

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Промисловий тепловізор»**

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.051003
«Приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

**на дипломний проект студенту
Чемерису Денису Олександровичу**

1. Тема проекту «Промисловий тепловізор», керівник проекту старший викладач Муравйов Олександр Володимирович, затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. №1384-с.
2. Термін подання студентом проекту _____
3. Вихідні дані до проекту : еквівалентна шуму різниця температур NETD = 60mK; кут поля зору оптичної системи $2w = 10$ град.; спектральний діапазон роботи приладу $\Delta\lambda=8\dots 14$ мкм.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, I Розділ. Теоретична частина, II Розділ. Розрахункова частина, III Розділ. Вибір елементів.
5. Перелік графічного матеріалу: схема оптична, функціональна схема, схема електрична принципова, складальний кресленик, плоскопаралельна пластина, меніск.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний матеріал	Старший викладач, к.т.н. Богдан Г.А		
Електрична схема	Доц., к.т.н. Баженом В.Г		
Пояснювальна записка	Асистент Лашко О.В.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
	Літературний огляд за темою дипломного проекту	15.03.2019	
	Синтез функціональної схеми приладу	25.03.2019	
	Синтез оптичної системи приладу	05.04.2019	
	Моделювання та оптимізація оптичної системи приладу	15.04.2019	
	Вибір електричних компонентів приладу	25.04.2019	
	Синтез електричної схеми приладу	03.05.2019	
	Розробка складального креслення приладу	10.06.2019	

Студент

Д. О. Чемерис

Керівник проекту

О. В. Муравйов

Анотація

Даний дипломний проект освітнього рівню бакалавр являє собою розробку промислового тепловізора, для його використання при проведенні неруйнівного контролю на виробництві. У дипломному проекті проводиться дослідження вже існуючих технологій, проводиться вибір детектора інфрачервоного випромінювання, з оглядом на умови використання тепловізора, розробка оптичної схеми та електричного тракту для роботи з детектором інфрачервоного випромінювання. Завданням дипломного проекту є розробка та розрахунок параметрів тепловізора, складання схеми електричної принципової, складання схеми функціональної та опис принципу роботи схеми. В дипломному проекті приведені розрахунки детектора інфрачервоного випромінювання, розрахунок параметрів тепловізора. В графічній частині проекту представлена схема оптична, схема електрична принципова і складальне креслення, а також схема функціональна. Розроблені креслення деталей схеми оптичної.

Summary

The main purpose of diploma project of an educational level of bachelor, is the development of an industrial thermal imaging camera, for its use in conducting non-destructive control in the production. In the diploma project the research of existing technologies is carried out, the choice of the detector of infrared radiation is carried out, based on the conditions of use of the thermal imaging camera, the development of the optical scheme and the electrical path for the operation of the infrared radiation detector is carried out. The purpose of the diploma project is the development and calculation of parameters of the thermal imaging camera, development of principle electric circuit scheme, development of a functional scheme, and a description of the principle of the scheme. In the graphic part of the project is represented an optical scheme, an principle electric circuit diagram and an assembly drawing, as well as a functional scheme. Drawings of details of the optical scheme are developed.

Зміст

Вступ.....	1
I Розділ. Теоретична частина.....	2
1.1. Інфрачервоний спектр випромінювання.....	2
1.2. Принцип роботи тепловізора.....	9
1.3. Історія теплобачення.....	10
1.4. Види тепловізорів.....	12
1.4.1 Скануючі тепловізори.....	13
1.4.2 Матричні тепловізори.....	16
1.5 Типи інфрачервоних матричних детекторів.....	17
1.5.1 Охолоджувані детектори.....	17
1.5.2. Теплові (неохолоджувані) інфрачервоні детектори.....	18
1.5.3. Типи теплових інфрачервоних детекторів.....	20
1.5.4. Резистивні мікроболометричні детектори.....	20
1.5.5. Піроелектричні та сегнетоелектричні детектори.....	23
1.5.6. Термоелектричні детектори.....	25
1.5.7. Мікроболометри діодного типу.....	27
1.6. Висновки.....	28
II Розділ. Розрахункова частина.....	31
2.1. Розрахунок об'єктива тепловізора.....	32
2.2. Розрахунок параметрів тепловізора.....	40
2.3. Висновки.....	46
III Розділ. Вибір елементів	
3.1. Вибір інфрачервоного датчика.....	47
3.1. Вибір АЦП.....	50

					<i>ПК51 19 0000 000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Пояснювальна Записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Чемерис Д.О.</i>						
<i>Перевір.</i>								
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								ПБФ

3.2. Вибір мікроконтролера.....	52
3.3. Вибір дисплея.....	53
3.4 Всновки.....	54

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список умовних позначень

ПВ – Приймач випромінювання

ІЧ діапазон – інфрачервоний діапазон

LWIR – Long-wavelength infrared

SWIR – Short-wavelength infrared

MWIR – Midwave infrared

ОК – Об'єкт контролю

FPA – focal plane array

Вступ

Дипломний проект стпеню бакалавра є кінцевою роботою, за якою оцінюється успішність студента, після проходження навчання на здобуття обранної ним спеціальності. У дипломному проекті ступеню бакалавра розробляється прилад, проводиться розрахунок основних його елементів, а також висвітлюються теоретичні основи, на яких заснований принцип роботи даного приладу.

Темою дипломного проекту було обрано «Промисловий тепловізор». Промисловий тепловізор – це прилад для проведення неруйнівного контролю, що призначений для реєстрації та відображенні теплового випромінювання від нагрітих об’єктів. У дипломному проекті проводиться розрахунок приймача випромінювання – фоточутливого датчика, для обраного діапазону випромінювання. Також у дипломному проекті приводиться розрахунок оптичної системи об’єктива тепловізора для системи візуалізації.

У дипломному проекті виконується розробка схеми електричної принципової для тепловізора, основні елементи якої обрані згідно зі схемою функціональною, що описує принцип роботи приладу, та взаємозв’язок між елементами.

Метою дипломного проєкту є показати основні принципи розробки приладу, розкрити основні етапи розробки приладу. Також невід’ємною частиною розробки приладу є аналіз вже існуючих рішень.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						1
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ I. Теоретична частина

1.1. Інфрачервоний спектр випромінювання

Інфрачервоне випромінювання є частиною електромагнітного спектра випромінювання. Інфрачервоне випромінювання – це електромагнітне випромінювання на довжинах хвиль вище видимого спектра в межах приблизно від 1 мкм до 1000 мкм, цей спектр називається інфрачервоним спектром. На рис.1.1 показаний повний електромагнітний спектр світла з важливими спектральними областями. Інфрачервоний спектр поділяється на регіони, що мають назви

- Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR - Short-wavelength infrared), діапазон довжин хвиль такого випромінювання лежить в межах від 1 мкм - 3 мкм)
- Середній інфрачервоний (MWIR - Midwave Infrared) діапазон від 3 мкм до 6 мкм,
- Довгохвильовий інфрачервоний (LWIR – Long-wavelength infrared) діапазон лежить у межах від 6 мкм до 16 мкм
- Дальній інфрачервоний (FIR – Far infrared) діапазон – це електромагнітне випромінювання, що має довжину хвилі більше ніж 16 мкм.
-

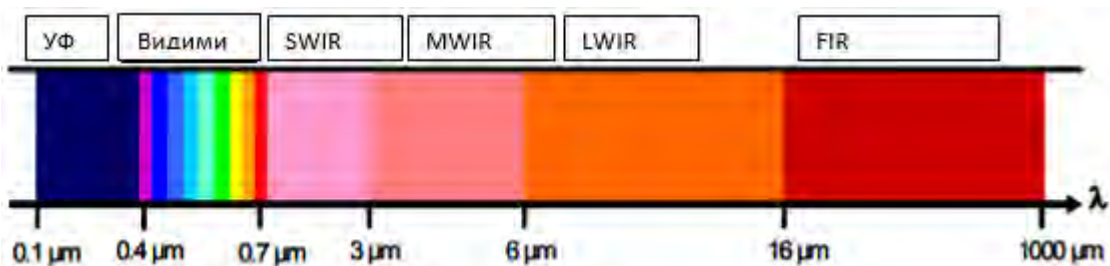


Рис. 1.1 Спектр електромагнітного випромінювання.

Нагріті тіла рідкої і твердої кондиції характеризуються безперервним розподілом випромінювання за спектром довжин хвиль з єдиним максимумом, положення якого залежить від температури джерела. Такі джерела називаються тепловими, а тіла ці зазвичай знаходяться в стані термодинамічної рівноваги.

Теплове випромінювання - це електромагнітне випромінювання, котре випромінюють нагріті тіла. Це випромінювання викликане наявністю внутрішньої енергії в нагрітому об'єкті. Це один з базових видів перенесення теплової енергії, окрім цього способу передавання теплової енергії відомо також про теплопровідність і конвекцію.

Теплове випромінювання, можна оцінити за деякими кількісними характеристиками, в основному використовуються такі поняття як енергетична світимість та спектральна щільність енергетичної світимості.

Енергетична світимість – це кількість енергії електромагнітного випромінювання, що випромінюється деякою ділянкою тіла, певної одиничної площі, у всьому діапазоні довжин хвиль та в усіх напрямках за одиницю часу.

$$M = \frac{E}{S \cdot t} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]. \quad (1.1)$$

Це рівняння є наслідком математичної моделі, але в реальності енергетична світимість залежить від багатьох факторів, параметрів об'єкта, що випромінює, температури тіла та довжини хвилі випромінювання, отже для коректної оцінки ці параметри треба враховувати, застосовуючи спектральну енергетичну світимість, що є енергетичною світимістю для заданих довжин хвиль $M_{\lambda T}$.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

Закон Кірхгофа – це закон що описує модель і властивості абсолютно чорного тіла (АЧТ). Для абсолютно чорного тіла справедливе твердження: теплове випромінювання є врівноваженим, тобто кількість енергії, що випромінюється тілом рівна енергії, яку це тіло поглинає.

Відношення випромінювальної здатності тіла до поглинальної здатності не залежить від його властивостей і завжди рівне випромінювальній здатності чорного тіла.

$$\frac{r_{\lambda T \text{ погл.}}}{r_{\lambda T \text{ випр.}}} = r_{\lambda T \text{ АЧТ}} = 1 \quad (1.2)$$

Абсолютно чорне тіло – ідеалізована модель тіла, що випромінює теплову енергію на всьому діапазоні хвиль, тобто це тіло має випромінювальну здатність $\varepsilon = 1$.

Теплове випромінювання створюється в процесі простого гармонійного коливання атомів дискретними квантами, енергія E яких є функцією частоти випромінювання ν : $E = h\nu$, де h - постійна Планка.

Інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла залежить від температури і частоти і визначається законом Планка:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{\frac{h \cdot \nu}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (1.3)$$

Де λ - довжина хвилі , ν - частота випромінювання, c - швидкість світла у вакуумі ($c = 2,9979 \cdot 10^8$ м / с), k - стала Больцмана $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ (Вт · с) / К, T – температура тіла, h – стала Планка.

Теплове випромінювання АЧТ описується законом Стефана-Больцмана, який можна отримати проінтегрувавши рівняння (1.3):

$$M_T = \int_0^\infty \varepsilon(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} * T^4 \quad (1.4)$$

$$M_T = \sigma * T^4 \quad (1.5)$$

Для сірого тіла

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
						4
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_T = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (1.6)$$

Продиференціювавши рівняння Планка (1.3), отримаємо закон зміщення Вина (щільність енергії випромінювання).

$$M_{e,\nu} = C_1 * \nu^3 * e^{-C_2\nu/T} \quad (1.6)$$

де ν - частота випромінювання; T - температура випромінюючого тіла; C_1, C_2 - константи. .

Для $\lambda \cdot T > 105$ (мкм · К) справедливе наближення Релея - Джинса:

$$M_{e,\nu} = 2 * C_1 * T / (C_2 * \lambda^4) \quad (1.7)$$

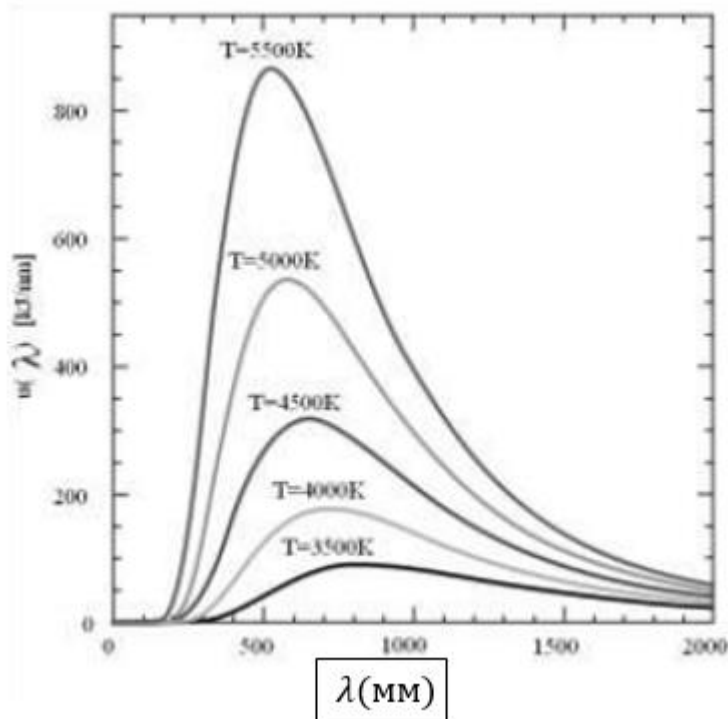


Рис. 1.2 - Залежність потужності випромінювання чорного тіла від довжини хвилі

Графіки функції Планка $M_{e,\nu}$ розраховуються для різних температур АЧТ і вони показують, що:

- для кожної температури максимум випромінювання має місце на певній довжині хвилі, яка зростає зі зменшенням температури;

- потужність випромінювання різко спадає зі зменшенням температури;

Вищевказані особливості теплового випромінювання тіл виражаються законом Вина. Закон Вина для довжини хвилі $\lambda_{\text{макс}}$, яка характеризується максимальним значенням функції Планка, має такий вигляд:

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{b}{T}; \quad (1.7)$$

де $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постійна Вина.



Рис. 1.3. Графіки, що показують залежність потужності випромінювання від довжини хвилі, розраховані експериментально, та за допомогою формул Релея-Джинса і Вина.

Формула планка найбільш достовірно відображає сутність процесів, пов'язаних із тепловим випромінюванням, так як за цим графіком можна визначити локальний максимум теплового випромінювання.



Рис. 1.4 Графік інтенсивності теплового випромінювання, побудований з використанням формули Планка.

Інфрачервоні детектори чутливі до певного діапазону довжин хвиль в електромагнітному спектрі. Вибір типу детектора і, отже, діапазону довжин хвиль, визначається характеристиками пропускання атмосфери і діапазоном температур об'єкта контролю.

Як відомо, атмосфера землі пропускає на весь діапазон випромінювання, випромінювання затримується та розсіюється в залежності від складу атмосфери. Різні речовини в повітрі можуть поглинати, розсіювати випромінювання певної довжини хвилі. Експериментальні дані показують наявність так званих вікон пропускання, це діапазони довжин хвиль, які нормально проходять крізь атмосферу. Діаграма пропускання на рівні 2 км над рівнем моря показує наявність вікон пропускання.

Цим обумовлені діапазони інфрачервоного випромінювання, в яких працюють сучасні детектори. Зазвичай використовуються спектральні вікна - діапазону 3 мкм - 5 мкм (MWIR) і 8 мкм - 14 мкм (LWIR), де втрати внаслідок атмосферного поглинання на незначних рівнях. Інфрачервоні детектори сконструйовані так, що їх спектральна чутливість охоплює принаймні одну з цих смуг.

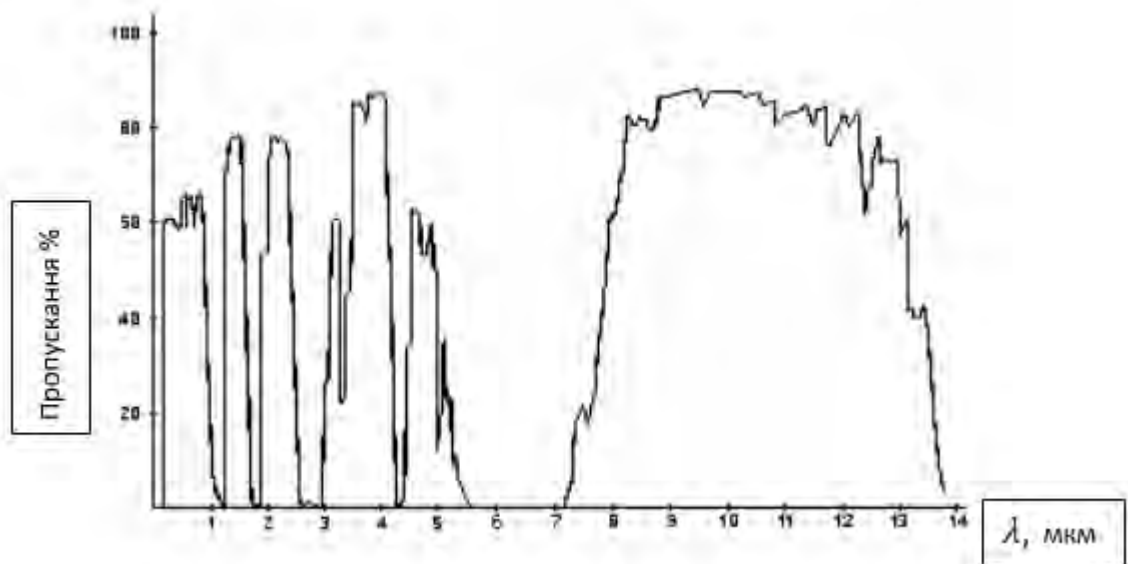


Рис. 1.5 Спектральні вікна пропускання інфрачервоного випромінювання

Вибір спектрального вікна для візуалізації також залежить від температурного діапазону об'єкта контролю, оскільки спектральний вміст інфрачервоного випромінювання, що випромінюється об'єктами, змінюється з температурою, і він задається в термінах виходу спектрального випромінювання.

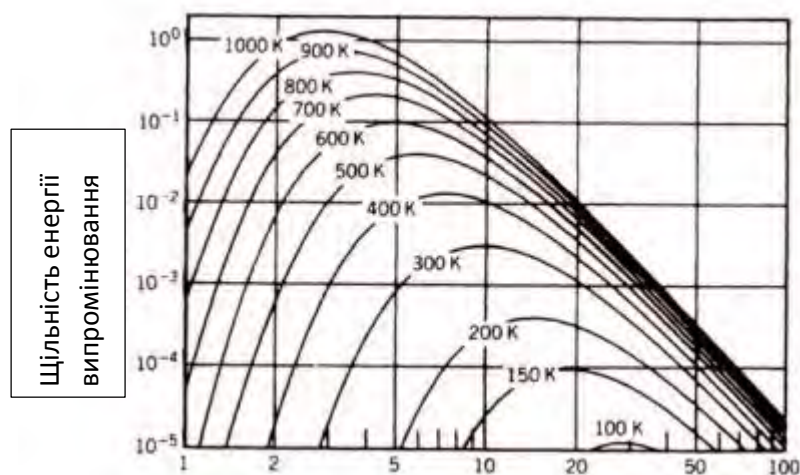


Рис. 1.6. Графік залежності щільності енергії випромінювання від довжини хвилі, розрахований для різних значень температури $T(K)$.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Отже, підбираючи діапазон хвиль випромінювання можна зосередити проведення теплового бачення для певних температур. Наприклад, для використання у ракетній техніці використовується SWIR діапазон, через високі температури, що притаманні цілям, на які наводиться зброя.

1.2. Принцип роботи тепловізора

Принцип роботи тепловізора заснований на перетворенні інтенсивності випромінювання інфрачервоного діапазону довжин хвиль у електричний сигнал, що формується приймачем інфрачервоного випромінювання.

Перетворення інфрачервоного випромінювання виконується завдяки зміні характеристик приймача випромінювання під дією цього випромінювання. Це може бути фотоефект, тобто надання електронам, що знаходяться у приймачі випромінювання, додаткової енергії від фотонів, що потрапляють на поверхню приймача. Також застосовується резистивний ефект, коли від температури приймача випромінювання, нагрітого під дією випромінювання, змінюється опір, що призводить до зміни напруги на приймачі випромінювання (ПВ).

Вихідним типом даних тепловізора є двохколірне, або кольорове зображення, кольори якого відповідають певним температурам об'єктів, зафіксованих на зображенні.

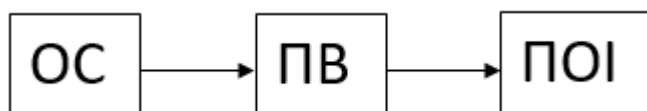


Рис. 1.7 Спрощена функціональна схема типового приладу для теплового бачення.

Отримане зображення, виходячи із чіткості, та точності отриманих значень температур, далі використовується для оцінки теплової картини. Тепловізори поділяють на споглядальні, та вимірювальні. Вимірювальні тепловізори відрізняються високою точністю визначення температури об'єктів.

Оптична система є невід'ємною частиною будь-якого тепловізора, так як вона слугує для фокусування власного теплового випромінювання від об'єктів, на чутливий до цього випромінювання датчик.

1.3. Історія теплобачення

Головним завданням тепловізора з початку появи перших таких приладів було побудова двовимірного зображення, що являє собою теплову картину власного випромінювання об'єктів, місцевості, фону, та якісне розрізнення цих температур. Інфрачервоне випромінювання невидиме для людського ока, тому тепловізор має слугувати перетворювачем інфрачервоного випромінювання у видиме зображення для подальшої його оцінки людиною, або для передачі даних на комп'ютер, для подальшої обробки..

Розробка приладів для теплового бачення розпочалась приблизно у 1960 – 1970 роки. З того часу розвиток тепловізійної техніки різко змінював вигляд цього приладу, так, що виник умовний поділ розроблених приладів на чотири покоління. Змінювалися габарити, принципи отримання двовимірного зображення, швидкість роботи, спектральна чутливість, використовувані технології.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

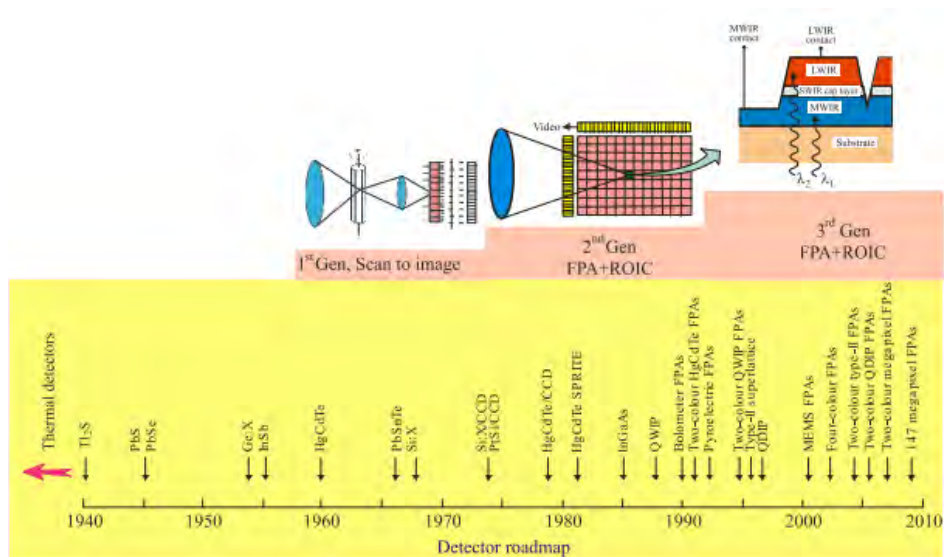


Рис. 1.8. Розвиток технологій для реєстрації теплового випромінювання

Можна виділити такі чотири основні етапи розвитку тепловізорів:

- нульове покоління являло собою пірметри, що могли зчитувати двовимірне зображення місцевості. Це було реалізовано за допомогою систем механічного та оптико механічного сканування, що працювали водночас та були синхронізовані. Ці тепловізори дозволяли будувати лінійні, розгортки зображення, а також двовимірні картини. Основним недоліком була швидкість, з якою тепловізор будував розгортку.
- перше покоління – в тепловізорах першого покоління вже використовувалися багатоелементні лінійні приймачі випромінювання, але побудова розгортки все ще здійснювалася за допомогою систем сканування.
- друге покоління – в основі лежить багатоелементний приймач випромінювання, що має розмірність $N \times N$ в пікселях. Ці приймачі здатні приймати одночасно двовимірне зображення та отримувати значення еквівалентне температурі об'єкта, для кожного пікселя. Такі пристрої потребують наявності схем зчитування інформації з детектора випромінювання, за допомогою яких отримується послідовно значення

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

кожного пікселя. Такий спосіб отримання інформації накладає деякі обмеження у швидкості роботи тепловізора.

- третє покоління – це тепловізори, що використовують у своїй роботі багатоелементні двовимірні фокально-площинні перетворювачі (FPA - Focal Plate Area). Відмінністю від тепловізорів другого покоління є те, що для зняття даних з детектора, та отримання зображення такі детектори виготовляються разом зі схемою зчитування (ROIC – Readout integrated circuit). Схема зчитування дозволяє набагато простіше знімати зображення з детектора, завдяки наявності вбудованого пристрою аналогово-цифрового перетворення, а також наявності певної архітектури для роботи з мікроконтролером.

1.4. Види теплові зорів

Отже, як видно з історії розвитку приладів для реєстрації теплового випромінювання виділяють дві основні парадигми побудови зображення:

- Сканування зображення. При цьому отримують точкове значення температури та записують у пам'ять, ти самим формують зображення. Швидкість побудови такого зображення прямо залежить від того, яка точність цього зображення.
- Проеціювання зображення. Миттєвий знімок теплової картини переводиться у двовимірне зображення, що відповідає так званій температурній картині. Іншими словами отримане зображення є відображенням процесу поширення теплового випромінювання в інфрачервоному спектрі довжин хвиль, переведене у видимий спектр.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

З 60-х років 20-го століття було розроблено багато різних систем для теплового бачення. Але поділ за принципом роботи залишився незмінним. Кожен тип тепловізора може представити широке різноманіття різних рішень, для тепловізорів.

1.4.1 Скануючі теплові зори

Поява скануючих систем дозволила у свій час отримати вперше двовимірні зображення, що давали вичерпну інформацію про температури об'єктів контролю. Головною їх особливістю, серцем таких приладів є дуже складна оптична система, що має в собі підсистему, призначену для сканування зображення.

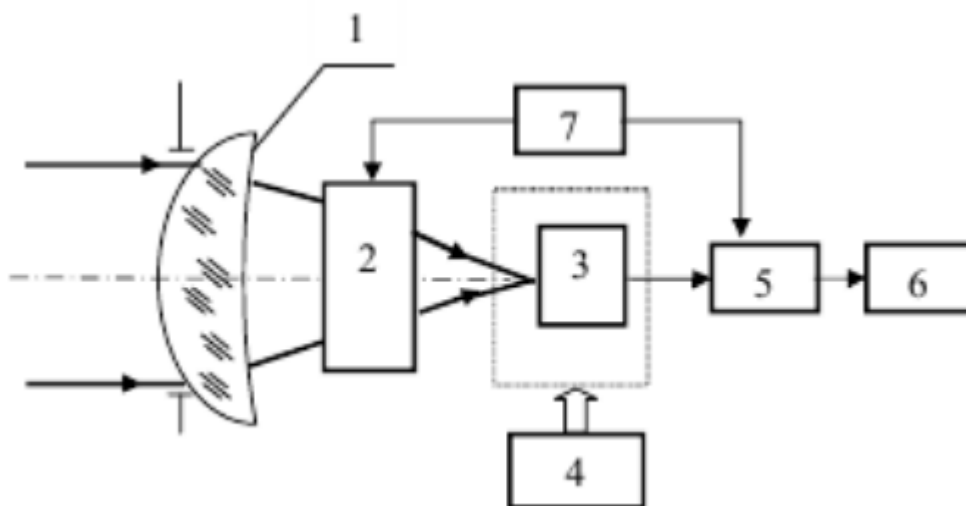


Рис.1.9. узагальнена функціональна схема скануючого тепловізора. 1 - оптична система; 2 - блок сканування; 3 - приймач випромінювання (ПВ); 4 - охолоджуюча система; 5 - електрична схема; 6 - пристрій виведення; 7 - пристрій синхронізації

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Слід розглянути основні методи сканування, що можуть застосовуватися у скануючих тепловізорах.



Рис. 1.10. - Методи сканування. Паралельне сканування, послідовне одноелементне, послідовне лінійне, паралельно послідовне матричним ПВ.

Окрім методів сканування тепловізори можуть відрізнятися по способу обробки сигналів а також їх представлення.

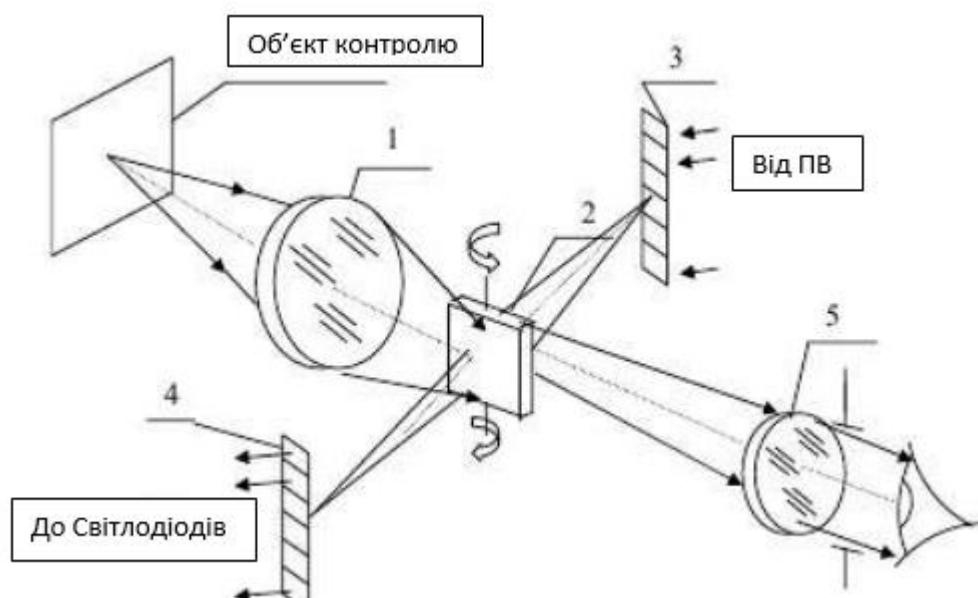


Рис. 1.11 - Тепловізор з паралельним скануванням зображення: 1 – оптична система; 2 – оптико-механічна скануюча система; 3 – лінійні світлодіоди; 4 - лінійний приймач випромінювання; 5 – окуляр.

Принцип роботи представленого тепловізора дуже простий. Випромінювання потрапляє на скануючу сисетму, яка перенаправляє його на елемент лінійного ПВ, знімаючи значення одного пікселя, після чого сигнал з інформацією про координати пікселя та інтенсивність випромінювання, подається на одновимірний масив світлодіодів, на якому загоряється

відповідний положенню сприйнятого пікселя, світлодіод, яскравість якого залежить від інтенсивності випромінювання, сприйнятого детектором. Ця система дозволяє проєціювати зображення на око людини, та відмальовувати кадр з достатньою швидкістю.

Але слід зауважити, що для реєстрації швидкоплинних процесів така система не підходить, але дуже добре може використовуватися для зняття теплових зображень статичних картин.

Н а сьогоднішній день Скануючі тепловізори поступаються матричним тепловізорам у швидкості, тому у більшості випадків вони не застосовуються, але для деяких особливих випадків, сканування може надати найбільш якісну картину. Наприклад можливо сканувати зображення широких кутів огляду, або навіть сканувати зображення всього навколишнього середовища. І при чому скануючі тепловізори мають більшу точність зображення, яка не обмежена якістю оптичної системи, такі тепловізори зазвичай обладнані простою оптичною системою, а задача сканування повністю перекладена на механічні засоби переміщення самого детектора у просторі.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.4.2 Матричні тепловізори

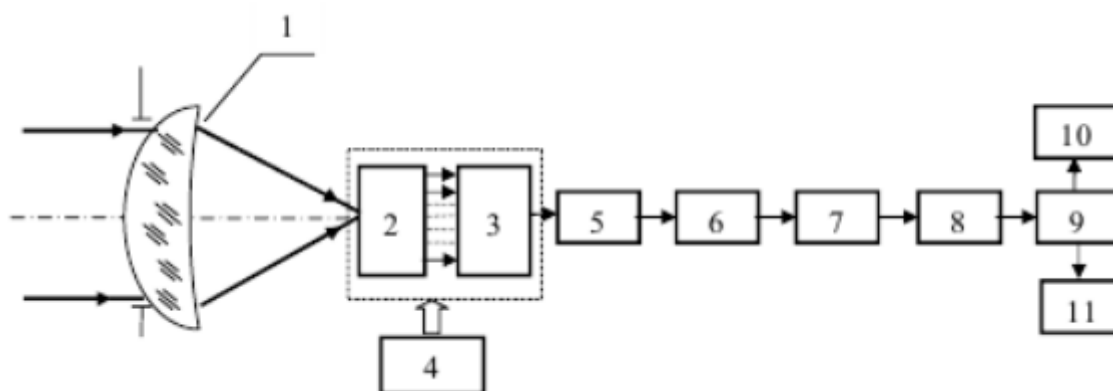


Рис.1.12. Узагальнена функціональна схема скануючого тепловізора. 1 - оптична система; 2 - FPA; 3 - мультиплексор; 4 – охолоджуючий пристрій (опціонально); 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор непрацюючих елементів; 9 – процесор-формувавч зображення; 10 - дисплей; 11 – інтерфейс для підключення зовнішніх пристроїв введення/виведення.

На сьогоднішній день матричні приймачі випромінювання виготовляються у вигляді блоків фокальних матриць, що включають в себе весь функціонал, пов'язаний з отриманням зображень та стабілізації роботи детектора, тобто включають систему охолодження, підсилювачі, мультиплексори, коректори неоднорідності характеристик а також чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач (ADC), блоки цифрової обробки і формування вихідних сигналів у вигляді коду. Сигнали з виходу такого перетворювача інфрачервоного випромінювання можуть подаватися на процесор, або мікроконтролер, для деяких маніпуляцій з зображенням, а також для подальшого виведення на дисплей. Загалом такі перетворювачі в однакових умовах використання виграють у скануючих систем теплого бачення. Матричні тепловізори більш універсальні, і знаходять застосування у багатьох ситуаціях від виробництва до використання у побуті.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1.5. Типи інфрачервоних матричних детекторів

Отже, для отримання зображення використовується матричний детектор, чутливий до інфрачервоного випромінювання. Існують різні типи інфрачервоних детекторів, найбільш інформативним є розподіл детекторів за матеріалом, із якого виготовлений детектор. Це пов'язано із процесом розробки таких приймачів, що здійснювався впродовж довгого часу. Через те, що ці пристрої засновані на роботі мікроскопічних елементів, то дуже важливим є хімічний склад, речовина, із якої виготовлено приймач. Але по технології всі види приймачів можна поділити на такі основні категорії:

- Охолоджувані;
- Неохолоджувані.

1.5.1 Охолоджувані детектори

В основному такі детектори засновуються на фотоефекті, кожного із чутливих елементів матриці приймача випромінювання. У таких детекторах фотони, що поглинаються чутливим елементом генерують вільні електронно-діркові пари у ньому, які потім збираються послідовно.

Фотонні інфрачервоні детектори мають високу чутливість в порівнянні з неохолоджуваними детекторами, що дозволяє отримувати чіткі зображення. Але такі матриці мають і ряд негативних факторів, що ускладнюють їх імплементацію у різних ситуаціях.

Перший недолік нескладно помітити, оглянувши діаграму смуг пропускання електромагнітного випромінювання інфрачервоного спектру приведену у параграфі 1 (Рис. 1.5). Цей недолік пов'язаний із тим, що такі детектори мають чутливість до короткохвильового, та середнього ІЧ

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

діапазону. Саме у цих межах можна спостерігати неоднорідність коефіцієнта пропускання атмосферою інфрачервоного випромінювання. Це говорить про високу чутливість таких детекторів до погодних умов.

Ще однією проблемою таких детекторів є те, що зі збільшенням температури в них також генеруються термічно індуковані пари електронів. Це викликає появу шуму при визначенні температури, так як похибку до вимірювання вносить температура самого детектора. Саме тому такі детектори потребують охолодження. Їх використання у дальньому ІЧ діапазоні можливе тільки при охолодженні їх до температур нижче ніж 77 К.

Для їх охолодження використовуються спеціальні і дорогі охолоджувачі, що призводить до збільшення розмірів і насамперед вартості інфрачервоних камер. Зазвичай використовуються охолоджувані детектори виготовляються з використанням антимоніду індію (InSb), телуриду кадмію ртуті (HgCdTe або МСТ) або технологій Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP).

Такі детектори використовуються у випадках, коли є можливість максимально зменшити дію негативних факторів, наприклад військовій справі, астрономії, або медицині, де продуктивність є основною проблемою.

1.5.2. Теплові (неохолоджувані) інфрачервоні детектори

Теплові інфрачервоні детектори вже більш близькі до суті проблеми, так як основним фактором, що впливає на показання датчика є температура окремого елемента, яка залежить від інтенсивності випромінювання.

Зміна температури кожного елемента вимірюється спеціальною електросхемою, зазвичай інтегрованою у датчик.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Теплові або неохолоджувані інфрачервоні детектори відчують зміну електричного параметра після зміни температури пристрою, пов'язаного з кількістю поглиненої інфрачервоної енергії. Таким чином, механізм теплового виявлення є непрямим способом інфрачервоного виявлення, і час відгуку цих детекторів більше, ніж у фотонних детекторів. У більшості випадків відношення сигнал / шум і відображальна здатність неохолоджуваних теплових детекторів нижче, ніж у охолоджених фотонних детекторів. Тому продуктивність теплових детекторів нижче, ніж охолоджених фотонних детекторів.

Виготовлення матриць теплових детекторів набагато простіше ніж виготовлення охолоджуваних фотонних. Вирішення проблем чіткості зображення, відношення сигнал/шум цілком можливе шляхом оптимізації конструкції такого детектора. Враховуючи ці фактори, хоча охолоджувані матриці детекторів все ще забезпечують кращу продуктивність, різниця в продуктивності між тепловими та охолодженими фотонними детекторами стає меншою, ніж очікується, лише порівнявши їх на піксельній основі.

Найважливішою перевагою теплових детекторів є те, що вони можуть працювати при температурах 0-40 °С, не вимагаючи використання обладнання для охолодження. Отже, інфрачервоні детектори, що використовують технологію неохолоджуваного детектора, мають набагато менший розмір, меншу вартість, низьке енергоспоживання і тривалість роботи. Завдяки цим перевагам неохолоджувані детектори використовуються в багатьох військових і комерційних справах, наприклад для приладів нічного бачення, виявлення рудників, покращення видимості для водія вночі, знаходження осередків пожеж, а також у промисловості.

Враховуючи розвиток охолодженої технології, охолоджувані фотонні детектори можуть знайти області застосування в більш складних і дорогих інфрачервоних зображеннях, що вимагають відносно більш високих

характеристик, можливо, з новими функціями, такими як багатоспектральна інфрачервоне бачення, що досягається за допомогою технології QWIP .

1.5.3. Типи теплових інфрачервоних детекторів

В основному використовують чотири основні технології теплових неохолоджуваних детекторів:

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

Ці типи детекторів найбільш поширені для тепловізійної техніки.

1.5.4. Резистивні мікроболометричні детектори

Резистивні мікроболометри Одним з найбільш відомих підходів до неохолоджуваного інфрачервоного формування зображень є використання резистивних мікроболометрів, реалізованих на основі використання поверхневих мікромашинних мостів на КМОП пластинах. На Рис. 1.13. показаний спрощений вид в перспективі мікроболометричної структури, отриманої з використанням методик поверхневої мікрообробки. Інфрачервоне випромінювання підвищує температуру матеріалу на термічно ізольованому і підвішеному мосту, викликаючи зміну його опору.



Рис. 1.13. Мікроболометр, 1 піксель матричного мікроболометричного FPA

Продуктивність резистивних мікроболометрів залежить як від температурно-чутливого шару, так і від його теплової ізоляції та якості схеми зчитування (ROIC).

Метод поверхневої мікрообробки дозволяє наносити термочутливі шари з дуже малою товщиною, дуже малою масою і дуже хорошою тепловою ізоляцією поверх мостів над зчитувальними мікросхемами. З видаленням шарів між конструкціями мостів і схемою зчитування отримують підвісні і термічно ізольовані конструкції детекторів.

Мікроболометричні матриці виготовляють з використанням окиду ванадію (VO_x), аморфного кремнію ($a-Si$), оксиду міді барію ітрію ($YBaCuO$), полікристалічних сполук кремній-германій ($poly SiGe$). Основним недоліком VO_x є те, що він не сумісний з лінією CMOS, і вимагає окремої лінії виготовлення після процесу CMOS, щоб запобігти забрудненню лінії CMOS. Крім того, VO_x демонструє великі значення шуму, що обмежує його продуктивність. Хоча $a-Si$ і полі $SiGe$ сумісні з CMOS, вони вимагають високотемпературного відпалу для досягнення стабільності мікроструктур, що ускладнює інтеграцію моноліту CMOS. Крім того, як $a-Si$, так і полі $SiGe$ мають високий шум $1/f$ завдяки їх некристалічним структурам, як VO_x .

Осадження $YBaCuO$ виконується при кімнатній температурі, однак виготовлення цих детекторів все ще вимагає складних процесів обробки поверхні мікросхеми після CMOS, як і вищевказані матеріали. З іншого боку, метали є сумісними з CMOS, і їх виготовлення не вимагає будь-яких високотемпературних етапів процесу. Однак металеві мікроболометри мають низьку продуктивність внаслідок низького значення TCR металевих плівок. В цілому, у всіх мікроболометрах мікромашини поверхні, існує потреба в критичних відкладеннях і етапах літографії після CMOS, що обмежує їх зниження витрат. У неохолоджуваних мікроболометрах особливу увагу слід приділяти електроніці зчитування, оскільки вона може визначити остаточну загальну продуктивність детектора. Зміна опору детектора, отже, падаюче інфрачервоне випромінювання, може бути виміряно за допомогою простої мостової схеми.

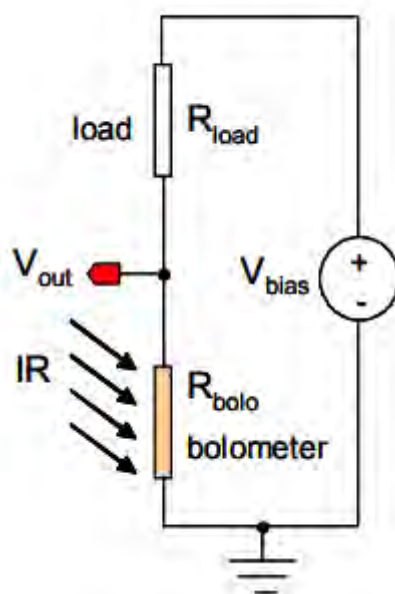


Рис. 1.14. Еквівалентна електрична схема мікроболометра.

Опір змін мікроболометрів пов'язане з його значенням TCR і зміною температури за рахунок поглиненого інфрачервоного випромінювання. Зміна

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

опору детектора призведе до зміни вихідної напруги напівмосту, з якого можна виміряти падаюче інфрачервоне випромінювання.

Вихідна напруга напівмостової схеми задається як

$$V_{out} = V_{bias} \left(1 - \frac{R_{load}}{R_{bolo}(1+\alpha\Delta T)+R_{load}} \right) \quad (1.8)$$

де, V_{bias} - напруга зсуву, R_{bolo} і R_{load} - мікроболометр і опір навантаження при заданій робочій температурі, α – температурний коефіцієнт опору резистора мікроболометра, і ΔT - підвищення температури пікселя мікроболометра за рахунок поглиненого інфрачервоного випромінювання.

1.5.5. Піроелектричні та сегнетоелектричні детектори

Існують деякі матеріали, які демонструють перехідну електричну поляризацію при швидкій зміні їх температур. Цей ефект називається піроелектричним ефектом, а детектори, які використовують цю особливість, називаються піроелектричними детекторами. Індукована температурою поляризація призводить до утворення поверхневих зарядів на протилежних плитах матеріалу, що генерує струм детектора, заданий як

$$i_d = pA \frac{dT}{dt} \quad (1.9)$$

де, p - піроелектричний коефіцієнт, A - площа електрода, dT - підвищення температури детектора, t – одиниця часу, за яке відбулося підвищення температури. Зазначене рівняння зазначає, що генерований струм детектора дорівнює нулю, коли детектор збуджується при постійному струмі, оскільки індукована поляризація зникає в часі через внутрішній потік заряду через матеріал. Отже, піроелектричні детектори не можуть використовуватися в режимі очікування, а вхідна інфрачервона енергія повинна бути модульована до виявлення.

Після модуляції з'явиться змінний струм, амплітуда якого може бути виміряна і використовується для визначення рівня падаючого інфрачервоного випромінювання.

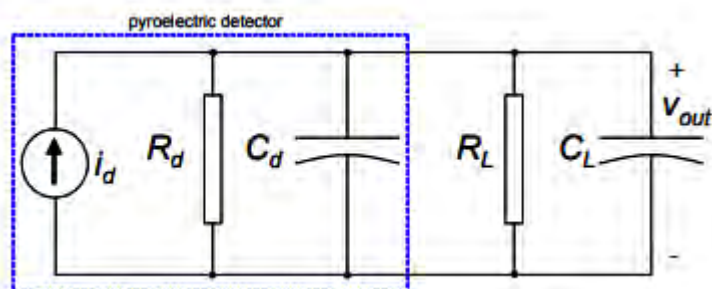


Рис. 1.15. Еквівалентна електрична схема піроелектричного елемента.

Піроелектричний ефект зникає вище певної температури, унікальної для кожного матеріалу, яка відома як температура Кюрі. Крім того, вигідно використовувати піроелектричні детектори трохи нижче температури Кюрі завдяки поліпшеній реактивності. Температуру Кюрі можна регулювати, щоб бути навколо температури 15 кімнатної температури, регулюючи композиції матеріалу, щонайменше, для композиційних матеріалів, таких як титанат стронцію барію ($Ba_{1-x}Sr_x TiO_3$ або BSTO).

Сегнетоелектричний ефект - це поліпшена версія електричного поля піроелектричного ефекту, де напруга зміщення використовується для встановлення внутрішнього електричного поля всередині матеріалу детектора, що в свою чергу підвищує чутливість пристрою. На відміну від піроелектричних матеріалів, температура Кюрі цих матеріалів значно перевищує кімнатну температуру, і вони не вимагають ніякого стабілізатора температури. Монолітно інтегровані FPA використовують сегнетоелектричні матеріали і тому не вимагають ніяких стабілізаторів температури. Окрім необхідної схеми зсуву, для сегнетоелектричних мікроболометрів може

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

використовуватися та ж схема зчитування, що використовується для піроелектричних мікроболометрів.

В даний час існують 1240×680 неохолоджені піроелектричні детектори, що мають розмір пікселя менше 10 мкм, які пов'язані з схемою зчитування, забезпечуючи значення NETD 60 мК.

1.5.6. Термоелектричні детектори

Термоелектричні детектори формуються з використанням термопар, принцип роботи яких ґрунтується на ефекті Зеєбека. На рис. 5.6.1. показана схема термопари. Коли два різних матеріали А і В з'єднані і нагріті на одному кінці, тоді буде різниця потенціалів між двома іншими кінцями конструкцій в залежності від різниці їх коефіцієнтів і різниці температур між гарячим і холодним кінцями. Сформована напруга досить стабільна.

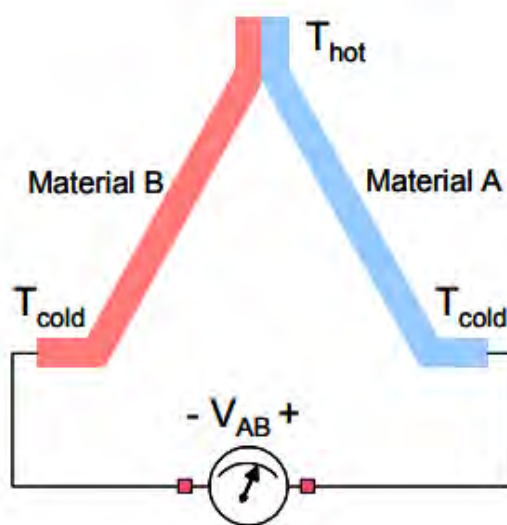


Рис. 1.16. Еквівалентна електрична схема термопари.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Вихідна напруга термопари:

$$V_{AB} = (\alpha_A - \alpha_B)\Delta T_{hc} \quad (1.10)$$

де, α_A і α_B - коефіцієнти Зеєбека двох різних матеріалів, а ΔT_{hc} - різниця температур між гарячими і холодними спайками. Вихідна напруга однієї термопари зазвичай недостатня; тому для інфрачервоного детектування використовують ряд послідовно з'єднаних термопар.

Ця структура називається термобатаресю, яка може бути побудована з використанням металів або напівпровідників. Оскільки коефіцієнти Зеєбека напівпровідників більші порівняно з коефіцієнтами металів, то напівпровідникові термобатарей є більш чутливими порівняно з металевими аналогами. Як і будь-який тепловий детектор, термобатарей реалізовані на термічно ізольованих структурах. Внаслідок вимоги багатьох послідовно з'єднаних термопарних конструкцій розмір детектора не може бути зменшений нижче певного розміру, і тому число пікселів в можливому масиві фокальної площини не може бути збільшено, як у випадку мікроболометрів. Неохолоджувані інфрачервоні детектори, реалізовані з термобатарей, не потребують стабілізаторів температури через властиву їм диференційну роботу між гарячими і холодними спайками. Однак градієнт температури в масиві термобатарей може викликати значні зміщення; тому просторову зміну температури масиву необхідно звести до мінімуму шляхом ретельного моделювання масиву. В одній заявці було повідомлено, що тепло, що генерується на передпідсилювачах на чіпі, викликає помітне зміщення у виходах термобатарей. Крім того, чутливість термобатарей дуже низька, і розміри пікселів в цих пристроях великі, такі як $250 \text{ мкм} \times 250 \text{ мкм}$, що обмежує їх використання для масивів детекторів великого формату.

1.5.7. Мікроболометри діодного типу

Мікроболометричні детектори типу діода використовують зміну напруги діодного струму або діода з температурою пікселя в залежності від їхніх методів зміщення.

На Рис. 1.17. показана проста схема зчитування, що використовується для мікроболометрів типу діода. Діодний мікроболометр зміщений при постійному струмі (I_{bias}), і зміна напруги детектора через падаючого інфрачервоного випромінювання вимірюється по відношенню до опорної напруги (V_{ref}). Вихідна напруга (V_{out}) задається як

$$V_{out} = V_{ref} - (V_{D0} + \alpha_D \Delta T) \quad (1.11)$$

де V_{ref} - опорна напруга, V_{D0} - напруга детектора при заданому струмі зміщення, α_D - температурний коефіцієнт прямої напруги діода на заданому рівні зсуву, а ΔT - зміна температури детектора внаслідок поглиненого ІЧ-випромінювання.

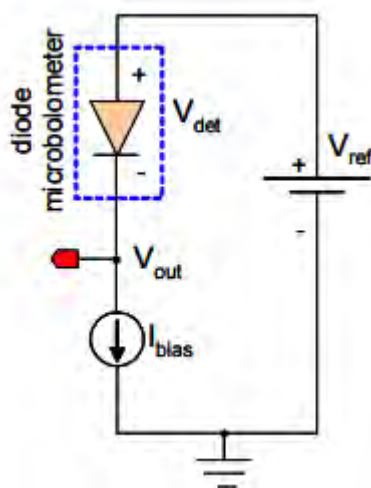


Рис. 1.17. Еквівалентна електрична схема діодного мікроболометра

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

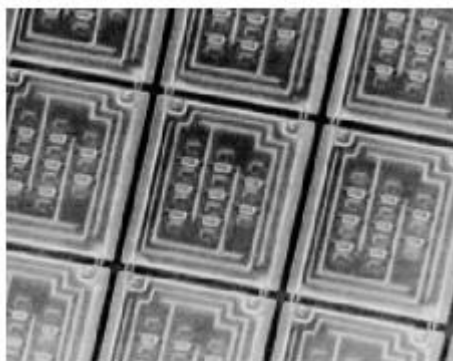


Рис. 1.18. Вид мікроболометричної матриці під мікроскопом

Виготовлення таких діодів потребує додержання певної технології, Оскільки ці детектори не можуть бути реалізовані в стандартному процесі CMOS, їх використання для теплобачення викликає збільшення витрат на використання таких детекторів. Для ультра-недорогих додатків найкращим підходом буде реалізація матриць детектора разом з їх схемою зчитування.

Дослідження на неохолоджуваних інфрачервоних детекторів почалися в кінці 20-го століття. У перших недорогих детекторів розмір пікселя становив $80 \text{ мкм} \times 80 \text{ мкм}$. виготовлення.

1.3. Висновок

1.4.

Розглянувши існуючі методи отримання теплових зображень, можна зробити висновок, що на даний момент для промислового тепловізора необхідно обирати недорогий детектор, але досить точний.

У використанні промисловий тепловізор має бути зручним і компактним, тобто необхідно якомога зменшити його розміри. Отже, використання охолоджуваних матриць буде не вигідним рішенням.

Для промислового тепловізора доцільне використання неохолоджуваних матричних детекторів на основі мікроболометрів. Компанії виробники пов'язані з виробництвом тепловізійної техніки можуть представити широкий спектр датчиків, які можна застосувати для тих чи інших задач. Підібрати детектор можна за чутливістю, розмірністю і навіть технологічним процесом (розміром мікроелементів матриці).

По роздільній здатності детектори розділяють на основні групи із стандартизованою роздільною здатністю:

- QQVGA (160x120)
- QVGA (320x240)
- VGA (640x480)
- XGA (1024x768)

Для випадку промислового тепловізора не є необхідним використання детекторів з високою роздільною здатністю, особливо якщо оптична система змодельована для роботи з малим кутом огляду. Отже, можна обрати детектор з досить невисокою роздільною здатністю – 160 – 120 пікселів.

На сьогоднішній день можна обрати детектори за розміром пікселя. Чим менший розмір пікселя тепловізора, тим більша може бути точність виміру, але це також веде за собою ряд проблем, наприклад ускладнення оптичної системи, яку необхідно застосувати до такого приймача випромінювання, що може відобразитися на кінцевій вартості та складності виробництва такого приладу. На сьогодні одні з останніх розробок дозволяють використовувати приймачі із розміром пікселя від 25 до 10 мкм.

Для того, щоб зібрати досить економічний пристрій можна застосувати у якості приймача фокальну матрицю із розміром пікселя 17 мкм.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

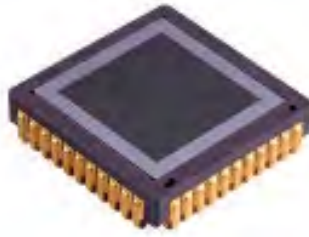


Рис. 1.19. QQVGA ULIS PICO160 Gen 2 мікроболометричний детектор інфрачервоного випромінювання

В якості такої матриці для дипломного проекту можна обрати матрицю виробника ULIS, модель PICO160.

Цей детектор має низьке споживання енергії, високу швидкість роботи, малі розміри, і відповідає обраному діапазону довжин хвил ь 8-14 мкм.

Як приклад можна привести приклад зображення, яке можна отримати за допомогою схожих датчиків з роздільною здатністю QQVGA

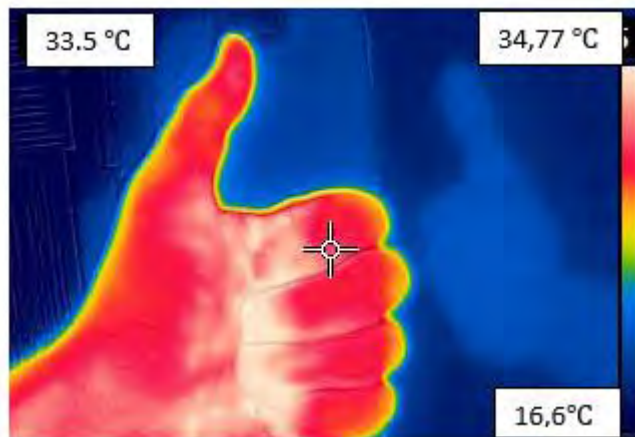


Рис. 1.20. Зображення, отримане за допомогою інфрачервоного детектора з розширенням QQVGA

II Розділ Розрахункова частина

2.1. Розрахунок об'єктива тепловізора

Однією з найважливіших частин будь-якого приладу для реєстрації електромагнітного випромінювання є оптична система. Для тепловізорів проектують такі оптичні системи, що мають працювати лише в заданому діапазоні довжин хвиль. Для промислового тепловізора, що працює у діапазоні 8-14 (LWIR) потрібно спроектувати відповідну заданому діапазону оптичну систему.

Однією з умов проектування оптичної системи для тепловізора є досягнення компактності цієї системи. Доцільно, щоб довжина цього приладу не перевищувала 150 мм. Тепловізор – це оптико-електронний пристрій, що перетворює випромінювання LWIR діапазону хвиль у видимий спектр. У зв'язку з технічним завданням необхідно досягнути наступних характеристик оптичної системи тепловізора:

Табл.2.1 Характеристики оптичної системи

Фокусна відстань f' , мм	70
Кут поля зору 2ω , град	5
Відносний отвір D/f'	$>1/2$
Спектральний діапазон, мкм	8...14
Загальна довжина оптичної системи L_{oc} , мм	<100
Мінімальна різниця температур, що може бути виявлена $\Delta T, K$	0.25
Дальність виявлення, мм	>500
Приймач випромінювання	ULIS PICO 160 Gen 2 160x120 з розміром пікселя 17 мкм

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.1.1. Побудова оптичної системи

З огляду на те, що тепловізор повинен бути використаний в умовах виробництва, необхідно спочатку потурбуватися про захист оптичної системи від механічних пошкоджень. Тому перед основним блоком оптичної системи потрібно встановити захисну плоско-паралельну пластинку.

Після захисного скла вже будуть розміщені лінзи для фокусування корисного світлового потоку на площу приймача випромінювання. Оптична система буде складатися із лінз типу меніск.

Перша пара лінз складається із лінзи з позитивним значенням радіуса кривизни та лінзи з від'ємним значенням радіуса кривизни.

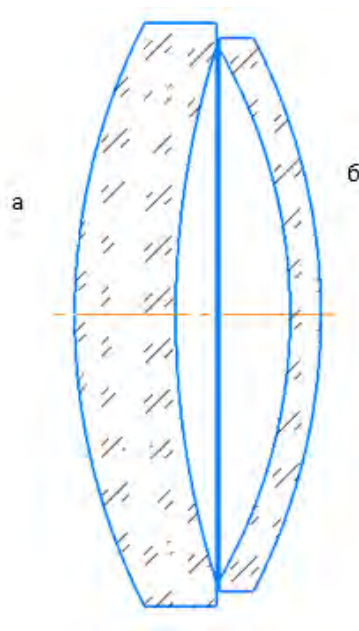


Рис. 2.2. Пара лінз, а – позитивна, б – негативна

Ця група лінз забезпечує збирання, та фокусування випромінювання на наступній оптичній поверхні.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК51.19.00.00.000 ПЗ

Аркуш

32

Після того, як випромінювання фокусується першою групою лінз, воно поступає на наступну групу лінз, що слугує для фокусування випромінювання на детекторі інфрачервоного випромінювання.

Друга група лінз складається з двох позитивних лінз типу меніск:

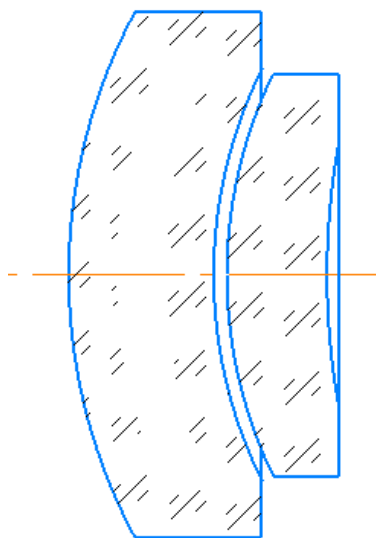


Рис. 2.3. Друга група фокуруючих лінз.

Важливим, особливо для інфрачервоного діапазону, є матеріал, з якого виготовлені лінзи. Головною вимогою до оптичних матеріалів лінз є те, що вони мають пропускати випромінювання довжин хвиль у діапазоні, що покриває діапазон довжин хвиль, до яких чутливий детектор випромінювання.

Для роботи у дальньому інфрачервоному діапазоні LWIR знадобляться відповідні матеріали для цього діапазону. Дослідивши всі можливі варіанти можна прийти до висновку, що найбільш доцільним буде використання таких оптичних матеріалів як германій (Ge), цинк-сульфід (ZnS), цинк-селенеід

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

(ZnSe), так як вони мають високу пропускну здатність на потрібних довжинах хвиль, а саме:

- Ge – 2 ...15 мкм;
- ZnS – 1...14 мкм;
- ZnSe -1... 22 мкм;

При чому, як видно з діаграми на Рис. 2.4., оптичні матеріали на основі цинку мають значно більшу пропускну здатність для хвиль у діапазоні, що сприймає детектор. Це говорить про те, що теоретично такі матеріали є кращим вибором, для тепловізійної техніки. Але в реальності такі оптичні матеріали дуже дорогі та складні для їх виробництва, тому включення такого матеріалу, може значно підвищити ціну виготовлення промислового тепловізора, що виготовляється. Задача дипломного проекту - це проектування швидкодіючого і економічного тепловізійного обладнання.

Саме тому доцільно буде обрати матеріал, що використовується для оптичних систем тепловізорів у більшості випадків – германій.

Плоску пластину, що слугує захисним склом тепловізора також можна виготовити із германію.

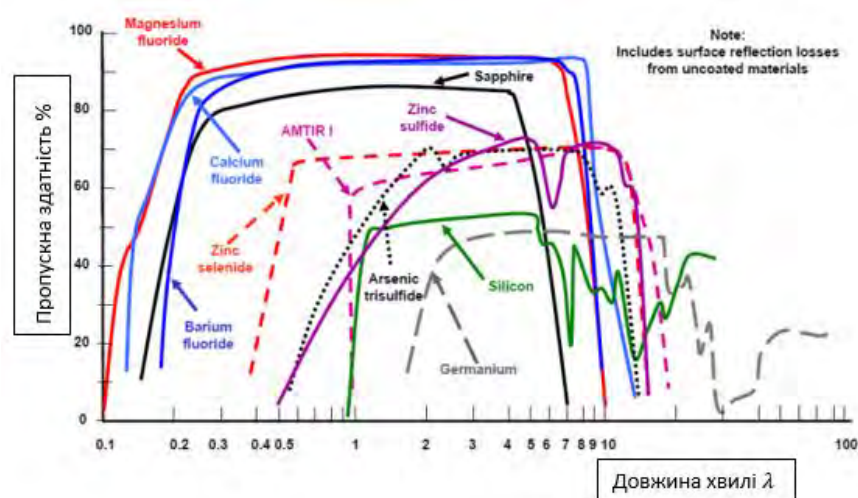


Рис. 2.4. Пропускна здатність матеріалів для інфрачервоного випромінювання.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Моделювання оптичної системи виконується у спеціальному САПР для оптики ZEMAX. Ця програма надає можливість моделювати оптичні системи будь-якої складності, та оцінювати якість змодельованої системи. Отже в програмі ZEMAX створено оптичну систему, параметри якої наведено у табл. 1.2.

Табл. 2.2. Параметри оптичної системи, змодельованої в програмі Zemax.

Номер оптичної поверхні	Радіус кривизни (мм)	Світловий діаметр (мм)	Відстань по оптичній вісі (мм)
1	-	40	2
2	-	40	4
3	45	40	7
4	62	36	8
5	-37	36	2
6	-42	38	15
7	28	26	7
8	24	20	1
9	24	20	5
10	38	16	4

Основними критеріями оцінки якості зображаючої системи, побудованої у програмі є:

- Освітленість приймача випромінювання;
- Модуляційно передаточна функція (МПФ);
- Функція концентрації енергії (ФКЕ);
- Діаграми кружків розсіювання.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Всі ці параметри оптичної системи можливо розрахувати та оптимізувати до оптимального рівня, отримавши при цьому оптичну систему здатну створювати якісне зображення.

Освітленість ПВ.

Освітленість показує те, розмір площадки у якій фокусується зображення на поверхні ПВ, а також кількість випромінювання у цій ділянці. Це можна розрахувати, використовуючи вбудовані функції програми Zemax, такі як «Illumination», «Illumination XY scan» та «Illumination 2D Surface». Найбільш інформативним у даному випадку є функція «Illumination XY scan». Вона показує значення кількості випромінювання у полі приймача випромінювання.

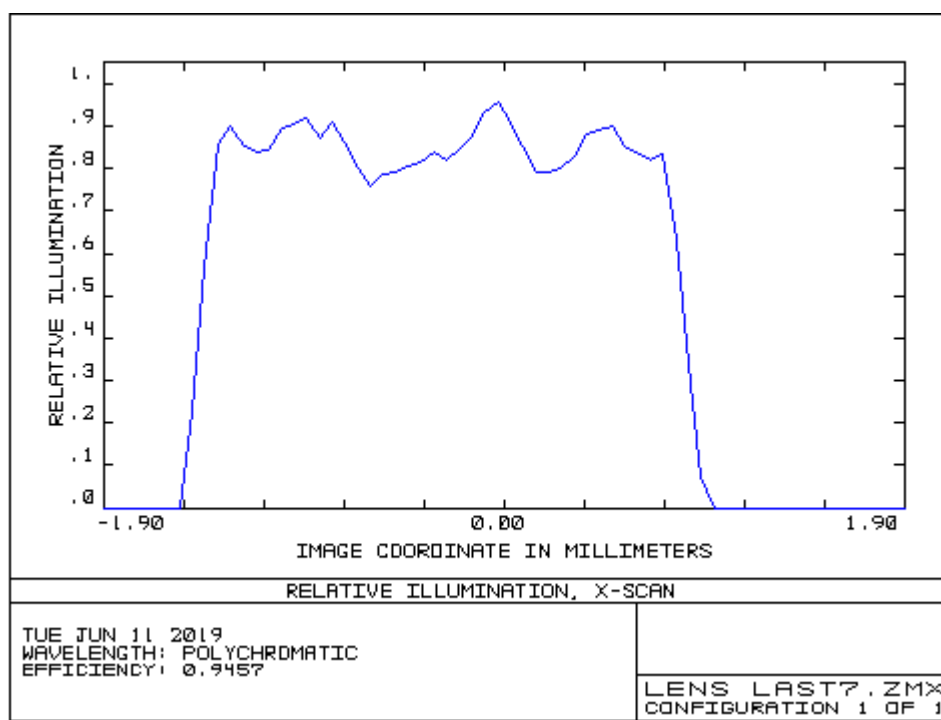


Рис. 2.5. Освітленість ПВ.

Отримані розрахунки свідчать про те, що все випромінювання фокусується на приймачі випромінювання.

Модуляційно передаточна функція (МПФ)

Ця функція відображає просторово-частотні властивості оптичної системи, характеризує рівень контрасту. Також ця функція характеризує передачу структури об'єкта як функцію просторових частот. Тобто ця функція показує здатність чітко відображати об'єкти, що розташовані з певною просторовою частотою, наприклад це можуть бути лінії, розташовані з певним інтервалом, що і є просторовою частотою.

Для відображення конкретних значень МПФ для обраного ПВ необхідно розрахувати просторову частоту найквіста

$$\mu_H = \frac{1}{2q}, [\text{мм}^{-1}]$$

(2.1)

Де q – розмір пікселя ПВ.

Для обраного ПВ $\mu_H = 29.41 \text{ мм}^{-1}$

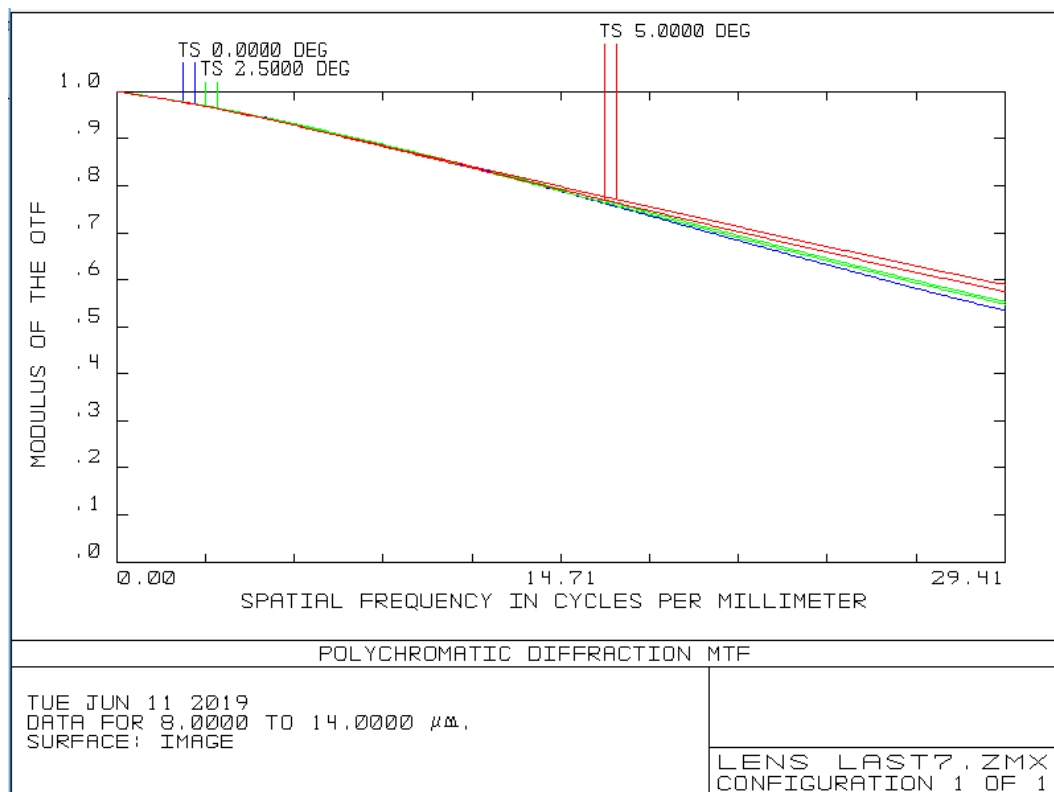


Рис. 2.6. Модуляційно передаточна функція

Для оптичних зображальних систем достатнім є значення МПФ вище 50%

Функція концентрації енергії

Для цього використаємо вбудовану функцію «Encircled Energy», вона показує рівень концентрації енергії у кружку розсіювання.

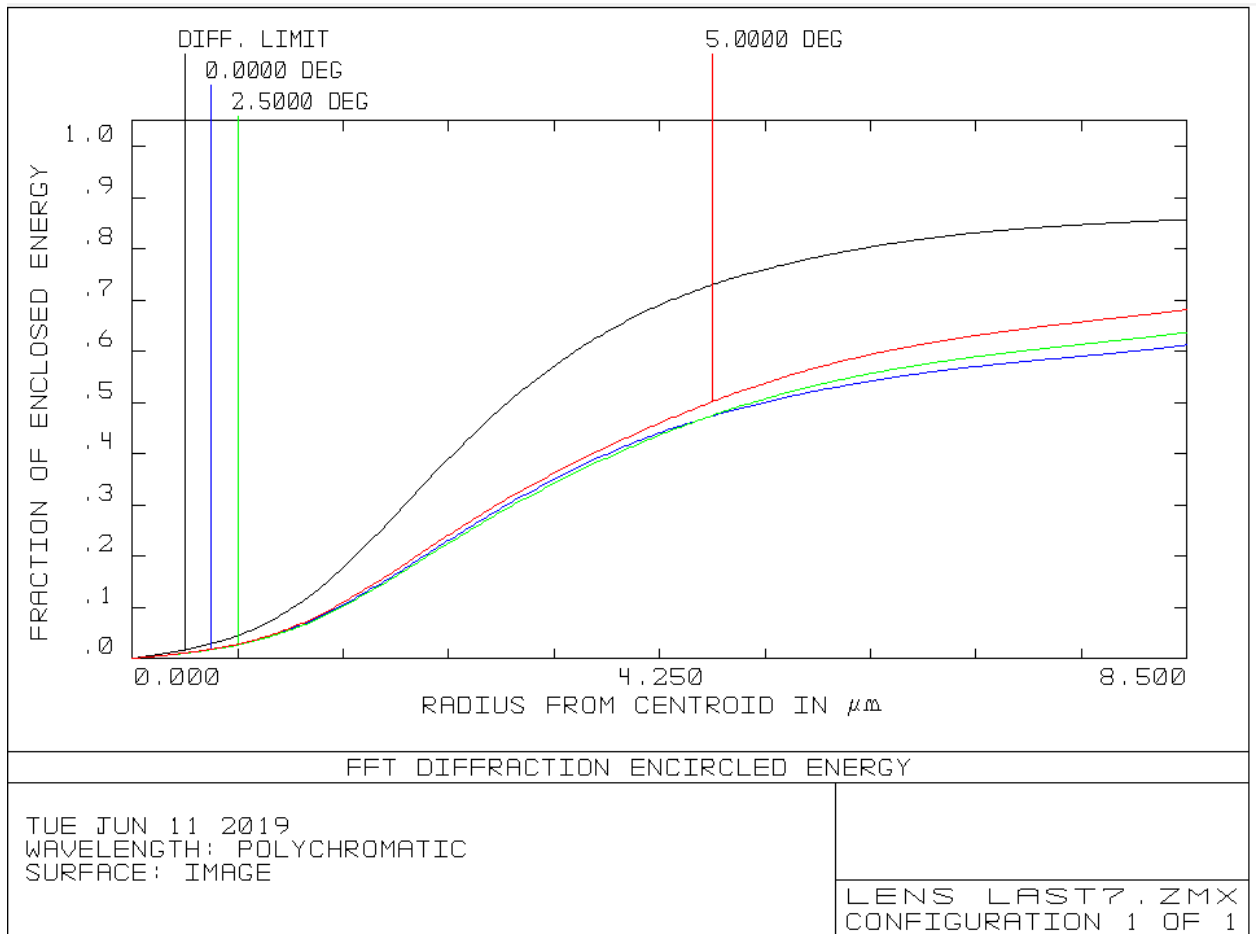


Рис. 2.7. Функція концентрації енергії

З отриманої діаграми видно, що рівень концентрації також задовільний для даної оптичної системи.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Корисне випромінювання фокусується на поверхні ПВ у вигляді кружків розсіювання. Різні довжини хвиль та кути входження впливають на те, як випромінювання проходить крізь оптичну систему, тому важливо побачити кружки розсіювання для різних параметрів для того, щоб оцінити можливі аберації у системі.

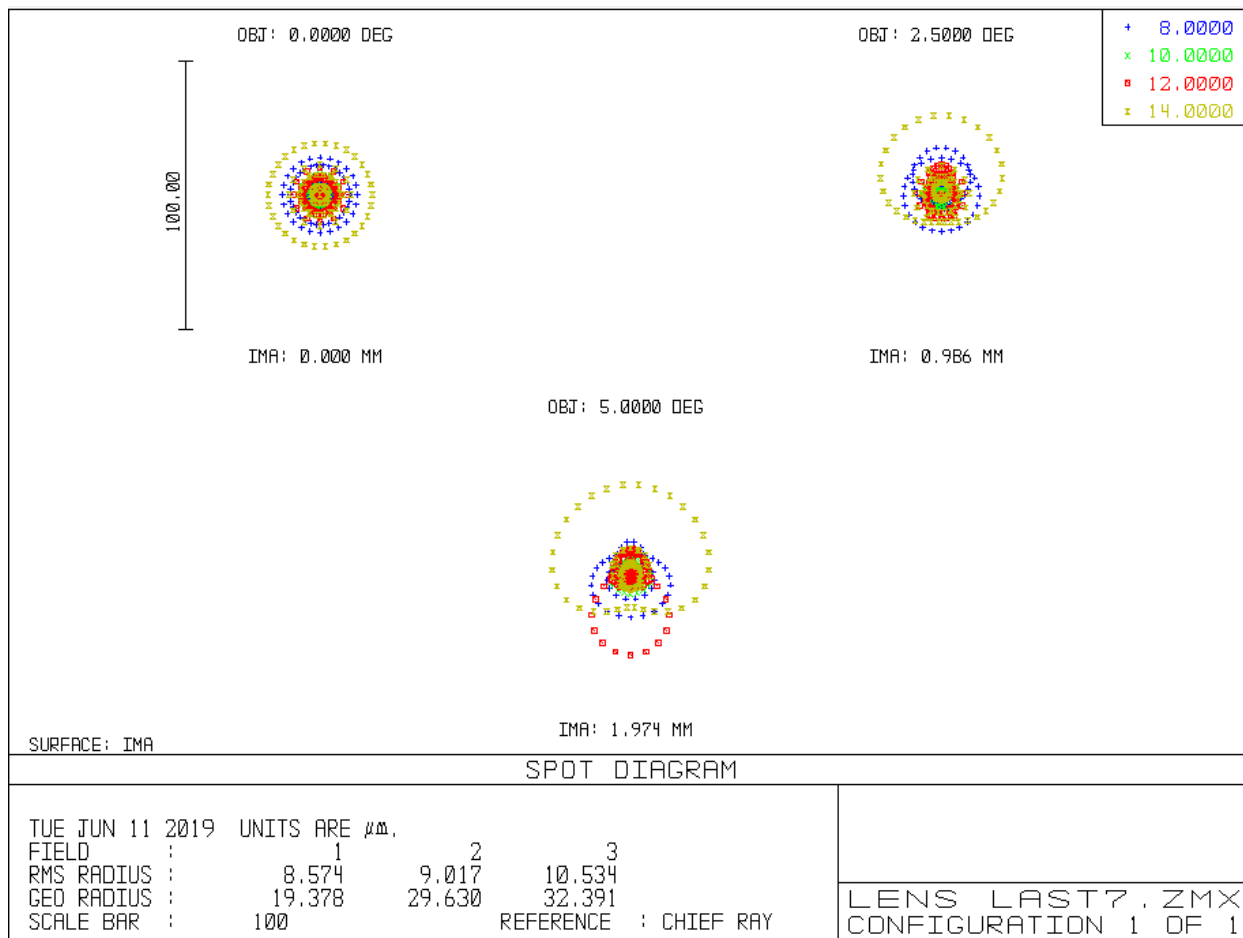


Рис. 2.8. Діаграми кружків розсіювання для різних кутів поля зору.

Як видно з отриманих діаграм на кутах поля зору більших від нуля градусів можна побачити наявність аберацій типу коми, сферичних аберацій та ін. Такі негативні фактори є звичайними для об'єктивів зображальних оптичних систем. Головним критерієм якості оптичної системи є параметр

RMS Radius, приведеної на діаграмі, необхідно, щоб це значення було не менше ніж половина розміру пікселя ПВ.

5. Оптимізація

Zemax надає можливість для проведення оптимізації для досягнення певних характеристик оптичних систем. Вказані енергетичні та просторові характеристики оптичних систем, що були розраховані для даної ОС можливо покращити, але для кожної оптичної системи є обмеження.

2.2. Розрахунок параметрів тепловізора

Еквівалентна потужність шуму (NEP)

Еквівалентна потужність шуму (NEP) визначається як рівень вхідної потужності, який генерує вихідну напругу (або струм) детектора, рівне середньоквадратичній (середньоквадратичного) шумовій напрузі (або струму) детектора. NEP детектора з вихідним напругою задається як

$$NEP = \frac{V_n}{\mathfrak{R}} \quad (2.2)$$

є V_n – середньоквадратична шумова напруга детектора, а \mathfrak{R} - чутливість детектора до напруги. При вказівці значення NEP необхідно згадати відповідну електричну смугу пропускання і швидкість сканування. Коли детектор сканується з більш високою швидкістю, його чутливість зменшується через кінцеву теплову постійну часу. Крім того, електрична ширина смуги буде збільшуватися, що призводить до збільшення середньоквадратичної шумової напруги, що впливає на значення NEP.

Еквівалентна різниця температур по шуму (NETD)

									Аркуш
									40
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Значення NETD неохолоджуваних детекторів можна визначити як зміна температури чорного тіла, яке призводить до єдиного відношення сигнал/шум у вихідному сигналі детектора. Те ж саме визначення також застосовується, коли детектор інтегрований зі схемою зчитування; тому важливо вказати, яке визначення використовується при вказівці значення NETD. Невелике значення NETD вказує, що детектор може відобразити дуже малі зміни температури в сцені, і таке невелике значення NETD може бути отримано з використанням високопродуктивного детектора з низьким рівнем шуму і високою чутливістю. Вираз NETD включає параметри детектора, такі як електричні перешкоди, площа активного детектора і NEP, а також параметри, пов'язані з оптикою, і деякі фундаментальні параметри, такі як зміна спектральної щільності потужності чорного тіла по відношенню до температури. На Рис. 2.1 показана спрощена оптична схема, яка використовується у тепловізорах.

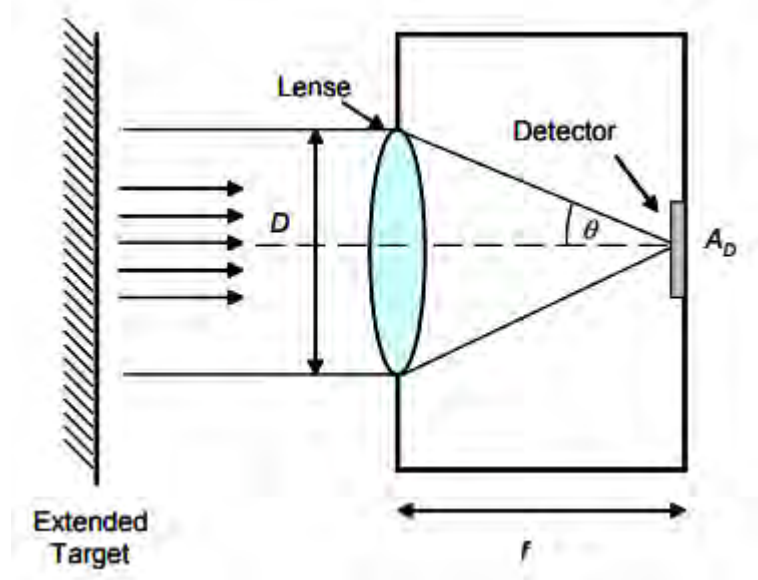


Рис. 2.9. Оптична схема типового об'єктиву тепловізора.

Для оптичної установки без втрат, зміна потужності падаючого випромінювання на детектор після однієї зміни Кельвіна в розширеній мішені визначається як:

$$\frac{\Delta P_{det}}{dT_{tar}} = \left(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} A_D \sin^2 \theta \quad (2.3)$$

де, θ - половина кута, поля зору, A_D - ділянка активного детектора, і запис в дужках $\left(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}}\right)_{\lambda_1-\lambda_2}$ дає зміну потужності випромінювання на цільовій стороні на Кельвін і на одиницю площі для π стер-радіанів. Цей вираз залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання.

Використовуючи геометричні розміри зображення, такі як діаметр (D) і фокусна відстань (f) оптики, $\sin\theta$ можна виразити як.

$$\sin^2(\theta) = \frac{(D/2)^2}{f^2+(D/2)^2} = \frac{1}{4(f/D)^2+1} \quad (2.4)$$

де, D - діаметр, а f - фокусна відстань оптики. Існує також інший оптичний параметр, який називається F-числом (F), яке визначається як

$$F = \frac{1}{2\sin\theta} \quad (2.5)$$

Рівняння 2.4 може бути виражено в через F

$$\frac{\Delta P_{det}}{dT_{tar}} = \frac{\Delta p_{tar} * A_D}{4F^2} \quad (2.6)$$

який дає зміну потужності, що падає на активну зону детектора (A_D), при одній зміні в кельвіні цільової температури. Використовуючи це співвідношення, можна визначити мінімальну зміну температури на мішені, обмежену шумовою еквівалентною потужністю детектора (NEP). Цей параметр називається шумом еквівалентної різниці температур ($NETD$), а $NETD$ виражається як

$$NETD = \frac{NEP}{\frac{\Delta P_{det}}{dT_{tar}}} = \frac{4F^2 * NEP}{A_D * \frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}}} = \frac{4F^2 * V_n}{A_D * \left(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} * \mathfrak{R}} \quad (2.7)$$

де, F - число F -оптики, V_n - електричний шум, AD - зона активного детектора, \mathfrak{R} - відгук, а вираз в дужках $\left(\frac{\Delta p_{tar}}{\Delta T_{tar}}\right)$ - константа, визначена раніше.

Для того, щоб мати можливість знаходити невеликі зміни температури на цілях, значення NETD детектора має бути якомога менше. Щоб зменшити значення NETD, NEP детектора має бути максимально зменшений. На початковій фазі проектування слід вибрати відповідний розмір детектора, і піксель повинен бути спроектований з максимально можливим значенням відгуку.

Зауважимо, що NETD обернено пропорційно активній області детектора. Отже, важко зменшити значення NETD для менших пікселів, а для заданого розміру пікселя детектор повинен бути сконструйований з максимально досяжним коефіцієнтом заповнення. Шум детектора також повинен бути зменшений шляхом обмеження електричної смуги пропускання детектора. Інфрачервона оптика також впливає на значення NETD, а для зменшення значення NETD слід використовувати меншу координацію (f / D); однак оптика з меншим фокальним співвідношенням зазвичай дорого. Сучасні теплові камери використовують фокусні співвідношення від 0,8 до 1,8.

Відображальна здатність

Відображальна здатність (D^*) є нормалізованим параметром, який використовується для порівняння продуктивності різних типів детекторів з різним розміром пікселів і працює при різних швидкостях сканування, а відображальна здатність дається як.

$$D^* = \mathfrak{R} \frac{\sqrt{AD\Delta f}}{V_n} = \frac{\sqrt{AD\Delta f}}{NEP} \quad (2.8)$$

де, AD - активна область пікселя, isf - електрична смуга пропускання, \mathfrak{R} - відгук детектора, і V_n - сумарна напруга шуму, виміряна в зазначеній смузі

пропускання. Високопродуктивний детектор повинен мати високе значення D^* , що вказує на високу чутливість і низьку спектральну щільність шуму.

Оскільки напруга шуму детектора зростає з квадратним дахом електричної смуги пропускання, детектори, які мають різні електричні смуги пропускання через їх архітектуру зчитування, можуть порівнюватися з використанням їх D^* значень, за умови, що сцена сканується з однаковою швидкістю.

У більшості детекторів відношення сигнал/шум детекторів залежить від квадратного кореня ділянки активного детектора, і він покращується, коли площа детектора збільшується. Тому нормалізація шумової напруги з квадратним коренем активної області детектора дозволяє порівняти детектори з різними активними областями.

Для фотонних детекторів реакційна здатність дуже сильно змінюється з довжинами хвиль, і для цих детекторів необхідно вказати довжину хвилі, на якій задано значення D^* , і для позначення залежності довжини хвилі $D^* \lambda$ використовується. Можна також давати відображальну здатність як відображальну здатність чорного тіла, символ якого $D^*(T)$, де T - температура чорного тіла. Для більшості теплових сповіщувачів відгук має відносно плоский відгук, і тільки $D^*(T)$ вказаний для теплових детекторів. Однак все ще існує деяка залежність чутливості від довжини хвилі через характеристики поглинання матеріалу поглинання або через різні геометричні структури резонансних оптичних порожнин, що використовуються для підвищення рівня поглинання.

Розрахунок чутливості тепловізійного каналу виконується за формулою

$$\Delta T = \frac{\rho \Phi_{п.е.1} \sqrt{A_{пр} \Delta f_{ш}}}{4.625 \cdot 10^{-12} T^3 d_{эф} \delta^2 \ln \Delta \lambda_{эф} \sqrt{n}} \quad (2.9)$$

де ρ - відношення сигнал / шум; $\Phi_{п.е.1} = 1 / D$ - спектральний поріг чутливості приймача випромінювання, D - питома відображальна здатність приймача випромінювання в максимумі його спектральної характеристики,

певна на електричній частоті, при якій спектр напруги шуму приведений до одиниці; $A_{пр}$ - площа приймача випромінювання; $f_{ш}$ - еквівалентна шумова смуга підсилювального тракту, Гц; T - температура фону, К; $d_{эф}$ - ефективний діаметр вхідної зіниці оптичної системи, см; q - миттєвий кут поля зору ТПВ; n - кількість приймачів, що працюють в режимі затримки і накопичення; $e_{ф}$ - ефективна відносна спектральна смуга пропускання приймачів;

$$\ln \Delta \lambda_{eф} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \phi(\lambda) S(\lambda) \tau_{атм}(\lambda) \tau_{об}(\lambda) d\lambda / \lambda \quad (2.10)$$

$\Phi(\lambda)$ - відносна спектральна характеристика потоку випромінювання об'єкта (наприклад, водної поверхні); $S_{отн}(\lambda)$ - відносна спектральна характеристика чутливості приймача випромінювання;

Відношення довжини штриха до його ширині (формат) - 7: 1.
Вводиться також деякий показник $K_{сл}$ - рівень складності розв'язуваної задачі. Реєстрована ТПВ різниця температур може бути апроксимирована у вигляді

$$\delta T = \Delta T_0 * e^{-\beta_{сист} k_c} \quad (3.1)$$

де $\beta_{сист}$ - коефіцієнт приладового ослаблення; ν - просторова частота, період / мрад; qT_0 - точка перетину кривої спаду опромінення з віссю y (характеризує чутливість приладу в цілому).

При відношенні сигнал / шум = 1 (50% ймовірність виконання завдання) дальність дії системи:

$$R = \frac{\ln \frac{\Delta T \sqrt{\epsilon/7}}{\delta T_0}}{\beta_{атм} + \frac{k_c}{S} \beta_{ист}} \quad (2.11)$$

Відповідно до наведених співвідношень побудована функція виявлення ТПВ для знаходження дальності по тепловому контрасту квадратних об'єктів.

Оскільки до сучасних тепловізорів приводиться лише значення параметра NETD, можна скористатися цим значенням для знаходження інших його параметрів.

$$NETD_i = NETD_D \frac{k^2 \sqrt{2t_i \Delta f}}{\tau_A * \tau_0 * \tau_f * k_{\Delta\lambda}} \quad (2.12)$$

$$k_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda = 11,7 \quad (2.13)$$

$$NETD_i = 0,05 \frac{1}{0,78 * 0,8 * 0,8 * k_{\Delta\lambda}} = \frac{0,05}{5,86} = 0.05 \quad (2.14)$$

2.3. Висновок до другого розділу

Отже, при розробці тепловізора можна використовувати вже відомі формули та рішення, покращуючи їх за допомогою програм. Це дозволяє розрахувати модель тепловізора та його властивості ще до його втілення у вигляді приладу.

Потужне програмне забезпечення дозволить розрахувати оптичну схему будь-якої складності, для будь-яких вимог, щодо її параметрів. Після чого отриману оптичну систему можливо покращити, оптимізувавши її характеристики.

Розрахунок параметрів детектора можливо виконати використовуючи математичні САПР. Але такі розрахунки доцільні лише при розробці складних систем для певних умов використання.

III Розділ Підбір елементів

3.1. Вибір інфрачервоного датчика

Для задач відображення теплового випромінювання необхідно обрати детектор, що буде найбільш ефективним для умов проведення контролю.

Головним параметром інфрачервоного детектора є спектральний діапазон чутливості. Це діапазон електромагнітних довжин хвиль, які здійснюють вплив на речовину, з якої виготовлений цей детектор.

Для використання у промисловості зазвичай використовуються детектори, чутливі до дальнього спектрального діапазону інфрачервоного випромінювання 8 -14 мкм.

Для використання у даному тепловізорі було обрано детектор UL1S PICO 160 Gen 2, так як він чутливий до потрібного спектрального діапазону інфрачервоного випромінювання і має деякі інші параметри, що відповідають рівню сучасних тепловізорів.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

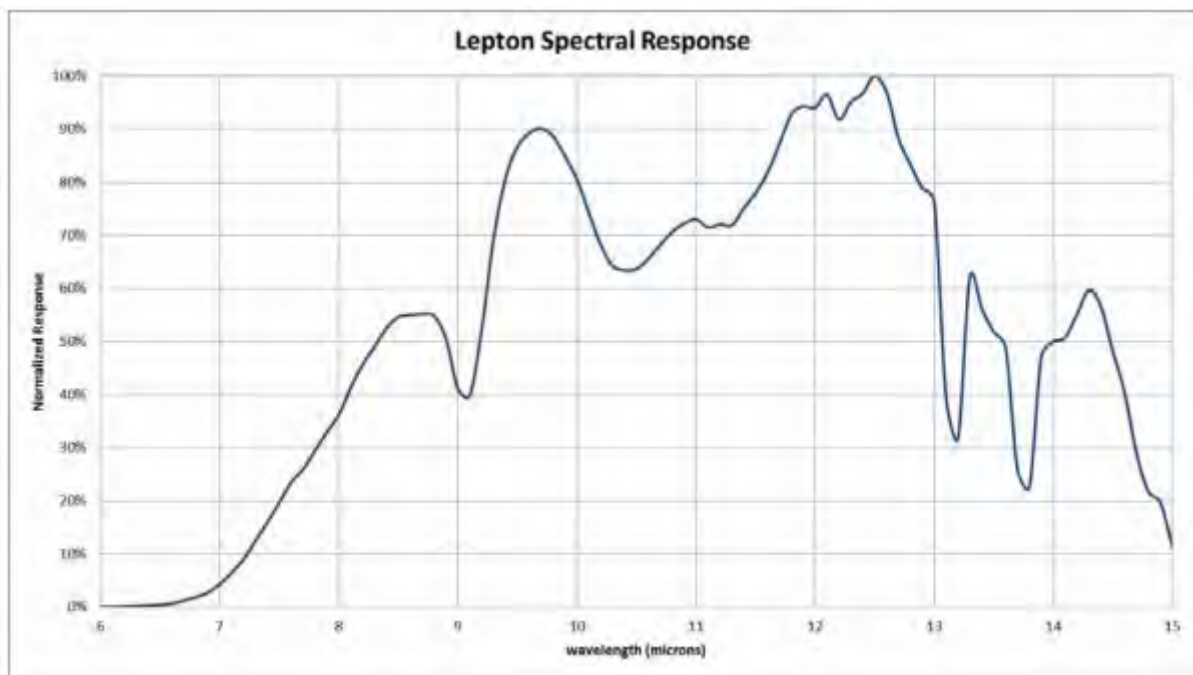


Рис.3.1. Спектральний робочий діапазон детектора PICO 160 Gen 2

Параметри детектора:

- сенсор QVGA типу
- Розміри 16,5 x 16,5 x 4.22 мм²
- Розмір пікселя 17 мкм
- Мала потужність для оптимального використання акумулятора 220 мВт
- Частота кадрів 60 Гц
- Термічна чутливість < 60mK
- Термічна константа часу <10 мс
- Працездатність > 99,5%

Інші особливості детектора:

- QVGA-сумісна платформа
- Гнучка конфігурація
- Повний доступ до функцій сенсора (I2C)
- Режим вільного запуску або зовнішнього тригера

Архітектура детектора :

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

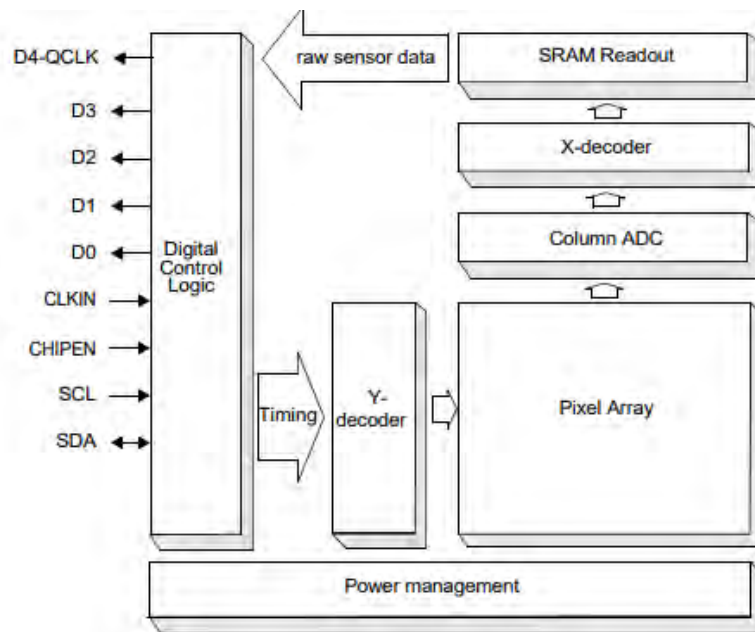


Рис.3.2. Внутрішня будова інфрачервоного детектора UL1S PICO 160 Gen 2

Для того, щоб підключити цей датчик до мікроконтролера і у подальшому обробляти отримані з нього дані. Детектор упакований у мікросхему, що готова до підключення до мікроконтролера за допомогою інтерфейсу I2C. Це можливо завдяки наявності схеми зчитування ROIC.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Pad Number	Pad Name	I/O Type	Description
1	NC	-	Not connected
2	AVDD	PWR	Analogue power supply 3.3V
3	AGND	PWR	Analogue ground
4	D3	O	Data output D3
5	D2	O	Data output D2
6	D1	O	Data output D1
7	D0	O	Data output D0
8	DGND	PWR	Digital Ground
9	SCL	I	I ² C Clock
10	SDA	I/O	I ² C Data
11	DVDD	PWR	Digital power supply 3.3V
12	CLKIN	I	Master clock input
13	D4_QCLK	O	Data output D4 (in 5-wire mode) Data qualification clock (in 4-wire mode)
14	CHIPEN	I	Chip enable input (LOW = enabled)

Рис. 3.3. Таблиця назначення пінів детектора.

Як видно з представленої таблиці, за передачу даних від детектора відповідають ноги D1, D2, D3, D4. По цим пінам передається код, зображення. Частота отримання цих кодів тактується пінами SCL та SDA.

Для правильної роботи схеми необхідно підключити деякі стандартні, зазначені у даташиті елементи

3.2. Вибір АЦП

Для того, щоб якісно виконати перетворення аналогового сигналу від детектора потрібно обрати 8 – бітний АЦП, що і було зроблено у роботі.

ADC080x 8-Bit – восьмибітний АЦП Пристрої ADC0805 є 8-бітним послідовним інтерфейсом для керування CMOS, необхідним для перетворення (ADC), який використовує диференціал В якості автономного Device Ці перетворювачі призначені для роботи

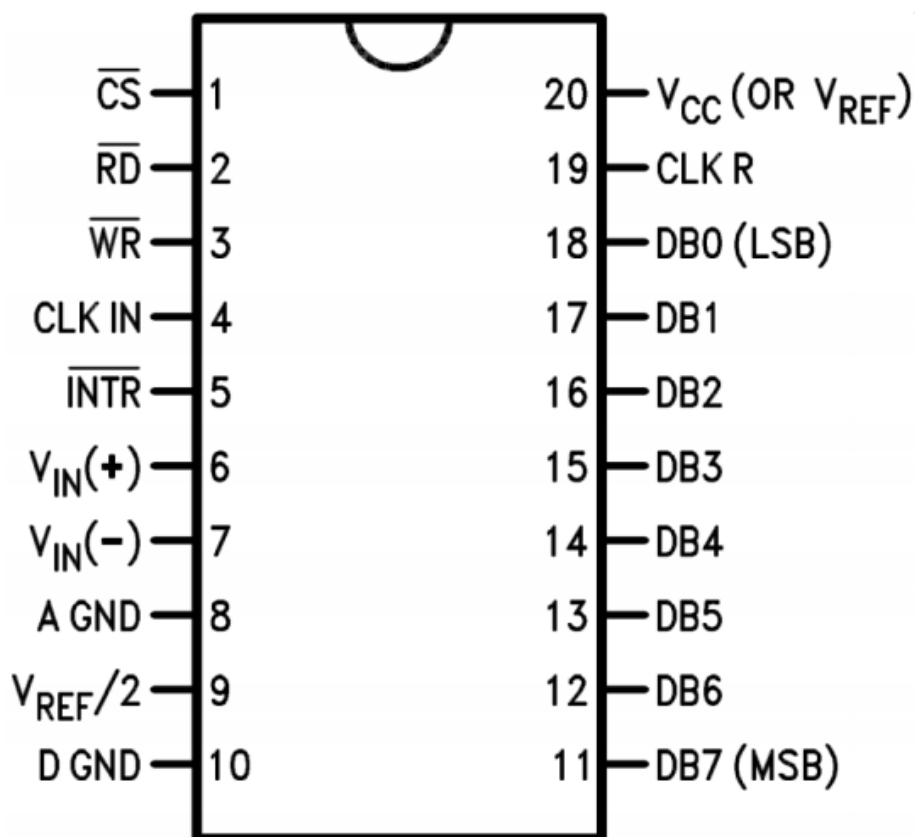


Рис. 3.4. Корпус аналогово-цифрового перетворювача

Опис

- Працює з 2,5-V напругою.
- Діапазон напруг від 0-V до 5-V аналогового входу з відхиленням спільного режиму та зміщенням аналогового сигналу

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.3. Вибір мікроконтролера

Для обробки сигналів, кодів отриманих з АЦП та контролювання електричними сигналами, що подаються на компоненти електричного тракту, необхідно використовувати мікроконтролер. Ця мікросхема здійснює контроль над тактуючими імпульсами у електричній схемі, а також приймає, зберігає і обробляє дані про зображення. Після обробки пакету даних зображення передається на LCD дисплей.

Особливості мікроконтролера

- 32-бітний процесор високої ефективності (TMS320C28x)
- 60 МГц (16,67-нс цикл часу)
- 50 МГц (час циклу 20-нс)
- 40 МГц (час циклу 25-нс)
- 16×16 і 32×32 операцій MAC
- Атомні операції
- Швидка реакція переривання та обробка
- Єдина модель програмування пам'яті
- Ефективний код (на мові C / C ++ та збірка)
- Одиначне 3.3-V постачання
- Відсутність вимоги щодо послідовності живлення
- Інтегровані перезавантаження живлення та відновлення
- Мала упаковка, 38-контактний
- Низька потужність
- Немає аналогових пінів підтримки
- Два внутрішніх осцилятора нуля

						ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			52

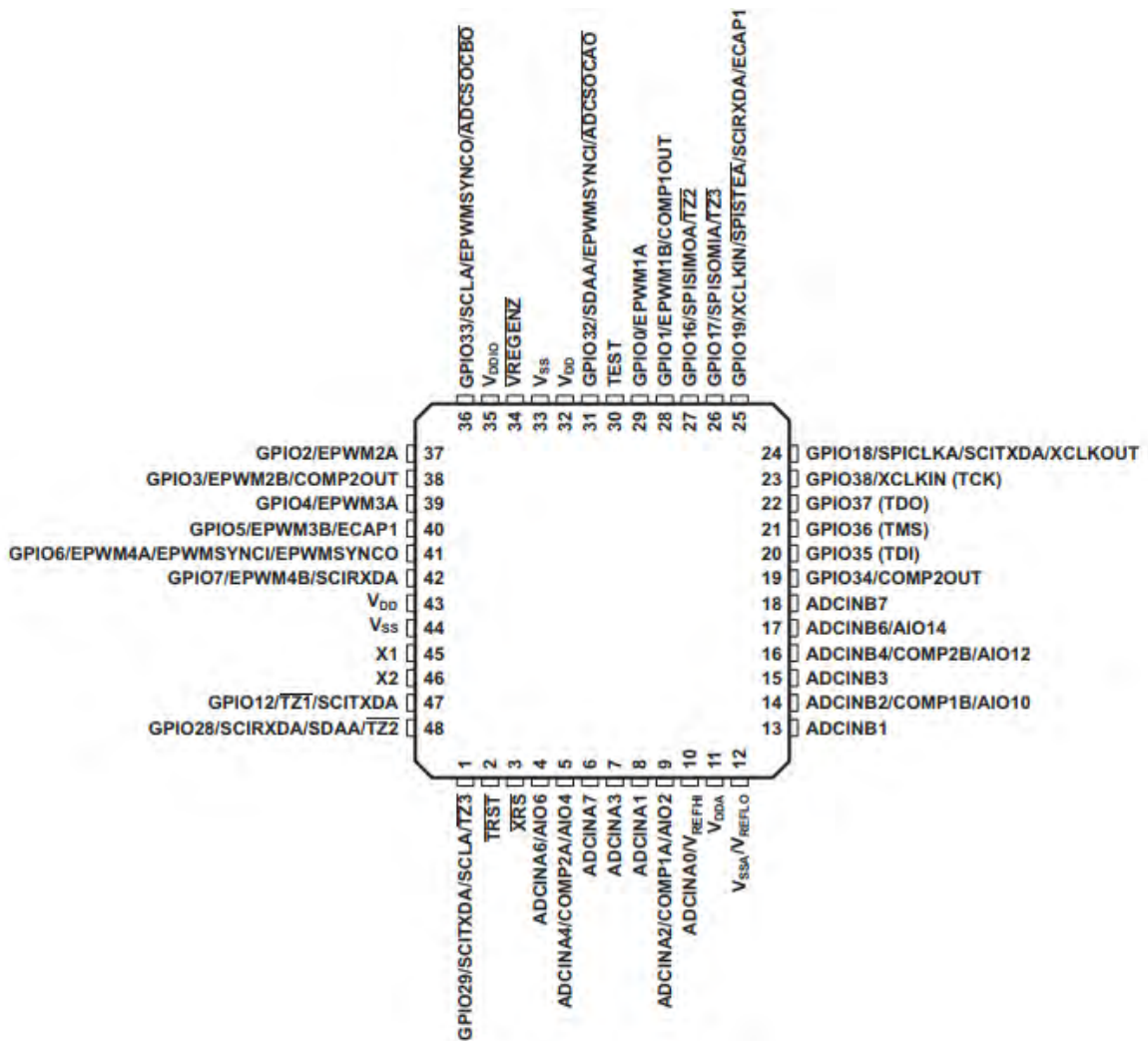


Рис.3.5. Мікроконтролер TMS320C28x

3.4. Вибір дисплея

Для візуалізації отриманого зображення із датчика інфрачервоного випромінювання необхідно обрати якісний дисплей, так як промисловий тепловізор, повинен бути оснащений своїм засобом виведення інформації для користувача. Такий підхід до побудови промислового тепловізора перш за все забезпечує автономність приладу. Для такого тепловізора немає необхідності у підключенні або передачі даних до зовнішнього пристрою із наявним дисплеєм, наприклад до персонального комп'ютера. Але слід зауважити, що сучасні промислові тепловізори мають також і можливість з'єднання та передачі даних за зовнішні пристрої обробки інформації, тобто

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК. Наприклад, можна передавати відеосигнал, для подальшого збереження і обробки інформації



Рис. 3.6. LCD дисплей EA eDIPTFT57-A

3.5. Висновки

Для розробки промислового тепловізору обрано ряд елементів, необхідних для отримання, зчитування та обробки сигналів від приймача випромінювання. Центром обчислювального блоку є мікроконтролер, що опрацьовує, та видає інформацію на дисплей.

Дослідивши листи даних для кожного елементу можна прийти до висновку, що для кожної окремої задачі існують певні стандартні способи їх виконання. Велика кількість різноманітних інтерфейсів підключення дозволяє працювати з різними типами детекторів інфрачервоного випромінювання.

Робота з листами даних до кожного електричного компоненту дозволяє ефективно віднайти рішення, для підключення і роботи з цим компонентом разом з іншими компонентами.

Список використаних літературних джерел

1. A. Rogalski, History of infrared detectors/ A. Rogalski // OPTO–ELECTRONICS REVIEW – vol. 20(3). -2012, - с. 279–308.
2. Топильский В.Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей : [учебное пособие] - М : Техносфера, 2014. -286 с. : ил. - (Мир электроники)
3. Тягур В.М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – том 81. – № 4. – С. 42-47.
4. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применене. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 320 с.: ил.
5. Муравьев А.В. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа / А.В. Муравьев, Е.А. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2016. – вип. №4. – С. 195-199.
6. Ф. Ф. Сизов Ик-фотоэлектроника: фотонные или тепловые детекторы? перспективы / Ф. Ф. Сизов // Sensor Electronics and Microsystem Technologies 2015 – Т. 12, № 1
- 7 В. В. Коротаев, Г .С. Мельников, С. В. Михеев, В. М. Самков, Ю. И. Солдатов. Основы тепловидения – СПб: НИУ ИТМО,2012 – 122 стр.
8. Муравьев А. В. Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа / А. В. Муравьев // TRENDS OF MODERN SCIENCE. – vol. 15. – 2018. – pp. 88-91.
9. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технологаоптика. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, Политехника, 2004, 679 с.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

10. Кучеренко О. К. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – вип. №5. – С. 114-117.

11. Муравйов О.В. Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці / О.В. Муравйов, О.О. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2017. – вип. №1. – С. 124-131.

12. Сокольский М.М. Допуски и качество оптического изображения. Ленинград, Машиностроение, 1989, 221 с.

13. Муравьёв А. В. Пассивная термостабилизация оптической системы тепловізора и перспективы его применения в медицинской диагностике / А. В. Муравьёв // Приборостроение – 2017: материалы 10-й Международной научно-технической конференции. – Минск, Белоруссия, 2017. – С. 385-387.

14. Мальцев М.Д. Расчет допусков на оптические детали. Москва, Машиностроение, 1974, 168 с

15. Муравьёв А. В. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов / А. В. Муравьёв, О. К. Кучеренко // Наука и техника. – 2015. – №4. – С. 32 – 37.

16. Tyagur V. M. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat / V. M. Tyagur, O. K. Kucherenko and A. V. Murav'ev // Journal of Optical Technology. — vol. 81 (4). — 2014. — pp. 199–203.

17. Кучеренко О.К. Вплив температури на абераційні властивості ІЧ-об'єктивів / О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, Д.О. Остапенко. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. – № 1. – С. 99-105.

					ПК51.19.00.00.000 ПЗ	Архиви
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56