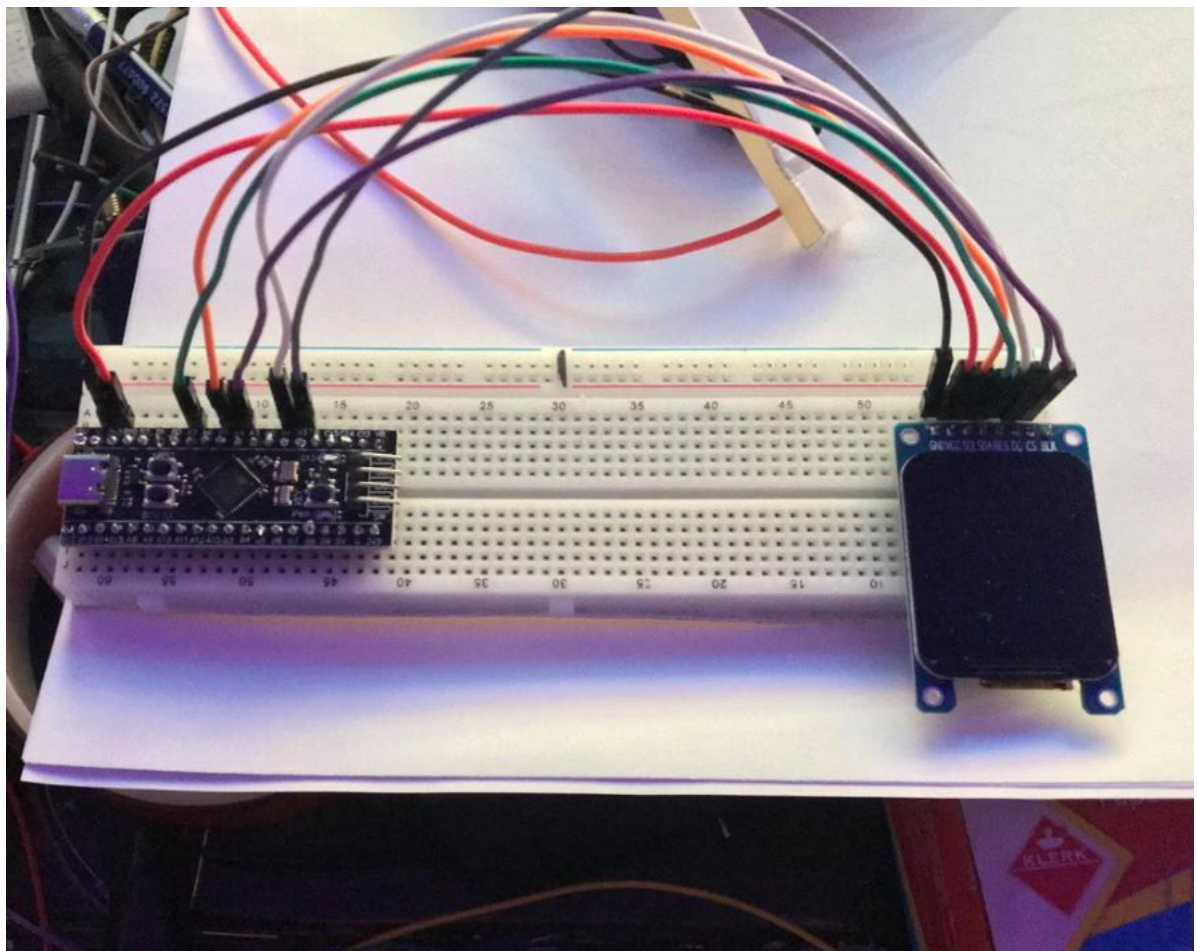


Рис. 26 - Приклад з'єднань виводів

4.2 Конфігурація мікроконтролера

Налаштування виконуємо у середовищі STM32CubeIDE (Рис. 27). Створюємо новий проєкт для мікроконтролера STM32F401CEU6 та підключаємо зовнішній тактовий генератор. У розділі Clock Configuration (Рис. 28) налаштовуємо схему тактування.

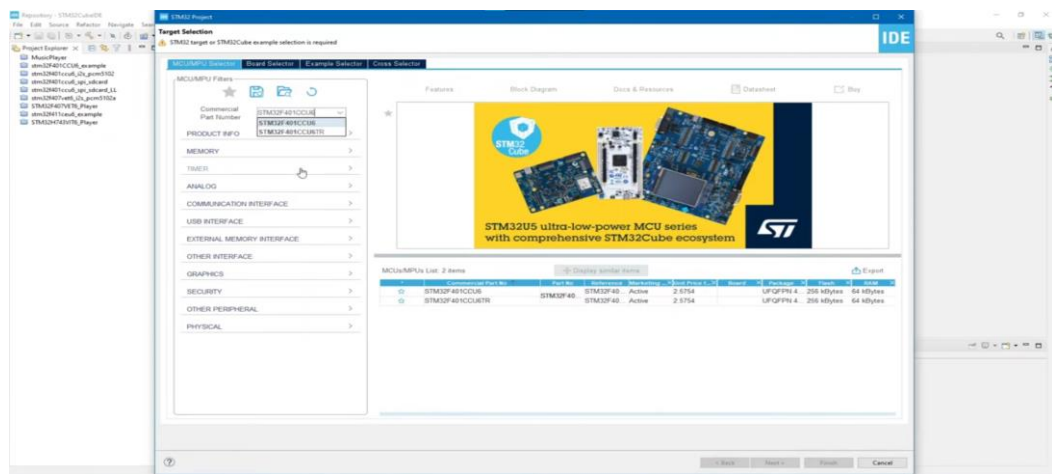


Рис. 27 - Середовище STM32Cube IDE

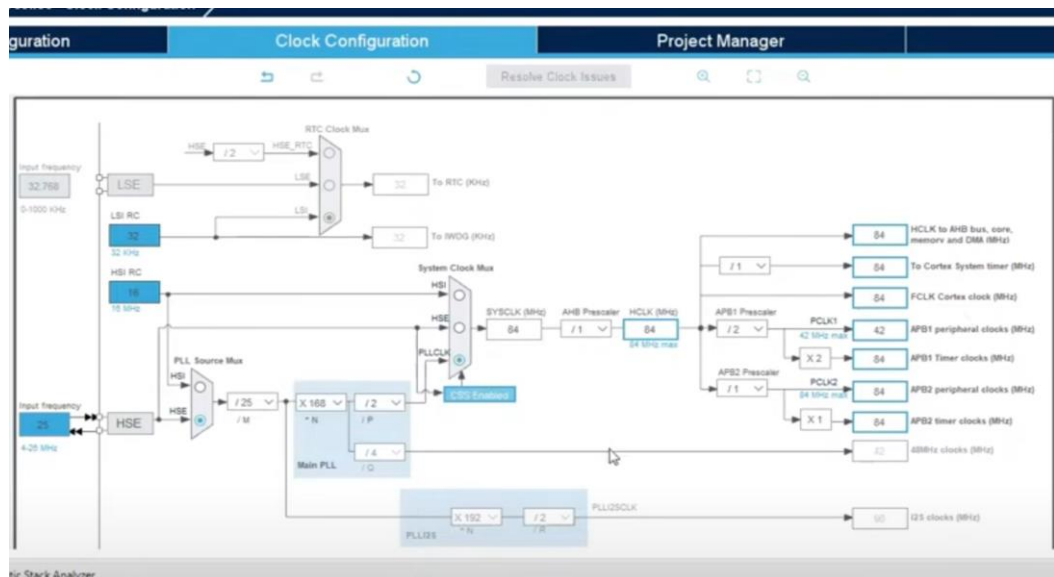


Рис. 28 - Розділ Clock Configuration

Для роботи з дисплеєм активуємо інтерфейс SPI1 в режимі Transmit Only Master. У параметрах встановлюємо: Frame Format - Motorola, Data Size - 16 Bits, Prescaler - 2, Clock Polarity - High. Налаштовуємо DMA для SPI1 у стандартному режимі. Конфігуруємо необхідні виводи: SPI1 на PA5, а також виводи DC, RST та CS як виходи (Рис. 29).

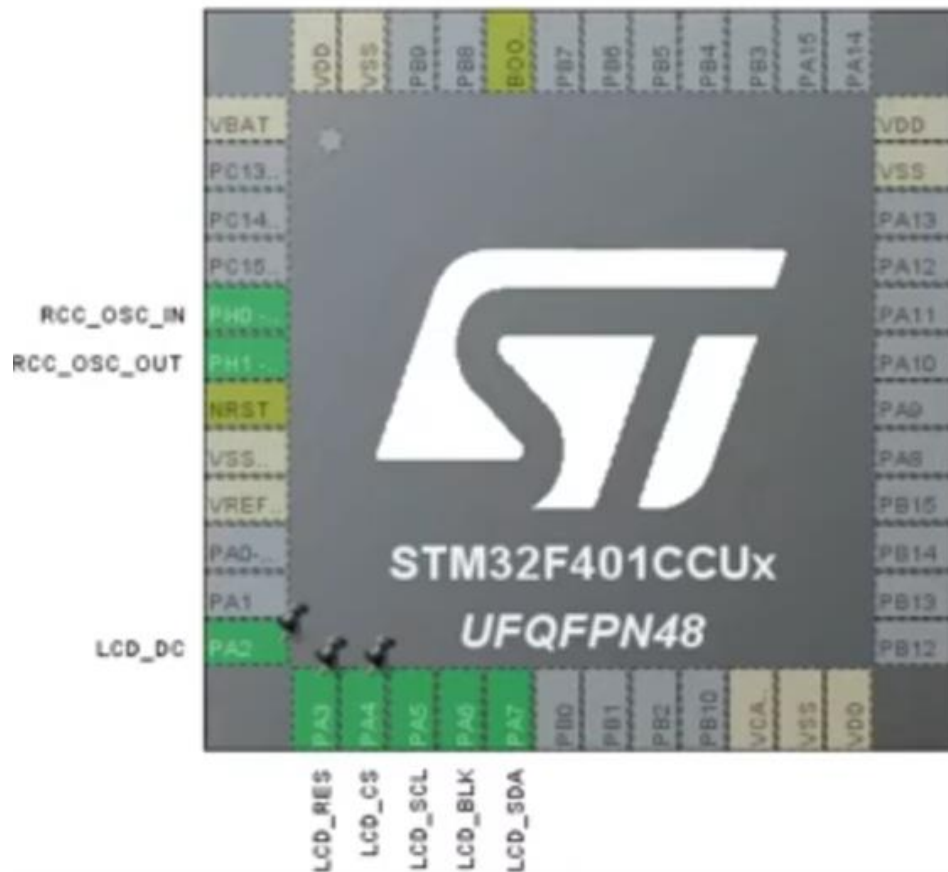


Рис. 29 – Підключення у середовищі Cube IDE

Для налаштування підсвітки встановлюємо Prescaler - 999, Counter Period - 209 та яскравість робимо 50% у розділі Pulse 105 (максимальне значення 210). Ці значення обрані для отримання частоти підсвітки 400 Гц при тактовій частоті APB1/APB2 84 МГц ($84\,000\,000 / 999 / 209 \approx 400$ Гц).

У розділі SYS підключаємо інтерфейс програмування отладки. Ми не будемо використовувати бібліотеку HAL, а будемо використовувати LowLayer (LL) і генеруємо код.

Для роботи з дисплеєм нам потрібна бібліотеки, підключаєм.


```
LCD_DATA_BUS data_bus,
```

```
LCD_BackLight_data bkl_data
```

Копіюємо, заходимо у функцію main.c вставляємо. Визначаємо дані для підключення по SPI, дані DMA і дані підсвічування (Рис. 29). Ми проініціалізували необхідні структури, які будуть потрібні для створення обробника дисплея. Ця структура визначає потік DMA, а також підсвічування широко-імпульсної модуляції або просто підсвічування.

```
LCD_DMA_TypeDef dma_tx = { DMA2, LL_DMA_STREAM_3 };
```

```
LCD_BackLight_data bkl_data = { TIM3, LL_TIM_CHANNEL_CH1, 0, 0, 50 };
```

```
LCD_SPI_Connected_data spi_con = { SPI1,
    dma_tx, LCD_RES_GPIO_Port,
    LCD_RES_Pin, LCD_DC_GPIO_Port,
    LCD_DC_Pin, LCD_CS_GPIO_Port, LCD_CS_Pin    };
```

4.3 Програмна ініціалізація та результат

Наступний шаг. Робимо ініціалізацію. Дивимось на display.h, щоб побачити, яка функція відповідає за ініціалізацію.

```
void LCD_Init(LCD_Handler* lcd);
```

Копіюємо її та вставляємо у main.c. Пишемо функції для дисплею, а саме: функцію роздільної здатності, колір тексту, колір підсвітки і так далі.

```
#ifndef LCD_DYNAMIC_MEM
```

```
    LCD_Handler lcd1;
```

```
#endif
```

```

LCD = LCD_DisplayAdd( LCD,
#ifdef LCD_DYNAMIC_MEM
&lcd1,
#endif
240,
300,
ST7789_CONTROLLER_WIDTH,
ST7789_CONTROLLER_HEIGHT,
0,
0,
PAGE_ORIENTATION_PORTRAIT,
ST7789_Init,
ST7789_SetWindow,
ST7789_SleepIn,
ST7789_SleepOut,
&spi_con,
LCD_DATA_16BIT_BUS,
bkl_data );

LCD_Handler *lcd = LCD;

LCD_Init(lcd);

LCD_Fill(lcd, COLOR_PURPLE);

LCD_WriteString(lcd, 20, 120, "Hello, world!", &Font_15x25, COLOR_BLACK,
COLOR_YELLOW, LCD_SYMBOL_PRINT_FAST);

LL_mDelay(2000);

```

За допомогою цих функцій у мене з'являється можливість: додавати текст, заливати кольором дисплей. Наприклад так (Рис. 30)



Рис. 30 – Демонстрація результату

4.4 Протокол I²C

Протокол I²C (рис. 31.1) є послідовним двопровідним інтерфейсом для підключення електронних компонентів у вбудованих системах. Він став стандартним рішенням для комунікації між різними пристроями (рис. 31).

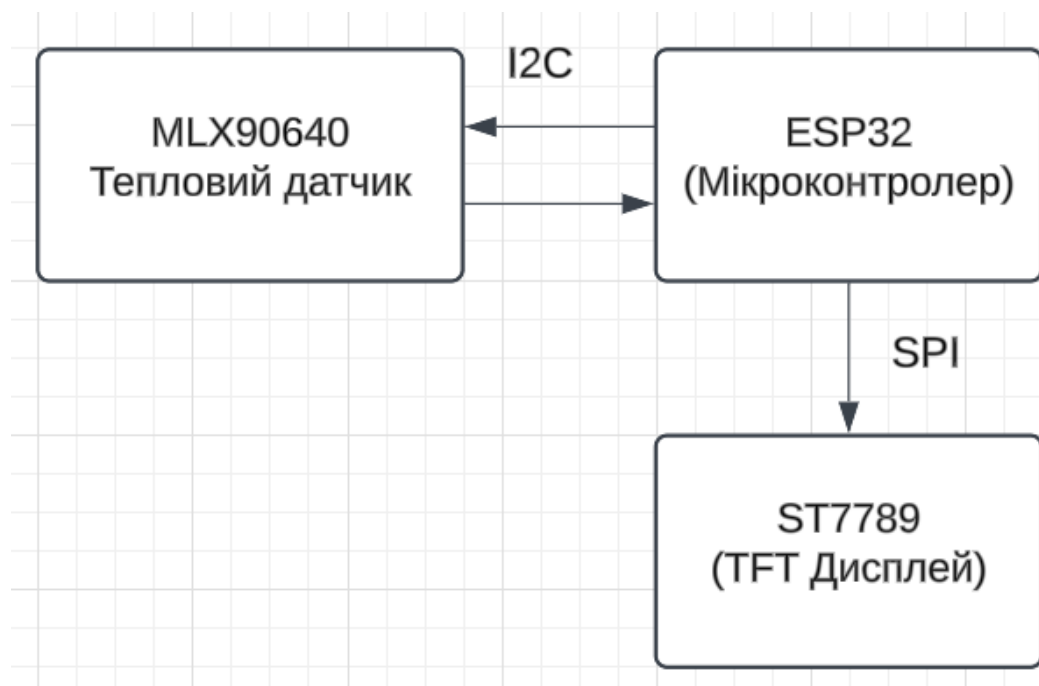


рис. 31 - Структурна схема

Протокол використовує два провідники: SCL для синхросигналу та SDA для послідовних даних. Кожен пристрій має унікальну 7-бітну адресу, яка визначає його місце в системі. Передача даних здійснюється 8-бітними блоками, причому молодший біт адресного байта вказує на операцію читання або запису.

Комунікація відбувається за чітким алгоритмом. Ведучий пристрій ініціює зв'язок генеруванням стартової умови, передає адресу веденого пристрою, здійснює обмін даними та завершує процес сигналом зупинки. Специфікація протоколу підтримує як 7-бітні, так і 10-бітні адреси, забезпечуючи гнучкість при побудові складних систем.

У моєму проєкті, протокол I²C слугуватиме ключовим механізмом комунікації з матрицею MLX90640, дозволяючи ефективно обмінюватися інформацією між компонентами тепlopеленгатора.

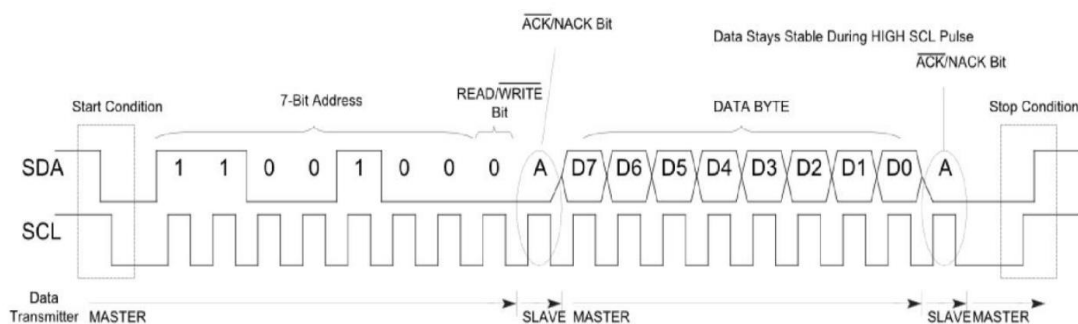


рис. 31 - Протокол I²C

4.5 Розробка ПЗ на ESP32

Далі перейдемо на ESP32. Через те що ми переходимо на ESP32, ми втрачаємо можливість точного налаштування мікроконтролера, але значно полегшуємо розробку ПЗ. Я використовую середовище Arduino IDE (рис. 32).

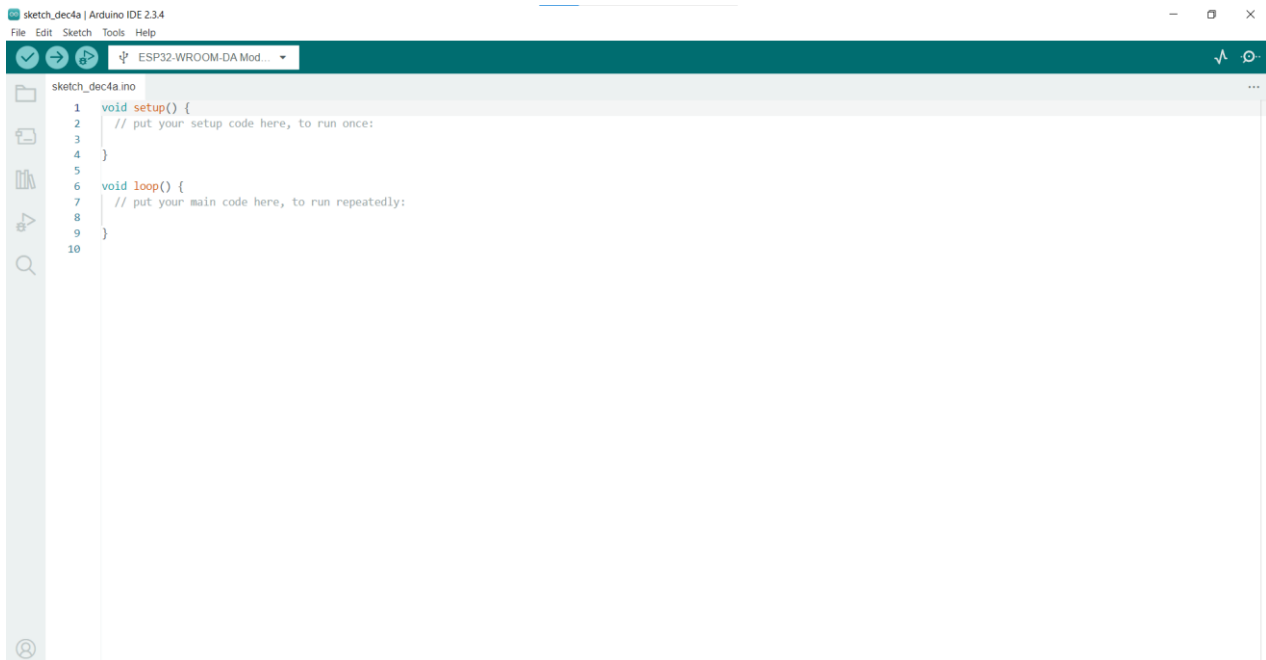


рис. 32 - Середовище Arduino IDE

Наступний крок, це вибрати мікроконтролер ESP32 та підключити бібліотеки. В Arduino IDE це зробити набагато легше ніж в CubeIDE, тому що не треба шукати всі бібліотеки в інтернеті, вони є у самій програмі їх треба тільки завантажити, як на прикладі дисплею st7789 (рис. 33)

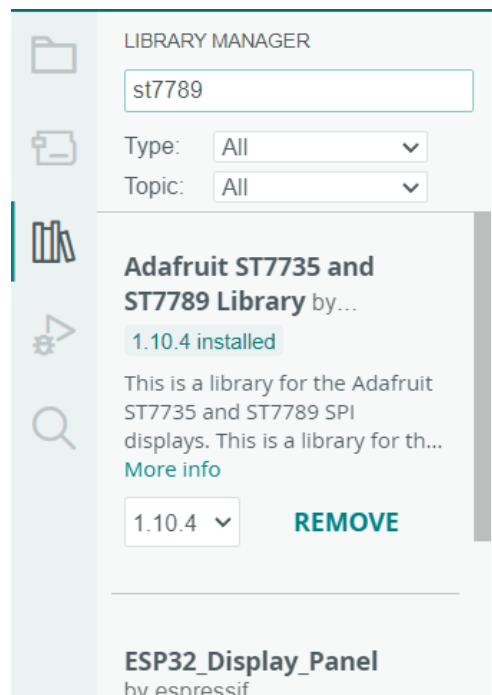


рис. 33 – Менеджер бібліотек

так само підключаємо інші бібліотеки, а саме:

```
#include <Wire.h>
```

```
#include "MLX90640_API.h"
```

```
#include "MLX90640_I2C_Driver.h"
```

```
#include "SPI.h"
```

```
#include "Adafruit_GFX.h"
```

```
#include "Adafruit_ST7789.h"
```

Так само підключаємо ESP32 та обираємо модель(рис. 34 та рис. 35)

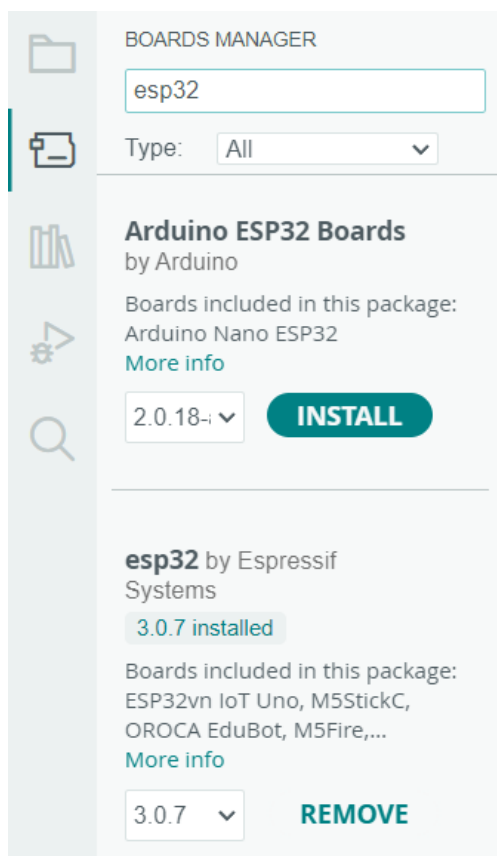


рис. 34 - Менеджер МК

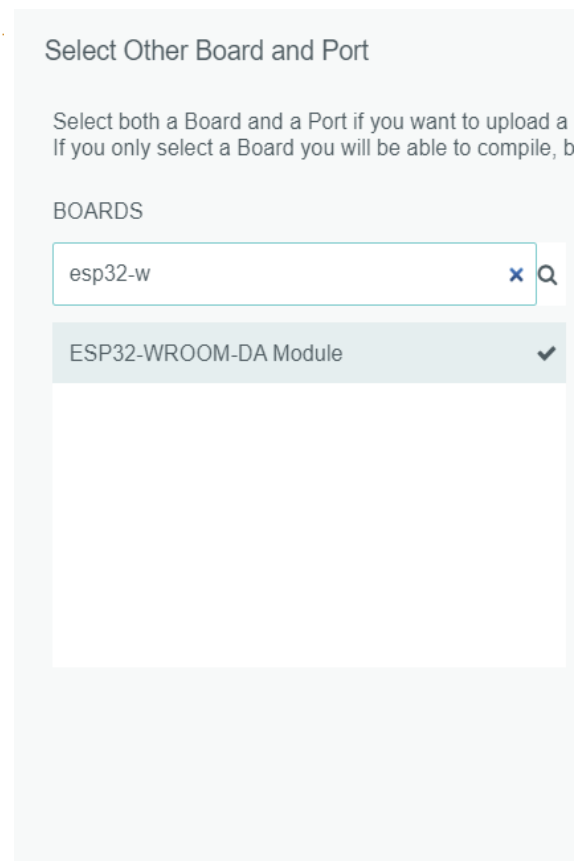


рис. 35 - Менеджер моделі МК

В порівнянні з CubeIDE це набагато зпростує розробку ПЗ. Тому і було вирішено перейти з мікроконтролера STM32 на ESP32.

Підключаємо піни таким чином (рис. 36):

```
#define TFT_CS 17 // Chip Select (CS)
#define TFT_DC 16 // Data/Command Control (DC)
#define TFT_RST 5 // Reset pin (RES)
#define TFT_MOSI 23 // SPI MOSI (Master Out, Slave In)
#define TFT_SCLK 18 // SPI Clock (SCK)
#define TFT_BLK 4 // Backlight (LED)
```

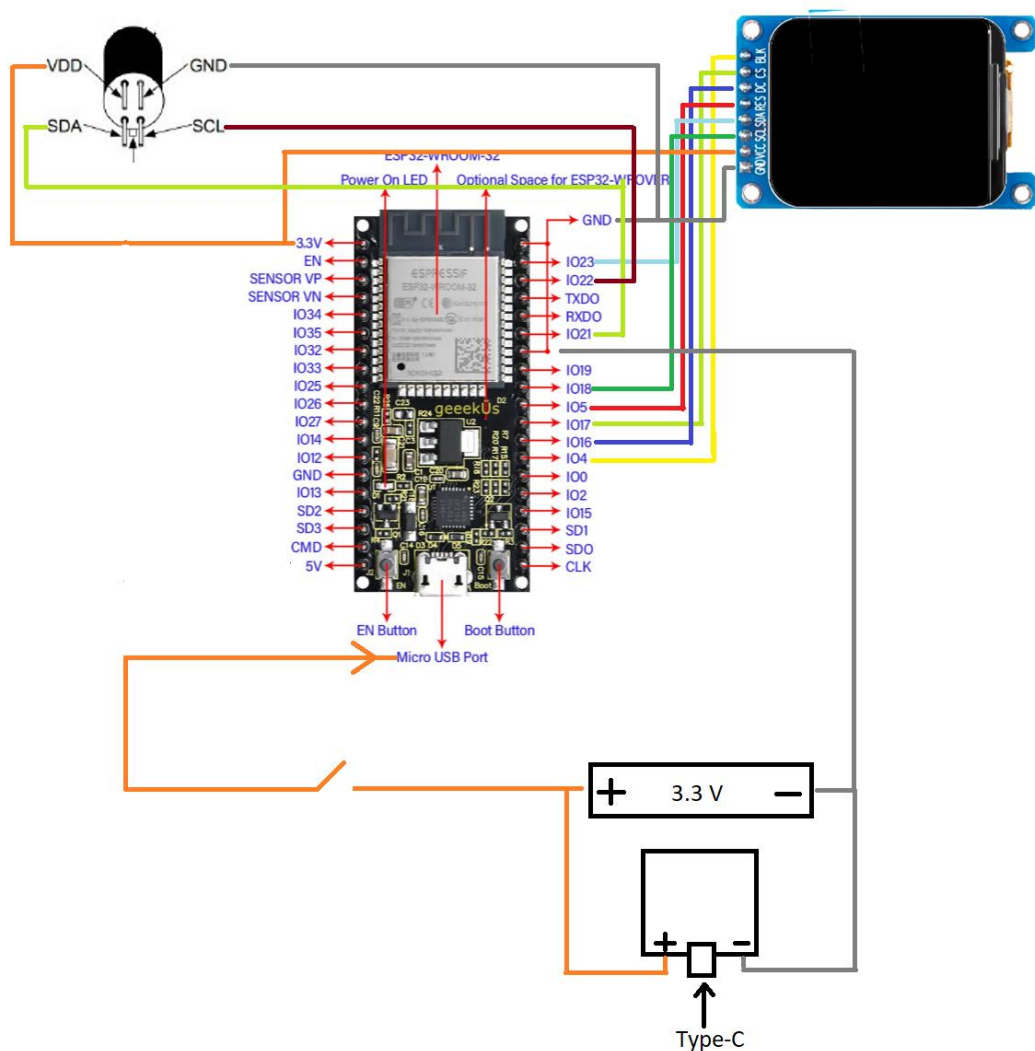


рис. 36 - схема електрична принципова теплопенгатора ОЕС з мікроконтролером

1. Пишем функцію, яка створює екземпляр класу `Adafruit_ST7789` для керування дисплеєм.

```
Adafruit_ST7789 tft = Adafruit_ST7789(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);
```

`MLX90640_address`: I2C-адреса датчика MLX90640.

`mlx90640To[768]`: Зберігає значення теплових пікселів 32x24.

`paramsMLX90640`: Містить дані конфігурації для датчика.

2. `setup()` Крок виконання функції:

Ініціалізує послідовний зв'язок, інтерфейси I2C та SPI (рис. 36.1).

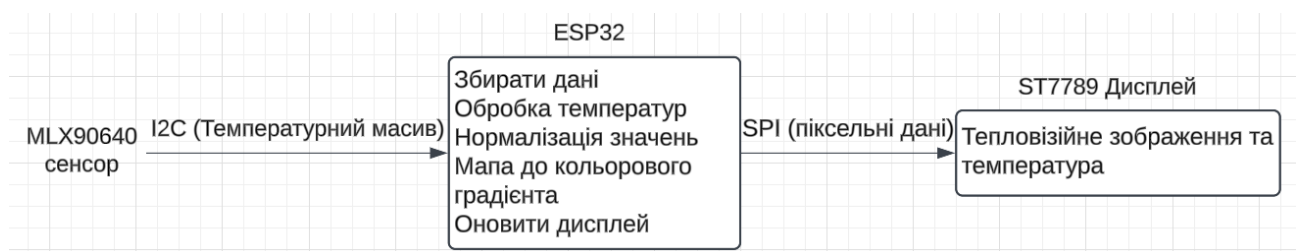


рис. 36.1 – Функціональна схема

Вмикає підсвічування дисплея.

Відображає початкове повідомлення «Теплова камера».

Перевіряє, чи підключено MLX90640 за допомогою `isConnected()`:

```
if (!isConnected()) {
```

```
    Serial.println("MLX90640 not detected at default I2C address.");
```

```
    while (1);
```

```
}
```

3. Дампує і витягує системні параметри з MLX90640:

```
uint16_t eeMLX90640[832];
```

```

if (MLX90640_DumpEE(MLX90640_address, eeMLX90640) != 0) {

    Serial.println("Failed to load system parameters");

}

```

4. Функція loop() Безперервно зчитує теплові дані, обробляє їх та оновлює дисплей.

Розберемо покроково:

Зчитування даних кадру

```

uint16_t mlx90640Frame[834];

if (MLX90640_GetFrameData(MLX90640_address, mlx90640Frame)

```

5. Розрахунок температури

```

float vdd = MLX90640_GetVdd(mlx90640Frame, &mlx90640);

float Ta = MLX90640_GetTa(mlx90640Frame, &mlx90640);

float tr = Ta - TA_SHIFT; // Reflected temperature

float emissivity = 0.95;

MLX90640_CalculateTo(mlx90640Frame, &mlx90640, emissivity, tr,
mlx90640To);

```

MLX90640_CalculateTo() обчислює температуру 768 теплових пікселів.

6. Знаходимо мінімальну, максимальну та центральну температуру пікселів.

```

T_min = mlx90640To[0];

T_max = mlx90640To[0];

for (int i = 1; i < 768; i++) {

    if (mlx90640To[i] < T_min) T_min = mlx90640To[i];

```

```

    if (mlx90640To[i] > T_max) T_max = mlx90640To[i];
}

```

7. Теплове зображення проходить через усі пікселі і зіставляє кожну температуру з кольором за допомогою `getColour()`:

```

mlx90640To[pixelIndex] = 180.0 * (mlx90640To[pixelIndex] - T_min) / (T_max -
T_min);

```

```

getColour(mlx90640To[pixelIndex]);

```

```

tft.fillRect(217 - j * 7, 35 + i * 7, 7, 7, tft.color565(R_colour, G_colour, B_colour));

```

`getColour()` перетворює температури у значення RGB.

`tft.fillRect()` малює кольоровий прямокутник 7×7 для кожного пікселя.

8. `Display Text` Виводить на екран максимальну, мінімальну та центральну температуру:

```

tft.setCursor(10, 220);

```

```

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE, ST77XX_BLACK);

```

```

tft.setTextSize(1);

```

```

tft.print("Max: ");

```

```

tft.print(T_max, 1);

```

```

tft.print(" C Min: ");

```

```

tft.print(T_min, 1);

```

```

tft.print(" C");

```

```

tft.setCursor(10, 240);

```

```

tft.print("Center: ");

```

```
tft.print(T_center, 1);
```

```
tft.print(" C");
```

9. Функція isConnected() Перевіряє, чи MLX90640 відповідає через I2C:

```
boolean isConnected() {
```

```
    Wire.beginTransmission(MLX90640_address);
```

```
    return Wire.endTransmission() == 0;
```

10. Функція getColour() Відображає значення температури (в масштабі від 0 до 180) у кольори RGB для теплового дисплея. Використовує лінійну інтерполяцію для визначення колірних переходів:

```
void getColour(int value) {
```

```
    if (value >= 0 && value < 30) {
```

```
        R_colour = 0;
```

```
        G_colour = 0;
```

```
        B_colour = 20 + (120.0 / 30.0) * value;
```

```
    } else if (value >= 30 && value < 60) {
```

```
        R_colour = (120.0 / 30) * (value - 30.0);
```

```
        G_colour = 0;
```

```
        B_colour = 140 - (60.0 / 30.0) * (value - 30.0);
```

```
    } else if (value >= 60 && value < 90) {
```

```
        R_colour = 120 + (135.0 / 30.0) * (value - 60.0);
```

```
        G_colour = 0;
```

```
        B_colour = 80 - (70.0 / 30.0) * (value - 60.0);
```

```

} else if (value >= 90 && value < 120) {

    R_colour = 255;

    G_colour = 0 + (60.0 / 30.0) * (value - 90.0);

    B_colour = 10 - (10.0 / 30.0) * (value - 90.0);

} else if (value >= 120 && value < 150) {

    R_colour = 255;

    G_colour = 60 + (175.0 / 30.0) * (value - 120.0);

    B_colour = 0;

} else if (value >= 150 && value <= 180) {

    R_colour = 255;

    G_colour = 235 + (20.0 / 30.0) * (value - 150.0);

    B_colour = 0 + (255.0 / 30.0) * (value - 150.0);

}

```

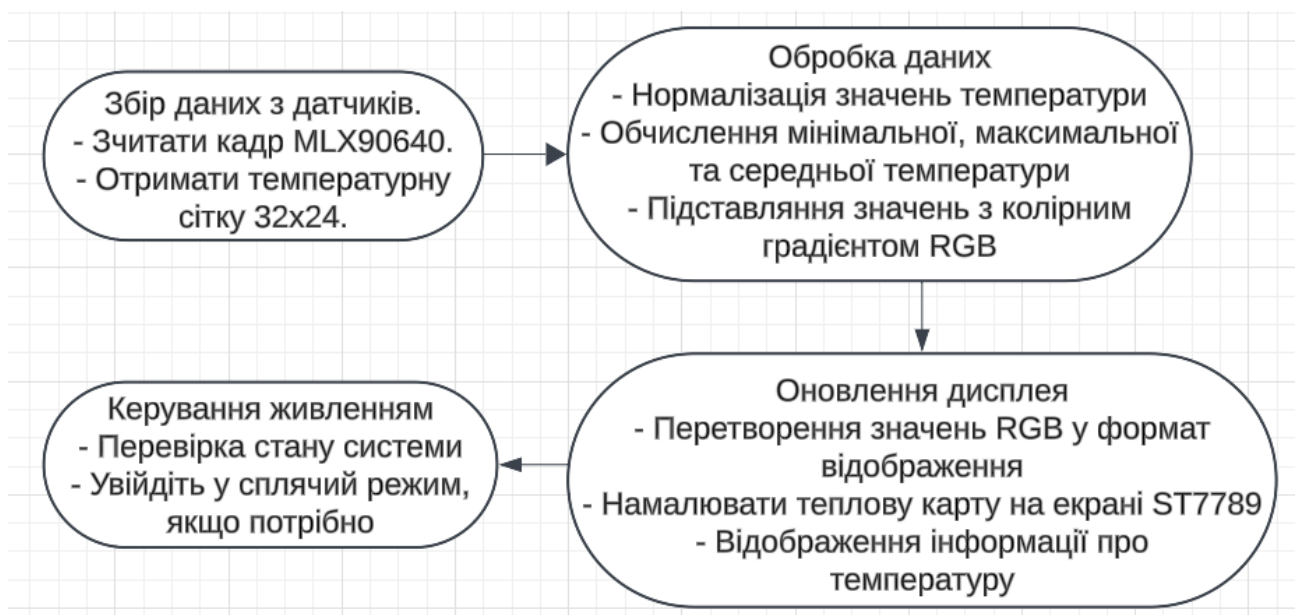


Рис. 37 – Схема програмного забезпечення

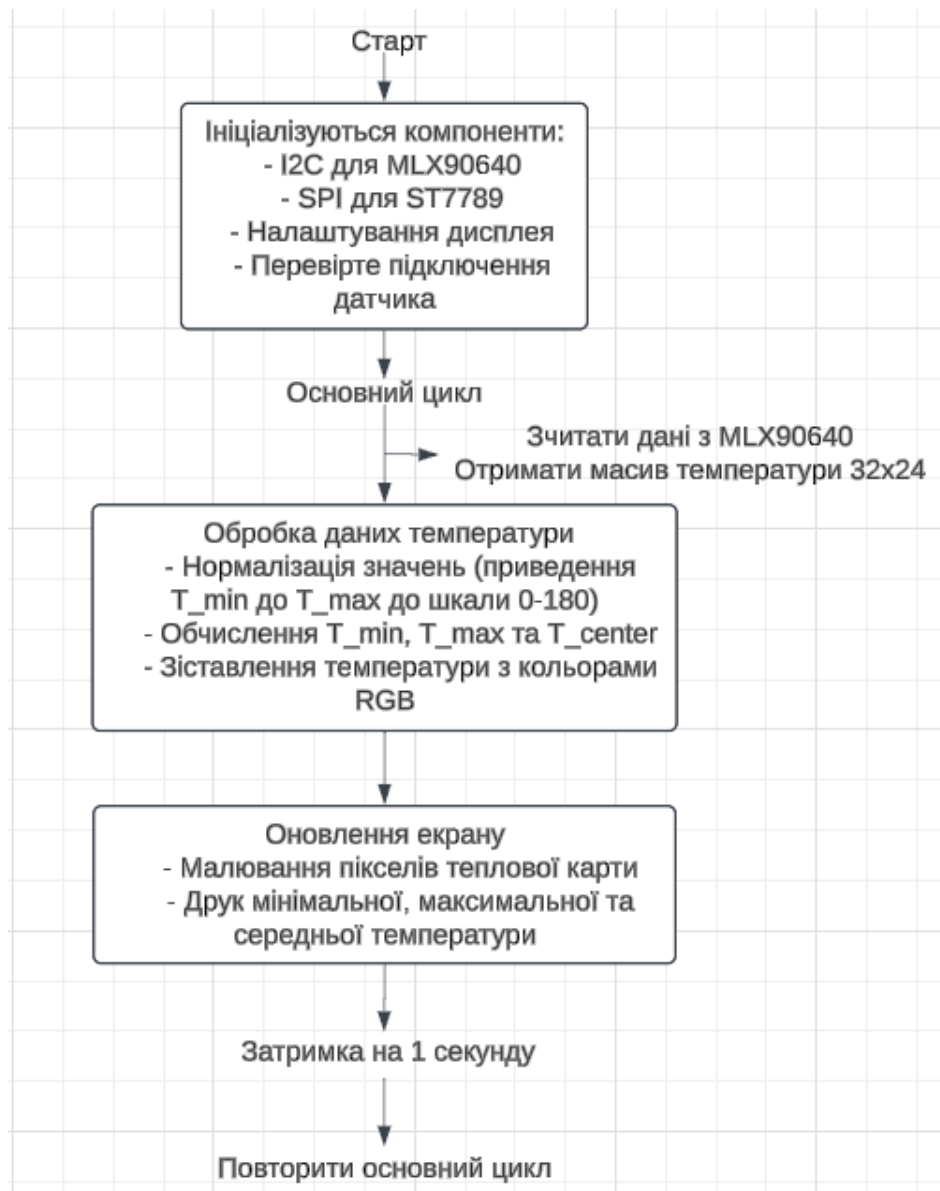


Рис. 38 – Блок-схеми алгоритмів

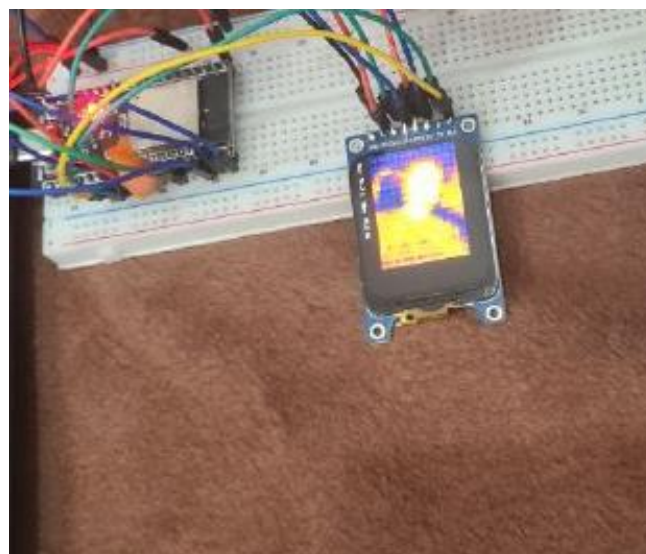


Рис. 39 – Приклад зображення тіла



Рис. 40 – Приклад зображення руки

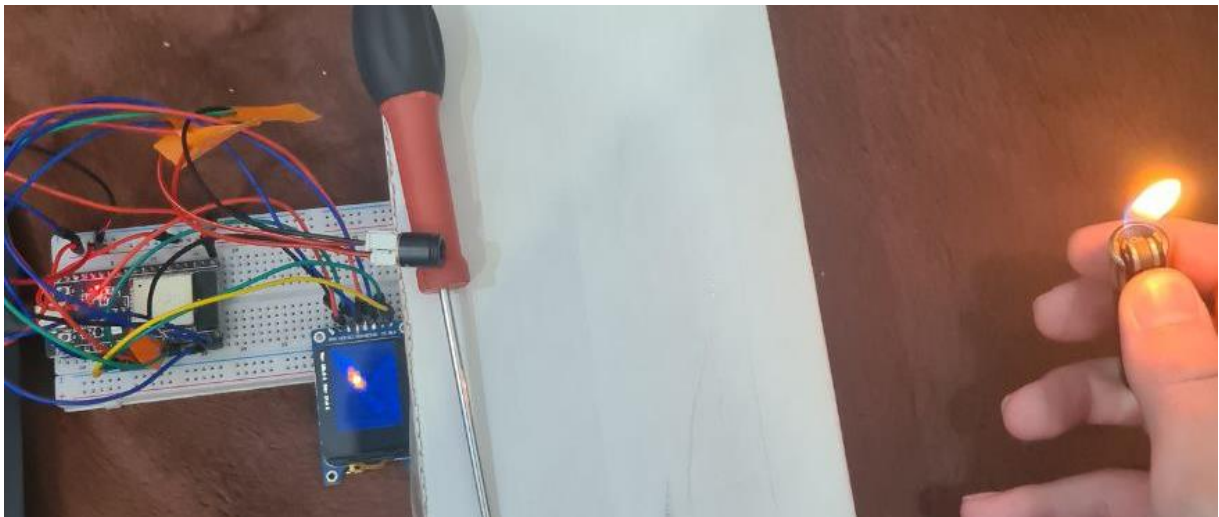


Рис. 41 – Приклад зображення запальнички

Висновок до розділу 4

На основі розділу 4 основна увага приділяється розробці та обґрунтуванню апаратної архітектури для комп'ютерно-інтегрованого теплового пеленгатора. Цей розділ висвітлює ретельний вибір компонентів та їх інтеграцію для досягнення високої продуктивності та надійності.

Обране апаратне забезпечення, включаючи мікроконтролер ESP32, дисплей ST7789 і датчик MLX90640, демонструє чудову синергію, забезпечуючи точну обробку теплових даних і ефективну візуалізацію. Модульна конструкція дозволяє гнучко адаптувати систему до різних застосувань, а низьке

енергоспоживання забезпечує портативність і можливість використання в польових умовах. Крім того, наявність надійних комунікаційних інтерфейсів забезпечує безперешкодну інтеграцію із зовнішніми системами.

Апаратна архітектура оптимізована для компактності, довговічності та економічної ефективності, що робить її придатною для різних умов і застосувань. Такий підхід не лише відповідає цілям проєкту, але й закладає міцний фундамент для масштабування та подальших інновацій в галузі тепловізійних систем.

Розділ 5. Розроблення стартап-проєкту «Комп’ютерно-інтегрований портативний теплопеленгатора»

5.1 Опис ідеї проєкту

Мій теплопеленгатор поєднує портативність та ефективність, спеціально розроблений для військових потреб. Він поєднує в собі компактне, легке обладнання з передовими можливостями інфрачервоного тепловізійного виявлення, що забезпечує ефективну роботу в тактичних і польових умовах. Датчик MLX90640 зчитує інфрачервоне випромінювання, створюючи детальну температурну карту. Мікроконтролер ESP32 обробляє ці дані, забезпечуючи візуалізацію та підключення в реальному часі. Дисплей ST7789 відображає чітку теплову карту для негайного відгуку. У таблиці 5.1 показано ідея стартапу:

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартапу

Ідея проєкту	Застосування	Що получить користувач
Комп’ютерно-інтегрований портативний теплопеленгатор	Військове діло	Низька ціна
	Пошуково-рятувальна сфера	Якісне зображення
	Використання в побуті	Простота в використанні

Цей компактний пристрій відповідає різноманітним потребам. У сфері військового діла, це допомагає виявити людину в умовах поганої видимості. Для Пошуково-рятувальна застосування він може знайти людину під завалами, або

людину, яка стала жертвою повню. У розумних будинках він покращує безпеку, виявляючи неефективність використання енергії або потенційні ризики пожежі. Його компактна конструкція дозволяє легко розгортати його в польових умовах, а інтегровані компоненти забезпечують точне виявлення тепла, візуалізацію в реальному часі та передачу даних. Конкуренти, такі як FLIR і Seek Thermal, домінують в преміум-сегменті, але їм не вистачає доступності і можливості налаштування. Мій стартап відрізняється тим, що пропонує платформу з відкритим вихідним кодом, що робить її придатною для любителів і викладачів. Його модульна конструкція дозволяє здійснювати майбутні оновлення, що підвищує його привабливість для різних груп користувачів. На таблиці 5.2 представлено аналіз доступності та характеристик на ранку моделей тепловізійних пристроїв.

Таблиці 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конку- рентів			W (слабк а сторон а)	N (нейтраль на сторона)	S (сильн а сторон а)
		Мій проє кт	FLIR C5	Seek CompactP RO			
1	Роздільна здатність тепловізора	32x2 4	160x1 20	320 x 240	W		

2	Точність вимірювання температури	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$		N	
3	Частота оновлення кадрів	9 Гц	15 Гц	30 Гц	W		
4	Енергоспоживання	20 мА	50 мА	15 мА		N	
5	Ціна проєкту	\$60	\$759–819	\$399			S

Хоча роздільна здатність мого сенсору не дуже велика, але з правильною інтерполяцією, вона стає гідною для вимог, які треба виконати моему теплопеленгатору

Його легка конструкція та робота від акумулятора роблять його придатним для мобільного та польового використання. Платформа з відкритим вихідним кодом підтримує розробників і любителів, забезпечуючи користувальницькі інтеграції, такі як підключення до Інтернету речей або автоматичні сигнали тривоги. Пристрій виділяється своєю доступністю, що робить теплопеленгатор доступним для більшої кількості користувачів. Навчальні заклади також можуть використовувати його для навчання тепловим принципам, розширюючи його вплив за межі традиційних ринків.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Комп'ютерно-інтегрований портативний тепlopеленгатор	Використання MLX90640ESF-BAВ для зчитування теплових даних	Доступна на ринку; потребує інтеграції	Доступна авторам проєкту
		Використання ESP-WROOM-32 для обробки та передачі даних	Готова для впровадження у пристрої	Проста у програмуванні
		Використання ST7789 для візуалізації теплового зображення	Доступна; інтегрується з мікроконтролером	Підтримується на рівні відкритих бібліотек
2	Програмне забезпечення	Обробка даних за допомогою інтерполяції та кольорових карт	Відомі алгоритми обробки	Реалізується через програмування на C++

Датчик MLX90640 забезпечує роздільну здатність 32×24, виявляє температури від -40° С до 300° С. Він працює з в різних сферах, що робить його придатним для таких завдань, як виявлення перегріву обладнання або виявлення медичних захворювань.

Таблиці 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних конкурентів	15-20 (з урахуванням інших молодих конкурентів)
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	600 000 - 800 000 у.о.
3	Динаміка ринку	Зростає у військовій сфері
4	Наявність обмежень у виробництві	Немає, система легко збирається та не має проблем з постачанням комплектуючих
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідає військовим стандартам, сертифікація за стандартами ISO
6	Середня рентабельності в галузі, %	25-30%

Мікроконтролер ESP32 керує системою, виконуючи безліч завдань, таких як збір теплових даних, запуск алгоритмів інтерполяції для згладжування

зображень і керування бездротовими з'єднаннями. Його двоядерна архітектура забезпечує ефективну багатозадачність, а режими низького енергоспоживання максимізують час роботи від батареї для портативного використання.

Дисплей ST7789 перетворює необроблені температурні дані в кольорову теплову карту. Користувачі можуть візуально інтерпретувати температурні градієнти безпосередньо на пристрої без зовнішнього програмного забезпечення. Компактний розмір дисплея підвищує портативність, а його висока роздільна здатність забезпечує чітке зображення.

Інженерні рішення допомагають вирішувати проблеми. Енергоефективність є критично важливою для мобільних додатків, що досягається за рахунок мінімізації непотрібних обчислювальних навантажень. Шум у показаннях датчиків зменшується за допомогою програмних методів фільтрації. Бездротовий зв'язок оптимізовано для надійного обміну даними в режимі реального часу через Wi-Fi або Bluetooth.

Поєднання надійного обладнання та ефективної обробки дає змогу створити універсальний продукт. Його модульність дозволяє інтегрувати в різні системи, від платформ IoT до освітніх комплектів. Завдяки використанню доступних, але високоякісних компонентів, стартап балансує між функціональністю, масштабованістю і вартістю, що робить його доступним для широкої аудиторії.

5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту

Мій стартап-проєкт орієнтований на зростаючий ринок, пропонуючи рішення для військових. Прикордонні війська, які можуть контролюють кордони та зони з обмеженим доступом. Підрозділи такі як пожежники або рятувальники, можуть працювати в умовах поганої видимості, таких як темрява або туман, для того щоб, точно виявляти тепло для ідентифікації людей і транспортних засобів

таблиця 5.5
Таблиця 5.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Тип клієнта	Характеристики	Потреби/вимоги
Військова сфера	Тактичні підрозділи, спецпідрозділи та розвідувальні групи	Компактний і портативний тепловізор для польового використання
	Підрозділи, які працюють в умовах поганої видимості, таких як темрява або туман	Точне виявлення тепла для ідентифікації людей і транспортних засобів
	Прикордонні війська - патрульні групи, які контролюють кордони та зони з обмеженим доступом	Тепловізійне зображення в реальному часі для виявлення порушників на великій відстані

Світовий ринок тепловізійних систем стрімко розвивається завдяки попиту на доступні та портативні рішення. Прогнозований темп зростання становить понад 7 відсотків на рік, що відкриває можливості для нових учасників ринку. Мій теплопеленгатор, ціна якого значно нижча, ніж у конкурентів високого класу, відповідає потребам споживачів з обмеженим бюджетом. Проведемо аналіз загроз проекту таблиця 5.6.

Таблиця 5.6 - Фактори загроз

Фактор загрози	Опис	Можливі наслідки	Заходи мінімізації

Конкуренція на ринку	Наявність великих гравців, таких як FLIR Systems або Seek Thermal.	Втрата частки ринку через домінування конкурентів.	Унікальне позиціонування: компактність, доступність, функціонал.
Високі витрати на виробництво	Собівартість компонентів, зокрема сенсора MLX90640 та мікроконтролера ESP32.	Збільшення кінцевої ціни продукту та зниження конкурентоспроможності.	Масове виробництво та пошук оптимальних постачальників.
Технологічні обмеження	Обмежена роздільна здатність сенсора 32×24, що впливає на деталізацію зображення.	Зниження привабливості пристрою для деяких військових застосувань.	Використання інтерполяції для підвищення якості зображення.
Проблеми енергоспоживання	Обмежений час роботи від двох батарей 3.3V у польових умовах.	Припинення роботи пристрою у критичний момент.	Оптимізація енергоспоживання за рахунок "сплячих" режимів ESP32.

Залежність від постачальників	Ризики затримок поставок ключових компонентів, таких як сенсори та дисплеї.	Порушення строків виробництва та запуску продукту на ринок.	Диверсифікація постачальників та створення запасів компонентів.
-------------------------------	---	---	---

Таблиця 5.7 - Фактори можливостей

Фактор можливості	Опис	Потенційний результат	Дії для реалізації
Зростання попиту на тепловізори	Збільшення потреби у портативних тепловізійних пристроях для військових та охоронних служб.	Розширення ринку збуту, підвищення попиту на продукт.	Активний маркетинг серед військових підрозділів та охоронних фірм.
Збільшення військових бюджетів	Ріст інвестицій у військові технології та обладнання по всьому світу.	Можливість отримання замовлень від оборонних організацій та урядів.	Співпраця з державними агентствами та тендерні участі.

Експортні можливості	Попит на тепловізори у країнах із низькою видимістю (туман, нічні операції, гірська місцевість).	Вихід на міжнародний ринок та збільшення прибутку.	Встановлення партнерств із міжнародними дистриб'юторами.
Доступність компонентів	Наявність на ринку доступних і ефективних компонентів, таких як MLX90640 та ESP32.	Зниження витрат на виробництво та покращення конкурентоспроможності.	Закупівля компонентів у надійних та недорогих постачальників.
Гнучкість і модульність продукту	Можливість модифікації пристрою для інших цілей: охорона, рятувальні операції, промисловість.	Розширення цільових ринків та адаптація до нових потреб.	Розробка додаткових функцій і кастомізація пристрою.
Популярність	Зростання інтересу до портативних та енергоефективних	Збільшення продажів за рахунок практичності та мобільності пристрою.	Просування продукту як легкого,

компактних рішень	х пристроїв серед військових.		надійного та довготривалого.
-------------------	-------------------------------	--	------------------------------

Конкуренти, такі як FLIR і Seek Thermal, домінують в преміум-сегменті, але їм не вистачає доступності і можливості налаштування. Проєкт буде відрізнятися тим, що пропонує платформу з відкритим вихідним кодом, що робить її придатною для любителів і викладачів. Його модульна конструкція дозволяє здійснювати майбутні оновлення, що підвищує його привабливість для різних груп користувачів.

Таблиця 5.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№ п/п	Особливості конкурентного середовища	Прояв даної характеристики	Вплив на діяльність підприємства та дії для конкурентоспроможності
1	Тип конкуренції	Монополістична конкуренція	Потрібно підкреслити унікальність продукту через функціонал і мобільність.
2	Рівень конкуренції	Національний та міжнародний рівень	Вихід на міжнародний ринок для розширення охоплення потенційних клієнтів.
3	Галузеві характеристики	Внутрішньогалузева конкуренція серед	Сфокусуватися на конкретному сегменті:

		виробників тепловізійних систем	військові та тактичні операції.
4	Конкуренція за типом товару	Товароспецифічна конкуренція (тепловізійні камери для мобільного використання)	Важливо підкреслити переваги пристрою: компактність, автономність, IoT.
5	Характер конкурентних переваг	Переваги на основі цінкових і нецінових факторів	Пропонування нижчої ціни, збереження високої якості та додаткових функцій.
6	Інтенсивність конкуренції	Брендована конкуренція (FLIR та Seek Thermal є впізнаваними брендами)	Розробка сильного бренду з фокусом на військовий сегмент ринку.

Ринок тепловізійних пристроїв швидко розширюється в різних галузях промисловості. Мій проєкт завдяки своїй доступній та універсальній конструкції може використовуватися в різних галузях. В охороні здоров'я він задовольняє зростаючу потребу в безконтактному температурному скринінгу та діагностичних інструментах. У промисловому моніторингу він забезпечує економічно ефективний спосіб виявлення перегріву обладнання, забезпечуючи безпеку та запобігаючи пошкодженням. Ринок «розумних будинків» виграє від використання тепловізорів для моніторингу енергоспоживання та виявлення

пожеж.

Конкурентами на ринку тепловізійних систем є такі відомі бренди, як FLIR, а також компанії середнього класу, такі як Seek Thermal. Моя робота відрізняється більш низькою ціною, відкритим вихідним кодом і портативністю. Це робить його привабливим для любителів, викладачів і малих підприємств, яким традиційні системи можуть здатися занадто дорогими або спеціалізованими.

Таблиця 5.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прояв характеристик	Вплив на діяльність стартапу та дії для підвищення конкурентоспроможності
Прямі конкуренти в галузі	Основні конкуренти: FLIR Systems (FLIR C5), Seek Thermal (CompactPRO).	Потрібно підкреслити унікальність моєї роботи за рахунок нижчої ціни та мобільності.
Потенційні конкуренти	Нові компанії, що розробляють бюджетні тепловізори або портативні IoT-рішення.	Активний маркетинг, інновації та партнерства для швидкого виходу на ринок.
Постачальники	Залежність від постачання сенсорів MLX90640, мікроконтролерів ESP32 та дисплеїв.	Диверсифікація постачальників, створення запасів компонентів для уникнення збоїв.

Клієнти	Військові структури, охоронні фірми, пошуково-рятувальні служби.	Запропонувати надійний продукт з енергоефективністю та IoT-функціоналом.
Товари-замінники	Дорогі тепловізійні системи або дешеві інфрачервоні сенсори з низькою роздільною здатністю.	Позиціонування тепlopеленгатора як оптимального рішення за ціною та функціоналом.

Прогнозується, що світовий ринок тепловізійних систем значно зросте в найближчі роки. Фактори, що стимулюють це зростання, включають досягнення в галузі охорони здоров'я, зростаючий попит на автоматизацію і розвиток технологій «розумного будинку». Стартап має всі шанси завоювати свою частку на цьому ринку, пропонуючи доступне і гнучке рішення, яке підходить як для професійного, так і для особистого використання. Його відкритий характер заохочує інновації, приваблюючи розробників і викладачів, які шукають платформу, що налаштовується.

Таблиця 5.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що підкреслюють важливість фактора для проекту)
1	Ціна	Тепlopеленгатор має значно нижчу ціну порівняно з конкурентами FLIR C5 і Seek CompactPRO, що робить його доступним для широкого кола споживачів.

2	Портативність	Компактний розмір і легка вага пристрою забезпечують зручність під час тактичного використання у польових умовах.
3	Енергоефективність	Завдяки оптимізації споживання енергії, пристрій працює тривалий час від двох батарей 3.3 В, що є критичним для автономних місій.
4	Функціональність IoT	Вбудований модуль ESP-WROOM-32 забезпечує бездротову передачу даних (Wi-Fi/Bluetooth), що розширює можливості моніторингу.
5	Швидка обробка даних	ESP32 забезпечує обробку даних теплового сенсора MLX90640 в реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на теплові аномалії.
6	Універсальність застосування	Пристрій може використовуватися для військових, охоронних, рятувальних та інженерних задач.
7	Якість візуалізації	Дисплей ST7789 надає чітке зображення температурних карт із можливістю кольорового кодування для зручної інтерпретації даних.

Завдяки широкому спектру застосувань і цінній доступності та

адаптивності, стартап проєкт може стати цінним інструментом на зростаючому ринку тепловізійного обладнання.

Таблиця 5.11 -Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Комп'ютерно-інтегрований портативний тепlopеленгатор»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали	Пояснення
1	Компактність та портативність	3	Завдяки компактному дизайну пристрій легко переносити та використовувати.
2	Низька енергоспоживаність	3	Оптимізоване живлення на 3.3В батареях забезпечує довготривалу автономність.
3	Вартість пристрою	2	Доступна ціна порівняно з конкурентами FLIR C5 та Seek CompactPRO.
4	Точність теплового сенсора	1	Точність вимірювання у межах $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ відповідає основним потребам користувачів.
5	Роздільна здатність сенсора	-2	Роздільна здатність 32×2432 \times 2432 $\times 24$ нижча, ніж у конкурентів на ринку.
6	Можливість IoT-підключення	2	Підтримка Wi-Fi та Bluetooth відкриває можливість інтеграції у мережеві системи.

7	Впізнаваність бренду	-1	Недостатня впізнаваність стартапу на ринку у порівнянні з великими брендами.
8	Швидкість обробки даних	2	Завдяки ESP-WROOM-32 забезпечується швидка обробка даних у реальному часі.
9	Залежність від постачальників	-2	Висока залежність від поставок сенсора MLX90640 та мікроконтролера ESP32.

Аналіз показує, що головними сильними сторонами проєкту є компактність, енергоефективність, доступна ціна та підтримка IoT. Основними слабкими сторонами є обмежена роздільна здатність сенсора, залежність від постачальників та низька впізнаваність бренду. У подальшій роботі необхідно акцентувати увагу на просуванні переваг продукту та пошуку шляхів покращення слабких характеристик.

SWOT-аналіз є інструментом для визначення сильних і слабких сторін стартап-проєкту, а також можливостей та загроз у ринковому середовищі. Аналіз допомагає сформулювати ключові стратегії для подальшого розвитку

Таблиця 5.12 - SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони	Слабкі сторони:
- Компактність та портативність пристрою	- Обмежена роздільна здатність сенсора 32×24.
- Низьке енергоспоживання та автономність	- Залежність від постачання ключових компонентів.

- Доступна вартість порівняно з конкурентами (FLIR C5, Seek CompactPRO).	- Відносно новий бренд на ринку без сильної репутації.
- Вбудована функціональність IoT (Wi-Fi, Bluetooth).	- Обмежений бюджет для масштабування виробництва.
- Легкість використання завдяки інтуїтивному інтерфейсу.	0

У таблиці 5.13 представлені основні альтернативи ринкової поведінки для стартап-проєкту з урахуванням його ключових переваг та можливостей виходу на ринок. Першочерговим завданням є вихід на ринок через державні замовлення у військовій сфері та співпраця з пошуково-рятувальними службами, де потреба в портативних тепловізорах є найбільш актуальною. Ці альтернативи мають високу ймовірність отримання ресурсів і дозволяють досягти швидкої комерціалізації продукту в короткі строки. Другий напрямок передбачає партнерство з охоронними компаніями для інтеграції пристрою в системи безпеки. Ця альтернатива має середню ймовірність реалізації та потребує додаткового часу для налагодження співпраці.

Довгострокові альтернативи включають вихід на міжнародні ринки через дистриб'юторські угоди та адаптацію пристрою для цивільних потреб, таких як енергетичний аудит чи моніторинг інфраструктури. Реалізація цих заходів потребує додаткових ресурсів і часу, але забезпечує значний потенціал для зростання та масштабування проєкту.

Таблиця 5.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Вихід на ринок через державні замовлення у військовій сфері	Висока	Короткострокові (6-12 місяців)
2	Партнерство з охоронними компаніями для впровадження пристрою в системи безпеки	Середня	Середньострокові (1-2 роки)
3	Продаж пристроїв для рятувальних операцій та пошукових служб	Висока	Короткострокові (6-12 місяців)
4	Вихід на міжнародні ринки шляхом укладання угод з дистриб'юторами	Середня	Довгострокові (2-3 роки)
5	Розробка додаткових функцій та адаптація пристрою для цивільних потреб (енергетичний аудит)	Низька	Довгострокові (2-3 роки)

5.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту

Стартап потребує цілеспрямованої ринкової стратегії для забезпечення успішного виходу на ринок і зростання. Пристрій позиціонується як економічно ефективний тепловізійний інструмент, який заповнює прогалину між дорогими професійними системами і базовими датчиками. Привабливість приладу ще

більше підвищується завдяки відкритому коду та портативності.

Основні цільові групи потенційних споживачів стартап-проєкту. Пріоритетними сегментами є військові підрозділи, прикордонні служби та пошуково-рятувальні служби, які мають високу готовність сприйняти продукт завдяки його портативності, енергоефективності та зручності у використанні під час складних операцій.

Сегмент приватних охоронних компаній також демонструє середній попит, проте інтенсивність конкуренції тут вища через наявність існуючих рішень на ринку. Сегмент технологічних дистриб'юторів забезпечує можливість розширення збуту на міжнародні ринки через партнерства.

Таблиця 5.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів стартап-проєкту

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)
1	Військові підрозділи: армійські спецпідрозділи, тактичні групи.	Висока	Високий попит на портативні та енергоефективні тепловізори для польових операцій.
2	Прикордонні служби: команди для моніторингу кордонів і стратегічних територій.	Висока	Стабільний попит для використання в умовах поганої видимості.
3	Пошуково-рятувальні служби: команди для	Висока	Високий попит на тепловізори для

	виявлення людей під час рятувальних операцій.		знаходження теплових слідів.
4	Приватні охоронні компанії: моніторинг об'єктів і територій.	Середня	Середній попит на доступні тепловізори для охоронної діяльності.

Зусилля з просування зосереджені на цифрових платформах. Краудфандингові кампанії на Kickstarter і Indiegogo можуть викликати ранній інтерес і забезпечити початкове фінансування. Платформи соціальних мереж демонструють можливості продукту за допомогою навчальних посібників, відеороликів та реальних застосувань. Партнерство зі спільнотами мейкерів, такими як Hackster.io, розширить охоплення серед розробників та ентузіастів «зроби сам».

Дистрибуція покладається на онлайн-продажі через платформи електронної комерції, такі як Amazon та SparkFun. Офіційний веб-сайт пропонуватиме прямі продажі з можливістю кастомізації та оновлень. Регіональні дистриб'ютори забезпечать доступність на місцевих ринках. Поетапне розгортання надасть пріоритет онлайн-продажам, а згодом пошириться на фізичні магазини.

Базову стратегію розвитку стартап-проекту, що фокусується на ключових альтернативних підходах до впровадження на ринок. Головними напрямками є концентрований маркетинг у сегментах державних замовлень та рятувальних операцій, де потреба у портативних тепловізійних пристроях є найбільшою. Ця стратегія передбачає зосередження на специфічних потребах ключових клієнтів, таких як військові та пошуково-рятувальні служби, із акцентом на компактність, енергоефективність та точність пристрою.

Для охоронних компаній та ринку енергетичного аудиту застосовується диференційований маркетинг, що дозволяє адаптувати проєкт до потреб різних

сегментів ринку за рахунок низької вартості, IoT-функціоналу та гнучкості використання. Вихід на міжнародний ринок передбачає застосування масового маркетингу із фокусом на конкурентну ціну, міжнародну доступність та можливість інтеграції пристрою у сучасні системи моніторингу.

Таблиця 5.15 - Визначення базової стратегії розвитку стартап-проєкту

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Вихід на ринок через державні замовлення	Концентрований маркетинг	Портативність, енергоефективність, точність, низька ціна	Стратегія концентрації на ключових клієнтах
2	Співпраця з охоронними компаніями	Диференційований маркетинг	Доступна ціна, IoT-функціонал, зручність використання	Стратегія позиціонування як бюджетного рішення
3	Впровадження у пошуково-рятувальних операціях	Концентрований маркетинг	Компактність, швидкість розгортання, точність у реальних умовах	Стратегія спеціалізації у нішевих сегментах
4	Вихід на міжнародні ринки через	Масовий маркетинг	Міжнародна доступність, конкурентна ціна,	Стратегія розширення ринку

	дистриб'юторів		гнучка інтеграція з IoT-системами	
--	----------------	--	-----------------------------------	--

Залучення клієнтів є життєво важливим. Надання прошивки з відкритим кодом на таких платформах, як GitHub, заохочує кастомізацію. Освітні ресурси, такі як вебінари та посібники, допоможуть користувачам максимально розкрити потенціал пристрою. Регулярні оновлення та чуйна підтримка підтримуватимуть задоволеність клієнтів.

Поєднання цілеспрямованого ціноутворення, ефективного просування і надійної дистрибуції дозволяє стартап проєкту зарекомендувати себе як провідне рішення в області доступного тепловізійного обладнання. Ця стратегія забезпечує широку привабливість, зберігаючи при цьому фокус на інноваціях і залученні користувачів.

Таблиця 5.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт "першоходом" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Компанія буде забирати існуючих споживачів у конкурентів	Не копіюватиме повністю, але використає схожі функції: портативність, доступна ціна	Стратегія диференціації

2	Ні	Шукатиме нових споживачів серед військових та пошуково-рятувальних служб	Додаткові IoT-функції для кращої інтеграції з системами моніторингу	Стратегія інноваційного розвитку
3	Ні	Компанія орієнтуватиметься на малозабезпечений сегмент ринку	Створення доступного, енергоефективного тепловізійного рішення	Стратегія цінової конкуренції

У таблиці 5.16 визначено базову стратегію конкурентної поведінки для стартап-проєкту. Проєкт не є "першопрохідцем" на ринку, оскільки існують сильні конкуренти, такі як FLIR C5 та Seek CompactPRO. Проте, стратегія орієнтована на забезпечення диференціації завдяки доступній ціні, портативності та IoT-функціоналу, що дозволяє залучати споживачів з існуючого ринку.

Додатково компанія буде шукати нових споживачів серед військових, прикордонних та рятувальних служб, надаючи інноваційні можливості для підвищення ефективності їх діяльності. У порівнянні з конкурентами, компанія зосередиться на ціновій стратегії, пропонуючи пристрій за значно нижчою вартістю, але з відповідними функціональними можливостями.

Таблиця 5.17 - Визначення стратегії позиціонування стартап-проєкту

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну
-------	-------------------------------------	---------------------------	-------------------------------------	--

			власного стартап-проекту	позицію проекту (три ключові)
1	Компактність та портативність	Стратегія концентрації	Легкий, компактний пристрій, зручний у використанні	Мобільність, практичність, польова зручність
2	Доступна вартість	Стратегія цінової конкуренції	Нижча ціна порівняно з конкурентами (FLIR C5, Seek CompactPRO)	Доступність, економічна ефективність, оптимальне співвідношення "ціна-якість"
3	Висока енергоефективність	Стратегія інноваційного розвитку	Тривалий час роботи від батарей завдяки енергоефективності	Автономність, енергоефективність, надійність
4	ІоТ-функціональність	Стратегія диференціації	Підтримка Wi-Fi і Bluetooth для передачі даних	Інтеграція, цифровізація, технологічна сучасність
5	Висока точність вимірювання та	Стратегія спеціалізації	MLX90640 сенсор з обробкою на базі	Точність, швидкодія, якість візуалізації

	швидкість обробки		ESP32 у реальному часі	
--	----------------------	--	---------------------------	--

Мій стартап-проект на основі вимог цільової аудиторії, обраних стратегій розвитку та ключових конкурентних переваг. Основні вимоги включають компактність, доступну вартість, високу енергоефективність, IoT-функціональність та точність вимірювань.

Для кожної вимоги обрано відповідну базову стратегію розвитку: стратегія концентрації на мобільності пристрою для польових умов, цінова конкуренція для досягнення доступності продукту, інноваційний розвиток завдяки енергоефективності, диференціація завдяки IoT-функціоналу та спеціалізація для надання точної і швидкої обробки даних у реальному часі.

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап проекту

Основною потребою ринку є портативний, енергоефективний та доступний тепловізійний пристрій. Відповідно, головними вигодами, які пропонує мій тепловізор, є компактність, тривалий час автономної роботи та конкурентна вартість.

Серед ключових переваг перед конкурентами виділяється значно нижча ціна у порівнянні з моделями FLIR C5 та Seek CompactPRO при збереженні базових функціональних можливостей. Точність вимірювання та швидка обробка даних забезпечуються сучасним сенсором MLX90640 та мікроконтролером ESP32. Додатковою перевагою є інтеграція з IoT-системами, що розширює можливості використання пристрою у різних сферах: від військових завдань до рятувальних операцій.

Таблиця 5.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Портативність	Компактний і легкий пристрій з можливістю мобільного використання.	Мала вага, зручність перенесення та розгортання у польових умовах.
2	Енергоефективність	Низьке енергоспоживання, тривала робота від батарей 3.3 В.	Тривалий час автономної роботи порівняно з конкурентами (FLIR C5, Seek CompactPRO).
3	Доступна вартість	Конкурентна ціна з урахуванням функціональних можливостей.	Значно нижча ціна при збереженні базових характеристик і продуктивності.
4	Швидка обробка та точність даних	Оперативне отримання температурних карт у реальному часі.	Обробка даних на ESP32, використання сенсора MLX90640 для точної теплової візуалізації.

5	Інтеграція з сучасними системами IoT	Підтримка Wi-Fi та Bluetooth для передавання та обробки даних.	Можливість інтеграції в системи моніторингу та IoT-платформи для віддаленої роботи.
---	--------------------------------------	--	---

Три рівні моделі товару стартап-проєкту. Перший рівень – товар за задумом – відображає основну потребу цільової аудиторії: надання портативного та енергоефективного тепловізора, який забезпечує якісну візуалізацію температурних даних у реальному часі.

Другий рівень – товар у реальному виконанні – охоплює конкретні технічні характеристики пристрою: сенсор MLX90640 для зчитування теплових даних, мікроконтролер ESP32 для обробки інформації, дисплей ST7789 для відображення температурних карт. Крім того, пристрій має підтримку IoT-функцій (Wi-Fi та Bluetooth), що дозволяє передавати дані на інші пристрої або хмарні сервіси.

Третій рівень – товар із підкріпленням – включає додаткові послуги, які створюють додану вартість для споживача: гарантійне обслуговування, технічна підтримка, можливість оновлення програмного забезпечення та інтеграція зі сторонніми системами моніторингу.

Таблиця 5.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Основна функціональна потреба – мобільний, енергоефективний тепловізор для військових, рятувальних місій.

II. Товар у реальному виконанні	Сенсор MLX90640 з роздільною здатністю 32×24; мікроконтролер ESP32 для швидкої обробки даних; дисплей ST7789 для візуалізації; інтеграція з IoT (Wi-Fi, Bluetooth); компактний та енергоефективний корпус.
III. Товар із підкріпленням	Гарантійне обслуговування; технічна підтримка; можливість оновлення прошивки; інтеграція зі сторонніми системами моніторингу.

У таблиці 5.20 наведено межі встановлення ціни для стартап-проекту на основі аналізу ринку товарів-замінників, аналогів та рівня доходів цільової аудиторії. Рівень цін на тепловізори нижнього сегмента, які є товарними замінниками, коливається у межах \$150-\$300. При цьому основні аналоги проекту – тепловізори FLIR C5 та Seek CompactPRO – мають вартість від \$500 до \$800.

Цільова група споживачів, включаючи військові підрозділи, охоронні компанії та пошуково-рятувальні служби, характеризується середнім рівнем доходів. Таким чином, для забезпечення конкурентоспроможності проекту та привабливості для споживачів, встановлено ціновий діапазон: \$200-\$300. Верхня межа ціни дозволяє зберегти доступність пристрою для ринку, тоді як нижня межа забезпечує рентабельність проекту.

Таблиця 5. 20 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
-------	--------------------------------	------------------------------	--	---

1	Тепловізори нижнього сегменту: \$150-\$300	Конкуренти (FLIR C5, Seek CompactPRO): \$500-\$700	Середній дохід військових і охоронних служб	Верхня межа – \$300, нижня межа – \$200
---	--	--	---	---

Основною стратегією для військових підрозділів та прикордонних служб є власна система збуту через прямі канали, що забезпечує швидке виконання замовлень, індивідуальну специфікацію продукту та ефективний контроль якості постачання.

Для пошуково-рятувальних служб оптимальною є власна система з додатковою технічною підтримкою, що передбачає навчання персоналу для максимальної ефективності використання пристрою. Приватні охоронні компанії та індустріальні споживачі обслуговуються через короткі канали збуту з посередниками-дистриб'юторами, які забезпечують консультування клієнтів та доставку продукції.

Таблиця 5.21 - Формування системи збуту стартап-проекту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Військові підрозділи: державні тендери та великі замовлення	Виконання індивідуальних специфікацій, швидке постачання	Прямий канал збуту	Власна система збуту

2	Пошуково-рятувальні служби: індивідуальні та дрібносерійні закупівлі	Налагодження співпраці, технічна підтримка	Короткий канал збуту	Власна система з технічним супроводом
3	Приватні охоронні компанії: середні обсяги закупівель	Консультації щодо налаштування, швидка доставка	Однорівневий канал	Через посередників - дистриб'юторів
4	Прикордонні служби: тендери з великим обсягом замовлень	Гарантійне обслуговування, гнучкі умови постачання	Прямий канал збуту	Власна система збуту

Для військових підрозділів акцент робиться на надійність і портативність пристрою, тоді як для пошуково-рятувальних служб ключовим є швидке реагування та ефективність у критичних умовах. Приватні охоронні компанії потребують доступної ціни та технологічних можливостей, таких як IoT-функціонал. Для прикордонних служб важлива висока точність та енергоефективність у важкодоступних і стратегічних територіях. Індустріальні споживачі зацікавлені у моніторингу інфраструктури та зменшенні теплових втрат.

Кожне рекламне звернення спрямоване на виклик довіри, демонстрацію ефективності та надання конкретних переваг продукту відповідно до потреб кожного сегмента клієнтів. Обрана стратегія комунікації поєднує традиційні канали, як-от галузеві виставки та ЗМІ, з цифровими платформами, що

забезпечує максимальне охоплення потенційних споживачів.

Таблиця 5.22 Концепція маркетингових комунікацій стартап-проекту

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Військові підрозділи, що потребують надійного та мобільного тепловізора	Спеціалізовані виставки, тендерні платформи, галузеві ЗМІ	Портативність, енергоефективність, доступна ціна	Продемонструвати надійність та військову ефективність	"Надійність та точність у складних умовах"
2	Пошуково-рятувальні служби з потребою у швидкому реагуванні	Виставки з безпеки, професійні форуми, онлайн-платформи	Швидкість обробки даних, портативність	Підкреслити ефективність у критичних ситуаціях	"Знаходьте, коли кожна секунда має значення"
3	Приватні охоронні	Інтернет-реклама, B2B	Доступна ціна, IoT-	Донести економічну	"Захист об'єкта з

	компанії для моніторинг у об'єктів	зустрічі, технічні каталоги	функціональ ність	вигоду та технологічність	мінімальн ими витратами "
4	Прикордон ні служби для моніторинг у стратегічни х територій	Тендерні платформи, державні канали комунікацій	Висока точність вимірювань, енергоефект ивність	Підкреслити ефективність у складних кліматичних умовах	"Ваше око у будь- який час та за будь- яких умов"

5.5 Бізнес-модель та реалізація стартап-проєкту

Стартап-проєкт спрямований на розробку портативного тепловізійного пристрою, що поєднує інноваційні рішення та доступність для широкого кола споживачів. Основою пристрою є сенсор MLX90640ESF-BAВ, мікроконтролер ESP-WROOM-32 та дисплей ST7789, які забезпечують точне вимірювання температурних даних, швидку обробку інформації та зручну візуалізацію результатів. Проєкт має на меті покращити ефективність роботи військових підрозділів, пошуково-рятувальних служб та охоронних структур. Бізнес-модель стартапу базується на поєднанні технологічного інноваційного продукту з доступною ціною для споживачів. Проєкт фокусується на мінімізації витрат та максимізації цінності для кінцевого користувача через використання сучасних технологій.

Нижче у Таблиці 5.23 наведено структуровану бізнес-модель «комп'ютерно-інтегрованого портативного теплопеленгатора»

Таблиця 5.23 - Бізнес-модель

Ключові партнери	Постачальники сенсорів (MLX90640), мікроконтролерів (ESP32) та дисплеїв (ST7789). Партнери для тестування продукту: військові структури, рятувальні служби.
Ключові види діяльності	Розробка тепловізійного пристрою, програмування обробки даних, тестування у реальних умовах. Організація маркетингових кампаній та прямих продажів.
Ціннісна пропозиція	Портативний тепловізор із високою точністю вимірювань, доступною ціною та можливістю роботи в автономному режимі.
Відносини з клієнтами	Індивідуальні консультації, технічна підтримка 24/7, навчання користувачів та оновлення прошивки пристрою.
Сегменти користувачів	Військові підрозділи, рятувальні служби, приватні охоронні компанії.
Ключові ресурси	Сенсор MLX90640, мікроконтролер ESP-WROOM-32, дисплей ST7789, команда розробників, тестувальників та маркетологів.
Канали збуту	Прямі продажі через офіційний вебсайт, участь у тендерах, співпраця з дистриб'юторами та галузевими партнерами.
Структура витрат	Витрати на розробку та тестування пристрою, маркетинг, виробництво пілотної партії, закупівля компонентів та логістика.
Джерела доходів	Продаж пристроїв, технічна підтримка, модульні оновлення та сервісне обслуговування.

Основні складові бізнес-моделі:

Стартап орієнтований на прямий продаж пристроїв, а також на співпрацю з дистриб'юторами та державними замовниками. Цільовими сегментами ринку є

військові організації, пошуково-рятувальні служби та приватні охоронні компанії, що потребують точного, портативного та автономного тепловізійного обладнання для виконання критично важливих завдань.

Для реалізації проєкту на перших етапах буде створено прототип пристрою, що проходить ретельне тестування у реальних умовах використання. У разі успішного завершення тестування планується випуск пілотної партії для подальшої апробації серед потенційних клієнтів. Масштабування виробництва дозволить досягти стабільних обсягів продажів на національному ринку, а у перспективі – вихід на міжнародний рівень. Структура витрат проєкту включає закупівлю компонентів для виготовлення пристрою, розробку програмного забезпечення, маркетингові заходи та організацію логістики. Основні джерела доходу передбачають продаж готових пристроїв, технічне обслуговування клієнтів та кастомізацію рішень під конкретні потреби замовників.

План реалізації стартапу складається з кількох етапів:

1. Підготовка та розробка – створення базового прототипу, налаштування програмного забезпечення та інтеграція ключових компонентів.
2. Тестування – перевірка працездатності пристрою у лабораторних та польових умовах, усунення технічних недоліків.
3. Пілотний запуск – виробництво невеликої партії пристроїв для апробації серед ключових споживачів, отримання зворотного зв'язку та фінальне вдосконалення продукту.
4. Масштабування та збут – організація серійного виробництва, вихід на ринок через участь у тендерах та співпрацю з державними і комерційними структурами.

Таблиця 5.24 - Планування стартап-проєкту

Етап	Тривалість	Основні завдання	Очікувані результати
1. Дослідження та підготовка	0-3 місяці	Проведення ринкового аналізу конкурентів і цільових груп споживачів Створення концепції та вимог до продукту	Завершений прототип продукту Звіт про аналіз ринку та конкурентів
2. Розробка продукту	3-6 місяців	Розробка та складання фінального прототипу Програмування IoT функціоналу та обробки даних Тестування пристрою у лабораторних умовах	Повністю функціональний пристрій Виправлені технічні недоліки
3. Випробування та оптимізація	6-9 місяців	Тестування продукту у реальних умовах використання Підготовка до виробництва	Перевірений та оптимізований продукт Завершений технічний дизайн
4. Запуск виробництва	9-12 місяців	Організація виробництва пілотної партії Створення системи контролю якості Налагодження логістичних процесів	Перша серійна партія пристроїв готова до продажу
5. Маркетинг та збут	12-18 місяців	Розробка маркетингової стратегії для різних цільових груп	Продажі пілотної партії Залучення

		Участь у галузевих виставках та тендерах Підписання угод з дистриб'юторами	перших клієнтів та партнерів
6. Масштабування бізнесу	18-24 місяці	Розширення виробничих потужностей Вихід на міжнародні ринки Розробка нових функцій продукту	Масове виробництво пристрою Закріплення позицій на ринку

Цінність проекту полягає у його інноваційності, доступності та високій ефективності у вирішенні завдань різної складності. Завдяки поєднанню передових технологій і зручності використання, продукт має значний потенціал для успішного впровадження у військовій, пошуковій та охоронній сферах як на локальному, так і на міжнародному рівнях.

Висновок до стартап-проекту

Стартап-проект базується на розробці портативного, енергоефективного тепловізійного пристрою з використанням MLX90640ESF-BAВ сенсора, мікроконтролера ESP-WROOM-32 та дисплея ST7789. Основною метою є створення доступного, технологічно просунутого рішення для військових, рятувальних служб, охоронних компаній та індустріальних споживачів.

Проект пройшов усі етапи розробки: аналіз ринку, визначення цільових груп, розробка стратегії позиціонування та планування системи збуту. SWOT-аналіз показав значний потенціал для ринкового успіху завдяки компактності, енергоефективності, точності обробки даних та доступній ціні. Ключовими можливостями є співпраця з військовими підрозділами та вихід на міжнародний ринок, де пристрій може конкурувати з такими моделями, як FLIR C5 та Seek CompactPRO.

Загальна стратегія проекту передбачає концентрований маркетинг для

державних і рятувальних структур та диференційований маркетинг для охоронних та індустріальних клієнтів. Канали збуту орієнтовані на прямі продажі та партнерські програми з дистриб'юторами.

Таким чином, тепlopеленгатор є перспективним стартап-проектом із чітко визначеною стратегією виходу на ринок, врахуванням потреб цільової аудиторії та потенціалом для масштабування на національному та міжнародному рівнях. Реалізація цього проекту забезпечить інноваційний, доступний і ефективний тепловізійний пристрій, що задовольнить потреби користувачів у різних сферах.

Висновок

Моя магістерська дисертація починається з огляду тепловізійних пеленгаторів, підкреслюючи їх важливість у виявленні та інтерпретації інфрачервоного випромінювання для різноманітних застосувань. Історичний контекст висвітлює еволюцію цих систем до компактних і універсальних інструментів, здатних працювати в складних умовах.

Вивчення формування сигналу підкреслює важливість передових методів для точної інтерпретації теплових даних. Такі інновації, як моделювання синусоїдального просторового відгуку і дискретизація гексагональної сітки, демонструють потенціал для підвищення якості зображень при мінімізації помилок. Ці методи забезпечують надійність і точність, необхідні для критично важливих застосувань.

Ретельний підбір та обґрунтування апаратних компонентів формують міцний фундамент для системи. Мікроконтролери STM32F401 і ESP32 забезпечують надійну обчислювальну потужність і зв'язок. Дисплей ST7789 пропонує ефективну платформу для візуалізації. Тепловий датчик MLX90640 забезпечує точне визначення температури. Разом ці компоненти створюють масштабовану, економічно ефективну та адаптовану систему як для промислового, так і для споживчого ринку.

Апаратна архітектура об'єднує вибрані компоненти в цілісну конструкцію,

підкреслюючи ефективність, компактність і гнучкість. Низьке енергоспоживання і модульність підвищують зручність використання системи в різних умовах і сферах застосування. Конструкція відповідає цілям проєкту - створити надійне і портативне рішення для тепловізійного спостереження.

Насамкінець, демонструє добре досліджений та інноваційний підхід до розробки комп'ютерно-інтегрованого теплового пеленгатора. Він поєднує в собі теоретичні знання, технологічні досягнення і практичні принципи проєктування для створення системи, яка відповідає сучасним потребам у тепловізійній техніці. Дослідження підкреслює потенціал для майбутніх удосконалень і ширшого застосування, демонструючи актуальність системи в технологічному ландшафті, що розвивається.

Список використаних джерел:

1. Melexis MLX90640 32x24 IR array Datasheet.
<https://www.melexis.com/en/product/mlx90640>
2. Espressif ESP32 офіційна документація
<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/index.html>
3. STMicroelectronics: Серія STM32F4 офіційна документація
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html>
4. Цифрова обробка сигналів: Принципи, алгоритми та застосування
Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2006). Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications - 1004 с.
5. Інфрачервоне тепловізійне зображення
Книга: Holst, G.C. (2000) Common Sense Approach to Thermal Imaging - 328 с.
6. Колобродов В. Г., Лихоліт М. І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
7. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
8. Захарченко В.С., Колобродов В.Г. (2008). Методи і системи оптично-електронної та цифрової обробки сигналів. Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
9. Гольст, Г. С. (2000). Загальні підходи до тепловізійних систем - 328 с.
10. Гнатюк, С. М. (2016). Основи оптичної та теплової техніки: Навчальний посібник. Київ: Видавництво КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 320 с.
11. Науково-практичні аспекти створення тепловізійних систем: монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Гордієнко, В.І. Микитенко, І.В. Мазурін, С.І. Клюфас – Черкаси: «Вертикаль», 2015. - 150 с.
12. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Маркін М.О. Технологія оптичного виробництва. Навчальний посібник для студентів ВНЗ / Під заг. ред. Г. С.

Тимчика – К.: НТУУ "КПІ", 2016. - 168 с.

13. Гонтаренко, О. В. (2017). Цифрові методи обробки сигналів в оптичних системах. Київ: Видавництво КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 300 ст.

14. Гавриш, О. А. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська.

15. Tinkercad: Онлайн-інструмент для 3D-дизайну та моделювання.

<https://www.tinkercad.com/>

16. Критерій Найквіста та теорія вибірки

Khan Academy. Nyquist Criterion and Sampling Theory.

<https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering>

17. FLIR Systems. FLIR Technical Resources. <https://www.flir.com/>

18. Методи інтерполяції: Білінійні та бікубічні методи

Numerical Recipes. Interpolation Techniques: Bilinear and Bicubic Methods.

<https://numerical.recipes>

19. Основи аналізу електричних кіл

Paul, C. R. (2006). Fundamentals of Electric Circuit Analysis. Hoboken, NJ: Wiley. - 792 с.

20. Обробка сигналів у тепловізійних системах

Aarts, R. M., & Janssen, A. J. E. M. (2003). Signal Processing in Thermal Imaging Systems. IEEE Transactions on Signal Processing

21. Інтеграція тепловізійних зображень і датчиків для вбудованих систем

Texas Instruments. (2022). Thermal Imaging and Sensor Integration for Embedded Systems. <https://www.ti.com>

22. Довідник з оптичного дизайну

Malacara, D., & Malacara, Z. (2004). Handbook of Optical Design. New York: Marcel Dekker. - 512 с.

23. Цифрова обробка зображень

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2017). Digital Image Processing - 1062 с.

24. Білик, В. М., & Мороз, А. О. (2019). Оптичні системи в приладобудуванні. Київ: Видавництво КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 290 с.

25. Лисенко, П. О., & Колесник, В. І. (2021). Інфрачервоні системи у діагностичних приладах. - 312 с.

26. Бойко, Ю. І., & Горобець, В. О. (2020). Методи цифрової обробки сигналів в системах автоматизації. Львів: Видавництво Львівської політехніки. - 350 с.

27. Рубан, В. М. (2020). Ефективність оптико-електронних систем теплового контролю. Вісник НТУУ «КПІ», - 45–53 с.

28. Наукові праці КПІ ім. Ігоря Сікорського. (2024). Збірник наукових праць Інституту приладобудування та оптоелектроніки. Київ: КПІ.

29. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева - 2-е изд: Альпина Паблишер, 2014 - 614 с.

30. Дрейпер, У. Стартапи : професійні ігри Кремнієвої долини / У. Дрейпер ; перед. Е. Шмідта ; пер. з англ. В. Єгорова. - Москва : Эксмо, 2012. - 378 с.

31. Коен, Д. Стартап у Мережі : майстер-класи успішних підприємців / Д. Коен, Б. Фелд ; пер. з англ. М. Іутіна. - 2-е изд. - Москва : Альпіна Паблішер, 2013. - 337 с.

32. Маллінс, Дж. Пошук бізнес-моделі : як врятувати стартап, вчасно змінивши план / Дж. Маллінс, Р. Комісар ; пер. М. Пуксант та Є. Бакушевої. - Москва : Манн, Іванов і Фербер, 2012 - 329 с.

33. Робемед, Н. Найцікавіші стартапи 2013 року [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.forbes.ru/svoi-biznes-photogallery/startapy/248976-samy-interesnye-startapy-2013-goda/photo/1>

34. Статистика смертності та поради з безпеки для стартапів [Електронний ресурс]. -Режим доступу: <https://vc.ru/p/startup-eset>

35. Колобродов В.Г., Микитенко В.І, Балінський Є.Г. Ефективність інфрачервоних оптикоелектронних систем спостереження. - Київ: «Вік принт»,

2017. – 202 с.

36. Колобродов В.Г., Микитенко В.І Тепловізійні оптико-електронні прилади (теорія, приклади і задачі по проектуванню тепловізорів). Підручник. – 2023. – 216 с.