

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«___» _____ 20__21__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології неруйнівного контролю та діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Прилад для класифікації матеріалу за температурним
профілем»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК – 71

Наконечний Микола Вікторович

Науковий керівник:

старший викладач, к.т.н.

Лисенко Юлія Юріївна

Консультант з графічної частини

старший викладач, к.т.н.

Богдан Галина Анатоліївна

Консультант з розробки принципової електричної схеми

доцент, к.т.н.

Баженов Віктор Григорович

Рецензент:

доцент, к.т.н.

Мокійчук Валентин Михайлович

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

Студент _____

Київ – 2021 року

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРЖДУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«___» _____ 21__ року

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Наконечного Миколи Вікторівича

1. Тема проєкту «Прилад для класифікації матеріалу за температурним профілем», керівник проєкту Лисенко Юлія Юріївна, к.т.н., старший викладач, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2021 року № ____.
 2. Строк подання студентом проєкту: «___» _____ 2021 року.
 3. Вихідні дані до проєкту: кут поля зору $2\omega = 10^\circ$, робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda = 8 - 15$ мкм.
 4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Теоретична частина; Розділ 2. Проектування тепловізору; Розділ 3. Підбір комплектуючих для тепловізору.
 5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема оптична, функціональна схема, принципова електрична схема, складальний кресленик, презентація доповіді.
 6. Консультанти розділів проєкту
-

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

Микола НАКОНЕЧНИЙ

Керівник

Юлія ЛИСЕНКО

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПК 7113.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	39	
3	A2	ПК 7113.01.000 ФС	Функціональна схема	1	
4	A1	ПК 7113.02.000 ЕП	Схема електрична принципова	1	
5	A1	ПК 7113.03.000 СК	Складальний кресленик	1	
6	A2	ПК 7113.04.000 ОС	Схема оптична	1	

				ПК 7113.00.000.00				
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту				
Розробн.	Наконечний М.В.						Лист	Листів
Керівник	Лисенко Ю.Ю.						1	1
Консульт.	Богдан Г.А.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71	
Консульт.	Баженов В.Г.							
Н/контр.	Лашко О.В.							
Зав. каф.	Протасов А.Г.							

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Прилад для класифікації матеріалу за
температурним профілем»

Київ – 2021 року

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект під назвою «Прилад для класифікації матеріалу за температурним профілем» присвячений розробці безконтактного приладу зчитування температурного профілю об'єкту контролю, його зміни та визначення типу його матеріалу на основі отриманих даних. Роботу виконав студент кафедри ПСНК (НТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського») Наконечний Микола.

При виконанні даного проекту було розглянуто теоретичні основи визначення типів матеріалів, фізичні основи термовізора, розроблено функціональну схему приладу, синтезовано та розраховано характеристики оптичної системи тепловізора, підібрано комплектуючі для пристрою, розроблено електричну принципову схему та складальний кресленик.

Обсяг роботи складається з 58 сторінок (без додатків), 3 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, містить 1 таблиці, 23 рисунків та 16 літературних джерел.

Ключові слова: безконтактне вимірювання температури, тепловізор, температурний профіль, визначення типу матеріалу, оптична система, інфрачервоний неруйнівний контроль, неруйнівний контроль.

ABSTRACT

The diploma project entitled "Automated material classification by the thermal testing method" is devoted to the development of contactless device for temperature profile measuring. This work was performed by a student of the department of PSNK (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute) Mykola Nakonechnyy.

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

The volume of the work consists of 58 pages (without appendices), 3 chapters, general conclusions, list of references, contains 1 table, 23 figures and 16 references.

Key words: non-contact temperature measurement, thermal imager, temperature profile, material classification, optical system, infrared non-destructive testing, non-destructive testing.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІЧ – інфрачервоний;

АЧТ – абсолютно чорне тіло;

МК – мікроконтролер;

ФНЧ – фільтр низьких частот;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	13
1.1. Методи та засоби для класифікації матеріалів	13
1.1.1. Аудіовізуальна класифікація матеріалу	13
1.1.2. Класифікація матеріалу на контактній основі	15
1.1.3. Термографія.....	17
1.2. Фізичні основи теплового неруйнівного контролю.....	19
1.3. Принципи роботи тепловізора	32
1.4. Сфери використання теплового неруйнівного контролю.....	33
Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІЗОРУ	36
2.1. Розробка структурної схеми приладу	36
2.2. Розробка функціональної схеми приладу.....	37
2.2. Розрахунок об'єктива тепловізора.....	38
Висновки до розділу 2	50
РОЗДІЛ 3. ПІДБІР КОМПЛЕКТУЮЧИХ ДЛЯ ТЕПЛОВІЗОРА.....	51
3.1. Пам'ять (FIFO)	51
3.2. Мікроконтролер STM32F103x8.....	52
3.3. Вибір дисплею	55
Висновки до розділу 3	57
ВИСНОВКИ.....	58
Список використаних джерел	59
ДОДАТКИ.....	62

					ПК 71.130000.000ПЗ				
Змн.	Арк.А	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Наконечний М.В.				Прилад для класифікації матеріалу за температурним профілем Пояснювальна записка	Літ.	Літ	Арк.	АкрушівАкру
Перевір.									
Н. Контр. Н.					ПБФ, ПК-71				
Затверд.	Лисенко Ю.Ю.								

ВСТУП

Робототехнічні пристрої, які можуть виконувати телеопераційні роботи у складних та неструктурованих середовищах, покладаються головним чином на візуальний та / або слуховий зворотний зв'язок для взаємодії з віддаленим оператором. Існує гостра потреба в вимірюванні фізичних властивостей навколишнього середовища при виконанні точних маніпуляційних завдань на відстані, щоб поліпшити якість роботи.

Системи телеоперації дозволяють користувачеві фізично взаємодіяти з віддаленими середовищами (реальними чи віртуальними). Однак виконання точних маніпуляційних завдань на відстані виявилось більш важким та складнішим, ніж очікувалось, оскільки передбачає різні способи взаємодії (аудіо, візуальну та фізичну). Труднощі телеоперацій головним чином обумовлені незбалансованим співвідношенням зору та фізичного сприйняття. Системи телеоперації, як правило, оснащені камерами високої роздільної здатності, зображення яких обробляються усталеними алгоритмами комп'ютерного зору для вивчення візуальних властивостей місцевості, що маніпулюється (таких як колір, геометрія, рух та текстура). Однак ці системи мають дуже обмежені знання про фізичні властивості маніпульованої місцевості (такі як властивості жорсткості або тертя).

Визначення, зберігання, зв'язування та відображення фізичних властивостей покращують якість роботи та сприйняття віддаленого середовища. Наприклад, система, здатна забезпечити зворотний зв'язок з хірургами у вигляді кількісних вимірювань властивостей м'яких тканин, сили та жорсткості в реальному часі, все ще відсутня і вкрай бажана. Тим часом поширення проривів у галузі штучного інтелекту, робототехніки та віртуальної / доповненої реальності покращить роботу комп'ютерів вищим рівнем обізнаності, даючи їм змогу розпізнавати своє оточення. Це також забезпечить людей природним, захоплюючим досвідом, що позитивно вплине на освіту, навчання, промисловий дизайн та розваги.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хоча існують різні механізми отримання певної інформації про об'єкти, яка залежить від їх матеріальних властивостей, як правило, неможливо отримати явне рівняння для зв'язку між цими властивостями. Однак деякі програми машинного навчання розроблені саме для встановлення взаємозв'язку між різними формами даних. Машинне навчання вже знайшло широкий діапазон застосувань, включаючи автоматизовану діагностику в охороні здоров'я, характеристику матеріалів та діагностику несправностей в машинних системах.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Методи та засоби для класифікації матеріалів

1.1.1. Аудіовізуальна класифікація матеріалу

Найбільш раннім і найбільш широко використовуваним методом класифікації матеріалів на основі аудіовізуальних сигналів є спектроскопія. Вона вивчає взаємодію між світлом і молекулами, що є складовими об'єктів-зразків. Проте спектроскопічні вимірювання вимагають ретельної та трудомісткої підготовки зразків і можуть бути дуже чутливими до змін умов освітлення навколишнього середовища, що робить їх несумісними із швидким та мобільним налаштуванням. З постійно зростаючою швидкістю збору аудіовізуальних даних та можливостями зберігання, підходи до машинного навчання стають все більш ефективними в оцінці властивостей матеріалу. Датчики зору широко використовуються для розпізнавання поверхневих матеріалів.

Архітектура системи на візуальній основі високого рівня показана на рис. 1.1.

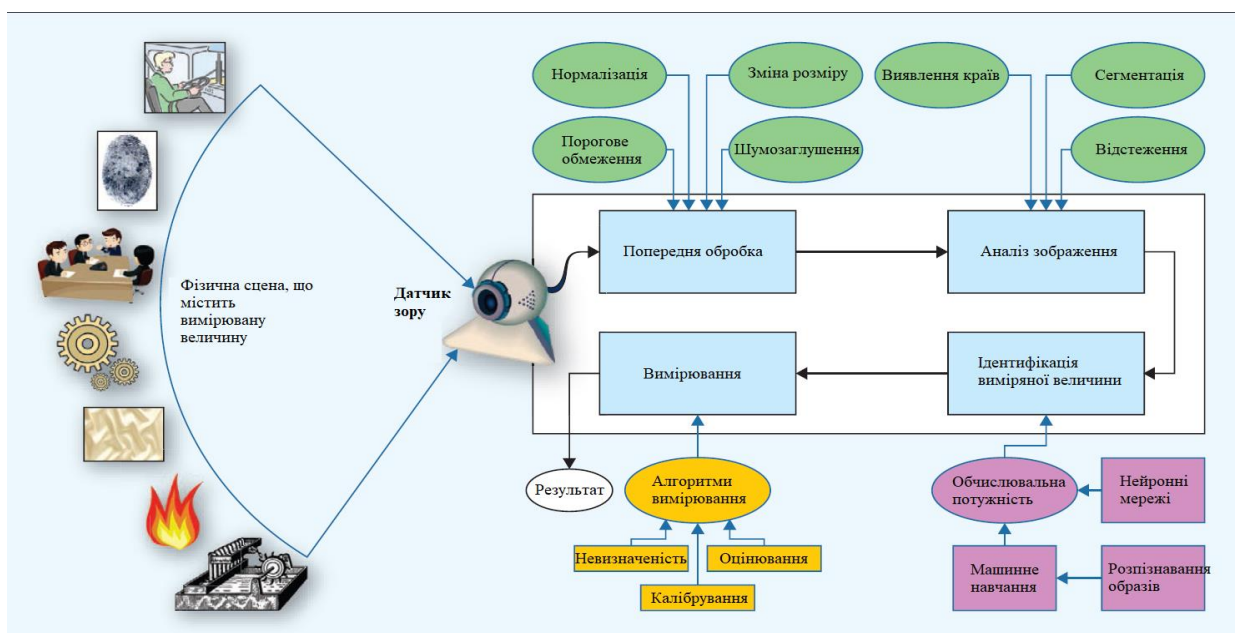


Рис. 1.1. Архітектура системи на візуальній основі високого рівня

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На апаратному рівні є дві основні складові: датчик зору для захоплення зображення та операційний блок для обробки зображення і перегляду предмета, що цікавить, разом утворюють зір. Слід зазначити, що термін зір часто використовується для позначення як комп'ютерного зору, так і машинного зору. Проте, на практиці обидва терміни іноді використовуються як взаємозамінні, що є поширеною помилкою. Незважаючи на подібність термінів у багатьох аспектах, комп'ютерне бачення та машинне бачення не однакові, коли йдеться про проектування, впровадження, розробку та застосування. Традиційно комп'ютерний зір в основному використовується в особистих або повсякденних програмах і спирається на обчислювальні методи, що працюють на комп'ютерах або загальних системах на базі процесорів, тоді як машинне бачення в основному використовується в промисловому контролі або робототехнічних програмах і, як правило, реалізується за допомогою спеціального обладнання, а іноді й без будь-яких комп'ютерів чи систем на базі процесорів. Однак обидва вони використовують багато загальних алгоритмів обробки зображень та обчислювального інтелекту, і обидва вони використовуються в системах на візуальній основі.

Датчиком зору може бути камера видимого світла, інфрачервона камера, лазерний сканер, рентгенівський сканер або будь-який інший датчик, який може отримати зображення фізичної сцени, що містить вимірювану величину. Оскільки найбільш часто використовуваним датчиком зору є камера видимого світла, така як додатковий метал-оксид-напівпровідник (CMOS) або пристрій із зарядовим зв'язком із високою роздільною здатністю (CCD), захоплене зображення більшу частину часу дуже схоже на зображення сцени, яку бачить людина. Для інших типів датчиків, таких як лазер або рентген, це зображення відрізняється від того, що бачить людина, і в основному призначене для операційного блоку. Незалежно від типу датчика зору, ключовим фактором, що сприяє точним вимірюванням, є калібрування камери та точне знання її

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

положення, орієнтації, фокусної відстані, співвідношення сторін, основної точки, спотворення тощо.

Операційний блок приймає зображення, отримане датчиком зору, і виконує необхідні операції для отримання бажаних вимірювань. Цей блок може бути реалізований як в програмному, так і в апаратному забезпеченні; тобто він може бути запрограмований в загальну систему на основі мікропроцесора, таку як процесорний блок інтелектуальної камери, або може бути реалізований у виділеному обладнанні.

Незважаючи на те, що камера зору надає велику кількість інформації для розпізнавання поверхневих матеріалів, характеристика матеріалу, що базується на зорі, має внутрішні обмеження, головним чином через різноманітність зовнішнього вигляду матеріалу (матеріал з подібним зовнішнім виглядом, але різним складом матеріалу, наприклад, пластикова стіна може мати такий самий вигляд як дерев'яна стіна). Це спонукає дослідників застосовувати мультимодальні та контактні сенсори, дані з яких використовують для поліпшення якості визначення характеристик матеріалу.

1.1.2. Класифікація матеріалу на контактній основі

Параметри фізичного контакту між сенсорним приладом та об'єктом дослідження надають значну інформацію про властивості матеріалу. Наприклад, проведення жорстким інструментом по поверхні об'єкта або натискання на нього викликає вібрації, які легко можна виміряти за допомогою акселерометра. Для розпізнавання матеріалів використовуються декілька властивостей, включаючи вібрації, сили контакту та теплову взаємодію.

Автори [1] зробили хвостовий зонд, що торкається землі, для класифікації кількох поверхонь за допомогою утворених вібраційних патернів. Конструкція зонда складається з металевого стрижня з

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

твердотільним акселерометром, прикріпленим до його кінчика. Класифікація рельєфу ґрунтується на восьми ознаках, отриманих з вимірювань акселерометра у часовій та частотній областях. Проте, в найбільш розповсюджених методах ідентифікації місцевості зазвичай покладаються лише на функції, вилучені лише в частотній області.

У роботі [2] пропонується розумний стрижень, який стимулює поверхню матеріалу шляхом механічного збурення та зчитує пружну реакцію, яка залежить від фізичних характеристик матеріалу. Коли поверхня невідомого матеріалу стимулюється механічним збуренням, вона реагує пружною реакцією. Ця реакція залежить від фізичних характеристик розпізнаваного матеріалу. Кожен матеріал проявляє різну реакцію, оскільки механічні хвилі поширюються всередині матеріального середовища в різних видах і з різною швидкістю. Швидкість та енергія передачі залежать від фізичних властивостей середовища, і їх можна використовувати для розпізнавання різних матеріалів.

Оскільки різні датчики можуть бути використані для фіксації різних властивостей характеристик матеріалу, поєднання декількох методів може покращити результати класифікації. Сучасні досягнення в робототехніці дозволяють роботам отримувати мультимодальні вимірювання для кращого розуміння навколишнього середовища. Наприклад, в роботі [3] запропоновано метод активного сприйняття для розпізнавання категорій об'єктів на основі мультимодальної ієрархічної моделі. Ця модель дозволила роботу формувати категорії об'єктів, використовуючи мультимодальну інформацію (включаючи візуальну, слухову та тактильну інформацію), яку можна було спостерігати, взаємодіючи з об'єктом.

Фізичний контакт в об'єктом контролю дає можливість досягти великої точності у визначенні типів матеріалів. Однак дорога вартість та складність конструкції ускладнює використання методу та створення ефективного мобільного приладу.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.3. Термографія

Інфрачервона термографія вивчає теплове випромінювання, яке випромінюють предмети. Зокрема, термографічний контроль досліджує теплові градієнти об'єкту контролю для його якісної оцінки. Пасивна термографія включає вивчення природних теплових градієнтів, таких як витоки тепла в погано утеплених будинках, неправильний обсяг кровотоку в певних частинах людського тіла (термологія) або переміщення живих суб'єктів у певній зоні під наглядом. З іншого боку, активна термографія включає процес збудження об'єктів для введення теплового контрасту та досліджує його особливості і еволюцію з часом. Збудження може відбуватися електромагнітно, оптично або навіть механічно [4, 5]. Залежно від тимчасової форми збудження поширені три підходи: флеш-термографія (одноразовий сплеск енергетичного осадження), поетапна термографія (безперервне енергетичне осадження) або фіксує (синусоїдальна або іншим періодичним енергетичним осадженням) термографія.

Термографія використовується в промислових цілях з 1980-х років. Її основним застосуванням було неруйнівний контроль та оцінка [6], але й також використовувалось для вивчення картин, фресок та інших творів мистецтва [7]. Більш пізніми застосуваннями стали, наприклад, контроль субмікронних електронних схем на предмет струму витоку [6] або характеристики температурної поведінки компонентів [7]. Спільність цих застосувань є перевагою безконтактного та неруйнівного аналізу, що робить інфрачервону термографію ідеальним вибором методу контролю чутливих предметів.

Термографічні дані також мають можливість надавати інформацію про матеріальні властивості об'єкта контролю. Цього можна досягти, дослідивши, як тепловий градієнт на поверхні об'єкта змінюється з часом і простором. Поширення тепла регулюється рівнянням теплоти [6], яке містить константу пропорційності між похідною від часу температури та лапласіанським просторовим розподілом. Ця константа є тепловою дифузійністю матеріалу

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

(співвідношенням його теплопровідності та об'ємної теплоємності) і стосується здатності матеріалу проводити тепло в порівнянні з його зберіганням. Визначаючи анізотропію більшості реальних зразків матеріалів, прийнято проводити різницю між плоскою та наскрізною площиною теплової дифузійності, залежно від того, в якому напрямку зацікавлено вимірювати тепловий потік, подібно до інших теплових властивостей, наприклад теплопровідність. Популярним методом вимірювання дифузійності наскрізної площини є лазерний аналіз спалаху, коли лазерне джерело забезпечує миттєву енергію на одній стороні зразка, а час напіввиходу температури вимірюється на іншій стороні. Дифузійність у площині можна виміряти за допомогою модифікованого методу перехідних площинних джерел, де короткий тепловий імпульс подається в тому самому місці на поверхні об'єкта, де датчик тепловідбиття вимірює збільшення напруги [8]. Недоліками цих методів є те, що обидва вони потребують фізичного контакту зі зразками, а вимірювальне обладнання має великі розміри, що унеможливорює їх використання у випадках, коли необхідна мобільна установка. Отже, це правда, досліджуючи теплову реакцію об'єкта, ми можемо потенційно визначити його теплові властивості, що може дати уявлення про його матеріальний склад.

Були проведені різні дослідження з використання термографії для оцінки теплової дифузійності [9], але вони, як правило, обмежуються своїм обсягом, застосовуючи рішення замкнутої форми, яке застосовується до особливого випадку рівняння теплоти [10], де збудження відбувається протягом нескінченно малої кількості часу і з гауссовим розподілом на поверхні об'єкта. Однак багато реалістичних експериментів з термографією можуть мати різні характеристики збудження. Прикладом цього є ступінчаста лазерна термографія збудження, коли збудження відбувається протягом скінченного, але ненульового проміжку часу, і коли просторовий розподіл падаючого пучка не є гауссовим.

Як зазначалося вище, термографія в основному застосовується для неруйнівної оцінки та контролю, де в основному проводяться якісні

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обстеження, такі як виявлення несправностей. Таким чином, потреба в кількісних додатках є новою, і це пояснює, чому всі підходи, засновані на цій концепції, або обмежені, або все ще перебувають на початку розробки. З іншого боку, поточні безконтактні термодатчики здатні проводити кількісні дослідження, враховуючи їх здатність отримувати термограми в реальному часі з відносно високою частотою кадрів, просторовою роздільною здатністю та тепловою чутливістю.

1.2. Фізичні основи теплового неруйнівного контролю

Усі тверді речовини, рідини та гази, температура яких перевищує абсолютний нуль (0°K), випромінюють інфрачервоне випромінювання, залежне від температури. Як правило, термографія (тепловізійне дослідження) займається виявленням цього випромінювання. Знаючи коефіцієнт випромінювання, температуру на поверхні досліджуваних об'єктів визначають дистанційно. Поверхневі аномалії з різними тепловими властивостями, на відміну від здорового матеріалу, змінюють нормальний тепловий потік. Інфрачервона камера має здатність розпізнавати ці коливання і відображати їх відміну від нормального теплового потоку за тих самих умов. Знаючи термічну інформацію щодо природи внутрішнього теплообміну, можна оцінити такі аспекти, як глибина дефекту, його розмір та його природа.

Теплове випромінювання оцінюється за декількома кількісними характеристиками. Найчастіше йде мова про такі поняття як енергетична світимість і її спектральна щільність[11].

Енергетична світимість є кількістю енергії електромагнітного випромінювання, яка випромінюється певною ділянкою тіла на деякій одиничній площині в усьому діапазоні довжин хвиль та у всіх напрямках за одиницю часу.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

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

Це рівняння випливає з математичної моделі, в реальності ж енергетична світимість залежить від багатьох факторів, параметрів випромінюючого об'єкта, температури тіла та довжини хвилі випромінювання. Щоб зробити коректну оцінку потрібно враховувати наведені параметри, застосовуючи спектральну енергетичну світимість, що є енергетичною світимістю для заданих довжин хвиль $M\lambda T$.

Закон Кірхгофа – це закон, що характеризує модель і властивості абсолютно чорного тіла (АЧТ). Для такого тіла теплове випромінювання є врівноваженим. Це означає, що кількість енергії, яка випромінюється тілом рівна енергії, яку воно поглинає[12].

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

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

Абсолютно чорне тіло – це фізична абстракція тіла, яке випромінює теплову енергію по всьому діапазоні хвиль, отже випромінювальна здатність становить $\varepsilon=1$.

Теплове випромінювання з'являється під час простого гармонійного коливання атомів дискретними квантами, в яких енергія E є функцією частоти випромінювання ν :

$$E = h\nu \quad (1.3)$$

де h - постійна Планка.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтенсивність випромінювання АЧТ є залежною від температури і частоти та визначається законом Планка:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{2 * h * c^2}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{h * \frac{v}{\lambda k * T} - 1}} \quad (1.4)$$

Де λ – довжина хвилі,

ν – частота випромінювання,

c – швидкість світла у вакуумі та дорівнює $2,9979 * 10^8$ м/с,

k – стала Больцмана і дорівнює $1,38054 * 10^{-23}$ (Вт * с)/К,

T – температура тіла,

h – стала Планка.

Теплове випромінювання абсолютно чорного тіла описано законом Стефана-Больцмана. Даний закон можна отримати проінтегрувавши рівняння (1.5):

$$M_T = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} * T^4 \quad (1.5)$$

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

$$M_T = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (1.7)$$

Продиференціювавши рівняння Планка, отримуємо закон зміщення Віна:

$$M_{e,\nu} = 2 * C_1 * \frac{T}{C_2 * \lambda^4} \quad (1.8)$$

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

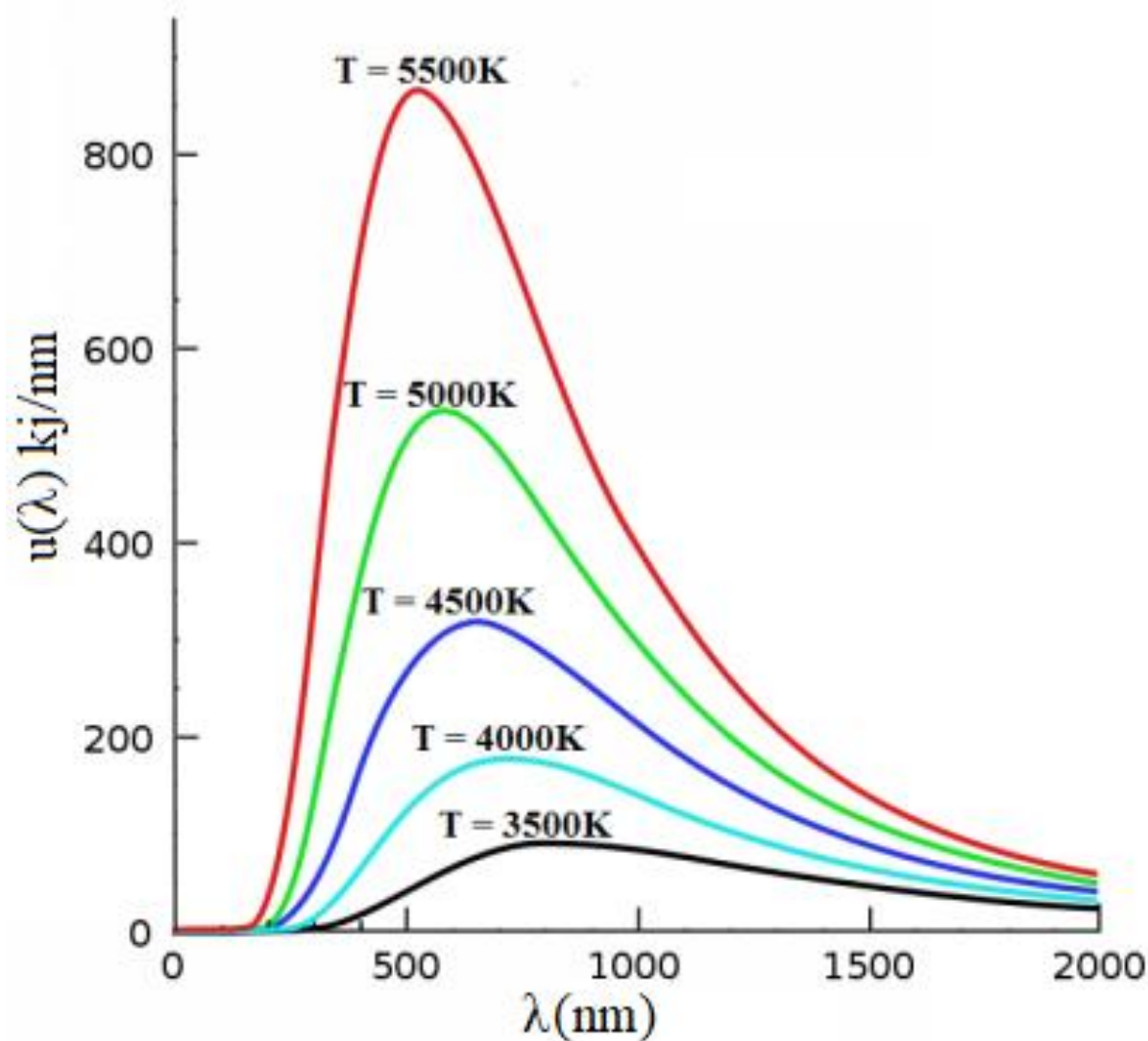


Рис. 1.2. Залежність потужності випромінювання чорного тіла від довжини хвилі

Активна та пасивна термографія

Інфрачервоні неруйнуючі методи контролю можна розділити на активні та пасивні. Основною відмінністю цих двох режимів виявлення, реєстрації та обробки випромінюваного інфрачервоного випромінювання є джерело теплової стимуляції. У першому випадку досліджуваний об'єкт не потребує подачі енергії із зовнішнього джерела, на відміну від активних процедур, які потребують додаткового стимулювання тепла. Візуалізація результатів здійснюється шляхом створення теплових зображень (приклад термограми

представлений на рис. 1.3.), які відображають розподіл температури на поверхні об'єкта контролю.

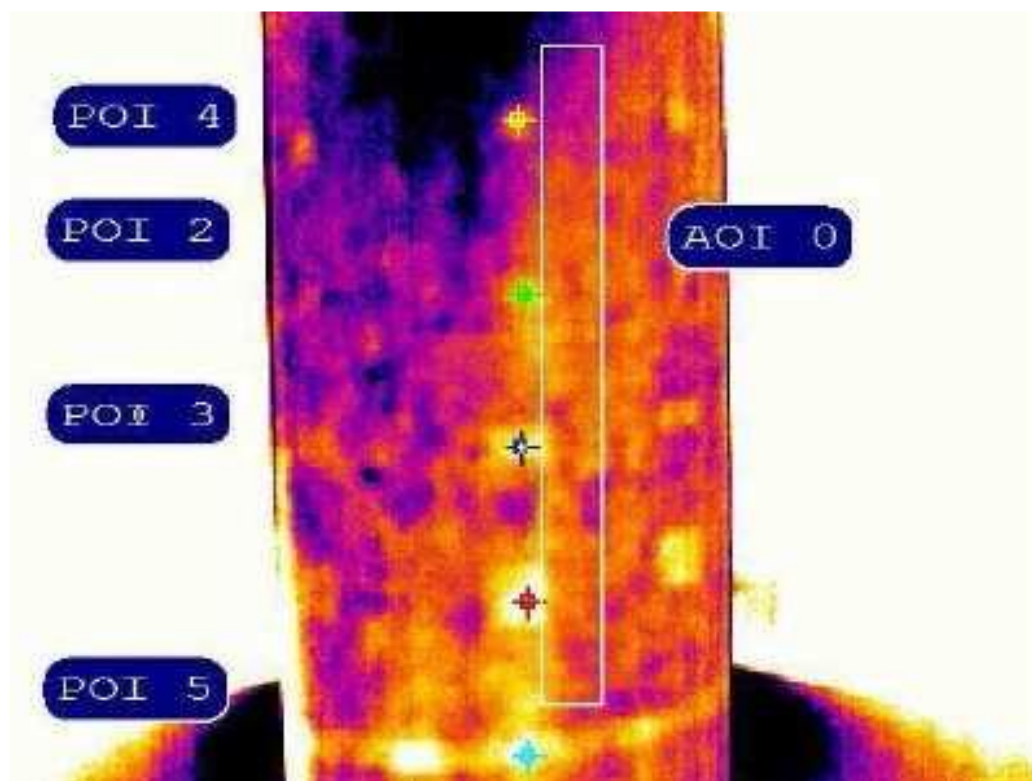


Рис 1.3. Приклад термограми

Пасивні методи виявлення дефектів використовують температуру предмета під час його роботи або відразу після закінчення, коли контраст температури на поверхні може засвідчити про можливе пошкодження. Результатом механічних або теплових навантажень, які виникають під час роботи об'єкта контролю, є випромінювання або поглинання тепла дефектами, тому їх можна діагностувати (ідентифікувати) пасивними методами. У такій конфігурації кваліфікований оператор може інтерпретувати результати безпосередньо на місці. Такі методи знайшли широке застосування в обстеженні будівель, контролі промислових процесів, обслуговуванні електростанцій, контролі ліній електропередач, зварюванні та медицині тощо. Активна термографія використовує зовнішню теплову стимуляцію для контролю бажаних об'єктів. У деяких випадках дефектна і здорова ділянка

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалу (або компонента) має однакову температуру, що заважає виявленню прихованих дефектів. Тому необхідно генерувати динамічне температурне поле (нагрівання або охолодження). Результати сильно залежать від тривалості контролю. Крім того, такі методи вимагають конкретних видів обробки даних. Загальна класифікація цих методів наступна:

- а) тип теплової стимуляції,
- б) форма та розмір області теплової стимуляції,
- в) положення теплогенератора та реєструючого обладнання.

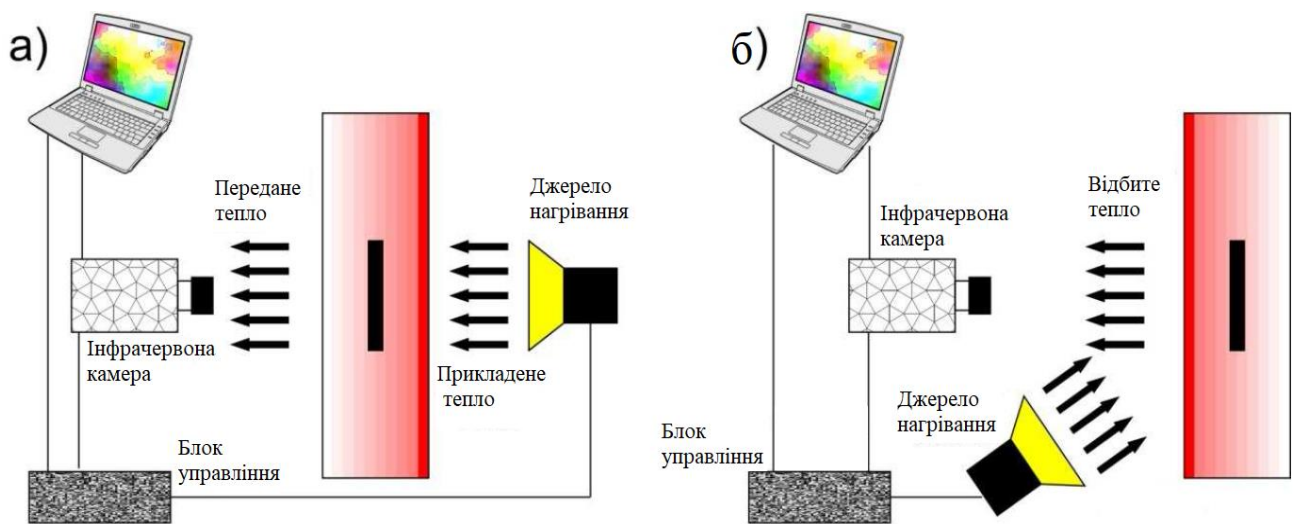


Рис.1.4. Схема для дослідження позицій термографії: а) одностороння, б) двостороння

Джерелом теплової стимуляції може бути: оптичне випромінювання, вихрові струми, електрична потужність, надзвичайно високочастотне радіаційне випромінювання, внутрішнє нагрівання / охолодження газом або рідиною, зовнішнє нагрівання або охолодження повітря та механічні вібрації. Вибір конкретного джерела необхідного генератора енергії залежить від таких факторів, як ефективність, необхідна щільність енергії, вартість, теплофізичні властивості досліджуваного матеріалу, можливість або важливість оптичних збурень.

Наступний тип методів активної термографії обумовлений областю нагрівання, яка може бути у вигляді: точки, лінії або всіх поверхонь. Під час нагрівання точки та безперервного сканування поверхні температура реєструється з певною затримкою, яка залежить від глибини, на якій виникає дефект. Цей спосіб актуальний для виявлення вад, розташованих перпендикулярно поверхні об'єкта контролю, проте має суттєвий недолік: низьку ефективність. Під час лінійного нагрівання предмет нагрівається довгою вузькою смугою, яка рухається поперек деталі. Цей метод особливо актуальний при виявленні тріщин, розташованих вертикально до поверхні об'єкта контролю. Однак найпоширеніший метод із перерахованих вище, - це той, при якому вся поверхня нагрівається. Це пов'язано з ефективними інфрачервоними камерами, які можуть швидко та ефективно досліджувати значні площі [13].

Позиція теплогенератора та реєструючого обладнання має великий вплив на виявлення тріщин, це дуже важливо з точки зору практичного застосування. Загалом, їх можна встановити на одній або протилежних ділянках (Рис.1.4), крім того, це можна зробити за допомогою внутрішніх джерел енергії. З цим налаштуванням виникають як і деякі переваги, так і недоліки: рівномірність нагрівання, шуми. Випробовуваний предмет можна стимулювати охолодженням або нагріванням, але більш практичним є нагрівання. Найвища щільність потужності в зоні досліджуваного об'єкта забезпечує оптичне випромінювання, наприклад: галогенні лампи. Теплова стимуляція внутрішніми джерелами тепла (тобто механічна стимуляція) виявляє відсутність оптичних спотворень, а температурні аномалії виникають лише на ділянках, що містять дефекти внаслідок тертя тріснутих стінок, створення зон пластичної деформації та інших механічних ефектів. Завдяки термофізичним характеристикам полімерних композиційних матеріалів дослідження внутрішніх дефектів, пошкоджень або властивостей є більш ефективним за допомогою активних методів[14].

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Термографічні методи неруйнівного контролю

Імпульсна термографія

В даний час метод є найбільш популярним серед інших для тестування матеріалів завдяки швидкості перевірки та простоті інтерпретації даних. Він базується на застосуванні зовнішнього джерела тепла (також можливе охолодження, наприклад, потік рідкого азоту) для генерування теплового імпульсу. Для різних матеріалів це може тривати від декількох мілісекунд до декількох секунд (залежно від провідності матеріалу). Тривалість імпульсу вибирається ретельно, щоб запобігти руйнування досліджуваного матеріалу. Потім тепловий фронт поширюється вглиб матеріалу, і швидкі зміни температури матеріалу реєструються через рівні проміжки часу послідовністю термограм (див. рис. 1.5.).

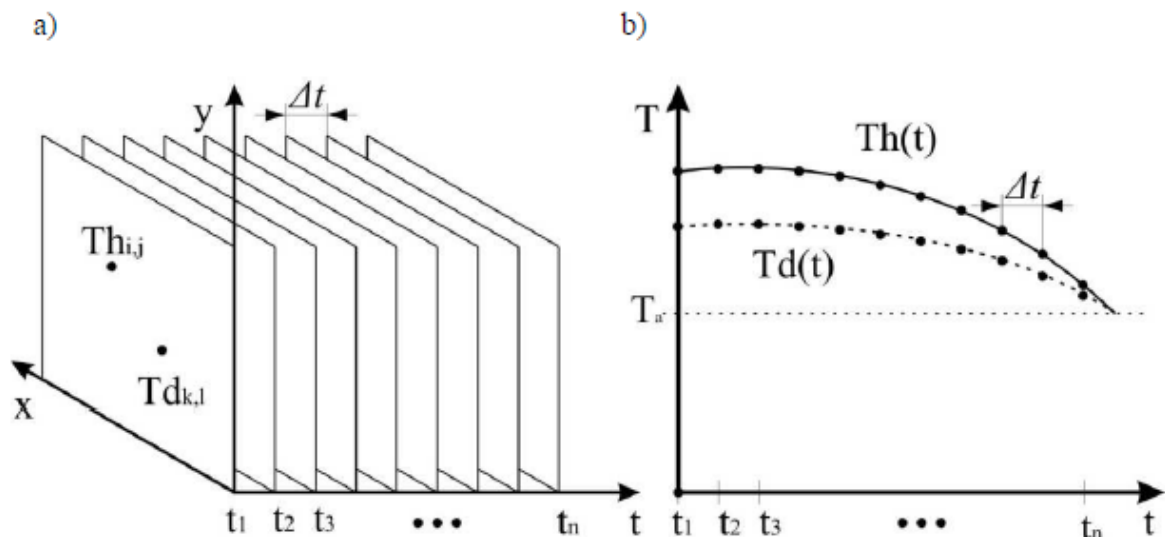


Рис. 1.5. Варіація температури імпульсної термографії: а) отримані дані як тривимірна матриця теплових зображень, б) розподіл температури для здорової (суцільної лінії) та дефектної (пунктирної) області для матеріалів з низькою провідністю

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Після вимкнення джерела стимуляції об'єкт охолоджується до температури навколишнього середовища. У фазі охолодження розподіл температури визначається на поверхні об'єкта контролю. Криву спаду температури можна намалювати для кожного пікселя матриці. Залежно від використовуваного методу (віддзеркалення або передача інфрачервоного спостереження), дефекти візуалізуються як гарячі або холодні плями щодо прилеглих областей, коли тепловий фронт досягає їх (див. рис. 1.6.).

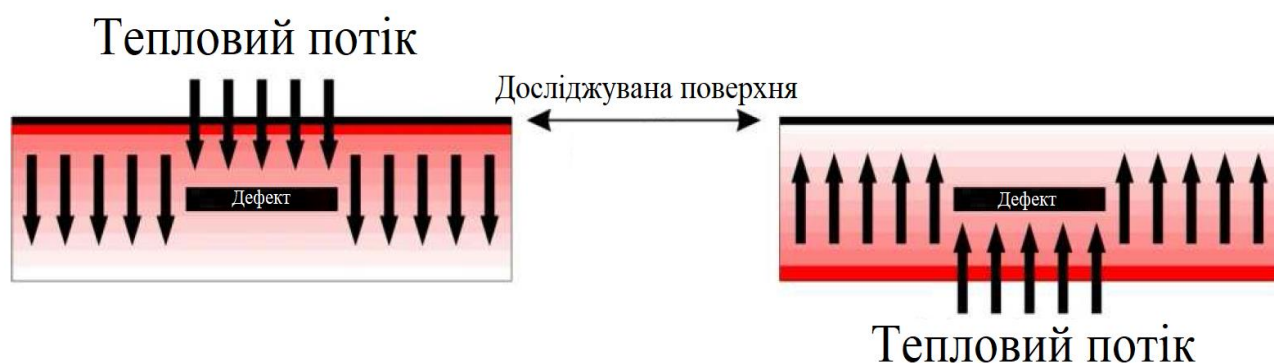


Рис. 1.6. Гарячі та холодні плями досліджуваної поверхні

Положення дефекту (глибина) може бути визначене на основі розподілу температури на поверхні охолодження. Дефекти, розташовані глибше під поверхнею, виявляються пізніше, і температурний контраст зменшується. Ці залежності можна записати приблизно в такий спосіб:

$$t \sim \frac{z^2}{\alpha} \text{ та } c \sim \frac{1}{z^3} \quad (1.9)$$

де t – час,

z – глибина,

c – температурний контраст,

α – теплова дифузійність.

Ступінчасте нагрівання

Ступінчастий метод нагрівання істотно схожий на Імпульсну термографію. Основною відмінністю є тривалість теплового імпульсу для збудження досліджуваного об'єкта. Більше того, варіації поверхневої температури контролюються як під час подачі ступінчастого нагриваючого імпульсу, так і за спадання температури на поверхні. Знижена щільність енергії теплової стимуляції дозволяє випробовувати більш товсті структури, виявляти приховану корозію та розшарування або оцінювати товщину шарів. Типовим джерелом нагрівання, що використовується в цьому методі, є аргонний лазер. Досліджувана поверхня може бути нагріта точково, лінійно або на повному полі.

Метод використовується як: оцінка товщини покриття, визначення цілісності зв'язку покриття-підкладка, оцінка композиційних конструкцій або виявлення прихованої корозії. На рис. 1.7 представлені як теоретичні, так і експериментальні результати активної ступінчастої термографії з нагриванням, де побудовано часову еволюцію нормованої температури для різних товщин цирконієвих покриттів порівняно з кроковим нагривальним імпульсом в одну секунду. У цьому типі експериментів час теплового проходження спостерігається, коли крива починає відходити від напівнескінченного випадку (що є прямою лінією на таких ділянках) [15].

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

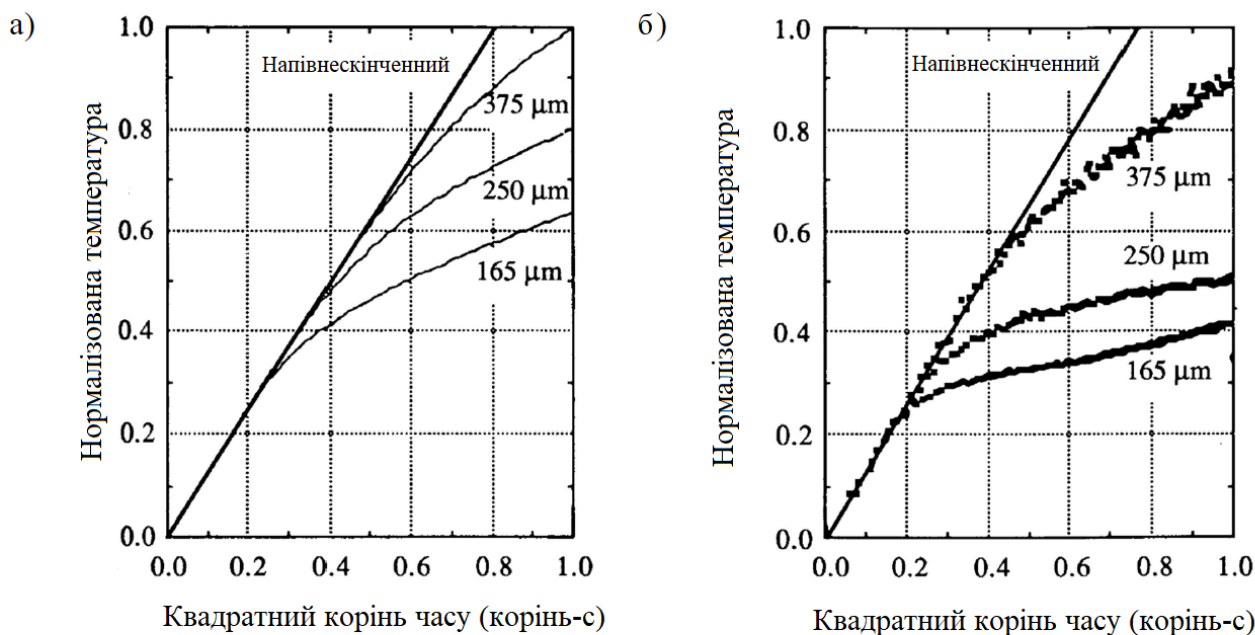


Рис. 1.7. Температура в порівнянні з квадратним коренем часу для різних товщин цирконієвих покриттів та ступінчастого імпульсу нагрівання
1с: а) теоретичний розрахунок, б) експериментальні результати

Емпіричний зв'язок товщини покриття (L) може бути описаний формулою (1.10), коли визначається час теплового проходження (t_t) та теплова дифузійна (α) [16]:

$$t_t = \frac{0.36L^2}{\alpha} \quad (1.10)$$

Фіксуєча термографія

У цьому методі, також відомому як модульована термографія, використовується аналіз теплових хвиль. Зразок стимулюється періодичним джерелом енергії (наприклад, за допомогою нагрівання лампи). Як правило, застосовуються синусоїдальні хвилі, хоча можна використовувати інші періодичні форми хвиль. Потім детектор інфрачервоного випромінювання дистанційно реєструє коливальне температурне поле на поверхні

досліджуваного об'єкта. Цей метод заснований на моніторингу точної часової залежності між записаним температурним сигналом та опорним сигналом (рис. 1.8.). Протягом кожного циклу нагрівання інфрачервона камера реєструє чотири точки даних, що дозволяє реконструювати теплову хвилю та встановити значення амплітуди (A) та фази (φ) для кожного пікселя в полі зору (див. Рівняння 3), отже, термограми і фазограми отримуються відповідно.

$$A(x_1) = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2} \text{ та } \varphi = a \tan \frac{S_3 - S_1}{S_3 - S_1} \quad (1.11)$$

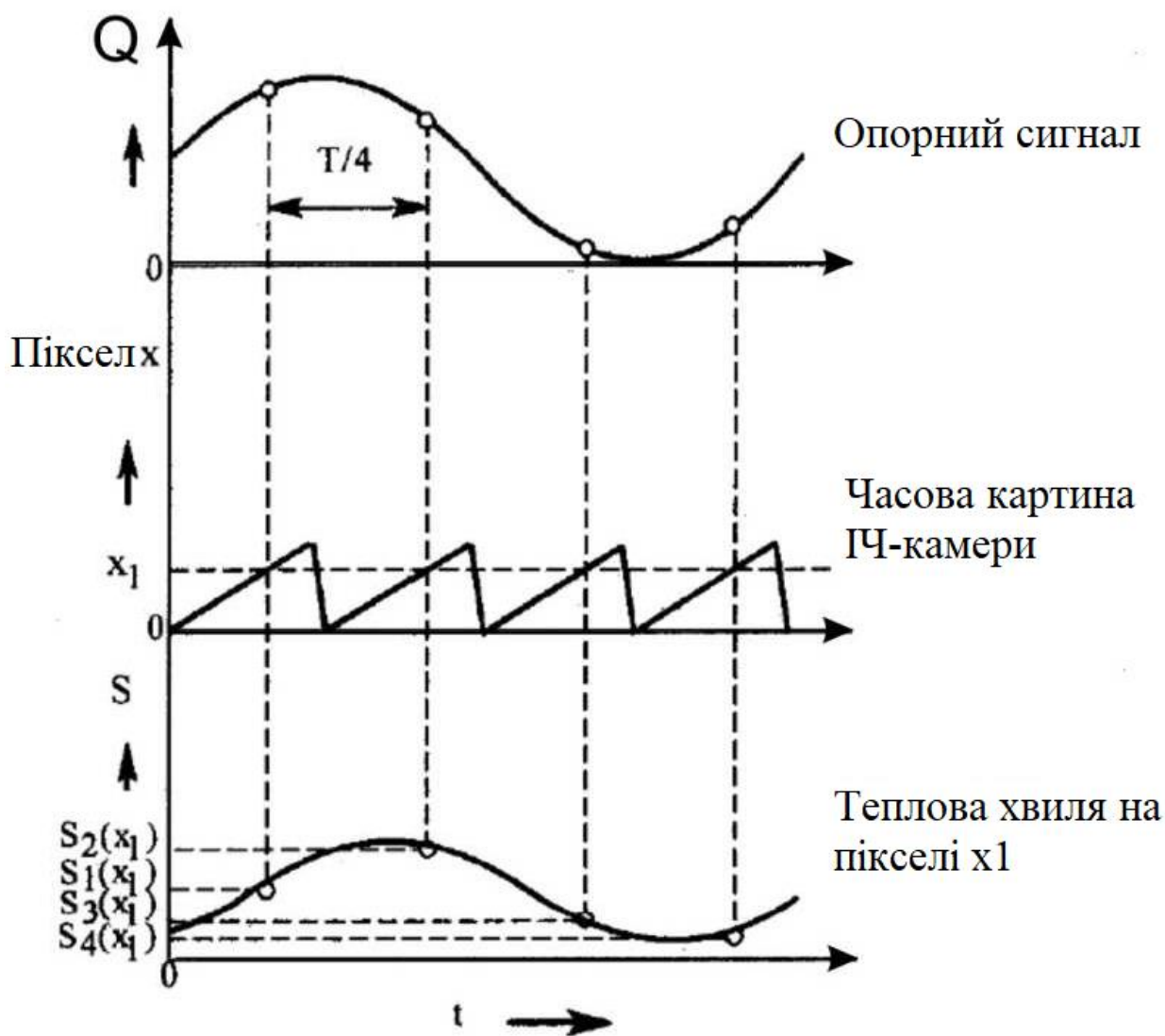


Рис. 1.8. Принцип обчислення фази та амплітуди щодо опорного сигналу в термофіксації

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таким чином, така система забезпечує три зображення: термограму, яка є картою розподілу температури на поверхні, фазограму, пов'язану з часом поширення теплової хвилі через матеріал (затримка між стимулюючим тепловим потоком і температурними полями, що генеруються як відповідь на це хвилювання) і амплітудне зображення, яке пов'язане з тепловою дифузією. Неоднорідні умови нагрівання, зміни випромінювальної здатності, відбиття або геометрія поверхні сильно впливають на термограми, тоді як фазограма відносно незалежна. Експериментальна установка досить схожа на розглянуті раніше (рис. 1.4), за винятком типу джерела зовнішнього збудження, яке можна реалізувати за допомогою потужних ламп, струменя гарячого повітря або механічних вібрацій.

Вібротермографія

Вібротермографія використовує ефект перетворення механічних коливань, що викликаються зовні, в теплову енергію. Власне кажучи, тепло може вироблятися при натиранні внутрішніх мікростінок дефектів, пластичних деформацій, які виникають, коли тріщини починають поширюватися або в'язкопружні втрати, що утворюються в деяких матеріалах, ці втрати більші в районах концентрації напружень. Важливо не перевищувати межі пружності матеріалу через можливість пошкодження або повного руйнування конструкції. Поверхневі та приповерхневі дефекти, такі як розриви тріщин та розшарування, виявляються за допомогою спостережень за поверхневим температурним полем, індукованим вібраціями [17]. Вібротермографія має значний промисловий інтерес завдяки її здатності швидко і точно виявляти тріщини та інші дефекти конструкцій.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

1.3. Принципи роботи тепловізора

Принцип роботи тепловізора ґрунтується на перетворенні інтенсивності випромінювання інфрачервоного діапазону довжин хвиль приймачем інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал.

Перетворення стає можливим зарахунок змін характеристик приймача випромінювання під дією цього випромінювання. Це може бути, наприклад, фотоефект. Іншими словами, надання електронам в приймачі випромінювання додаткової енергії від фотонів, які потрапляють на його поверхню. Також поширеним є резистивний ефект, що базується на зміні опору під дією температури приймача випромінювання, який, у свою чергу, нагрівається під дією випромінювання, і призводить до зміни напруги на приймачі випромінювання.

Вихідними даними тепловізора є двохколірне чи кольорове зображення. Кольори зображення відповідають певним температурам зображених об'єктів.

Спрощену загальну функціональну схему приладу теплового бачення зображено на рис. 1.9.

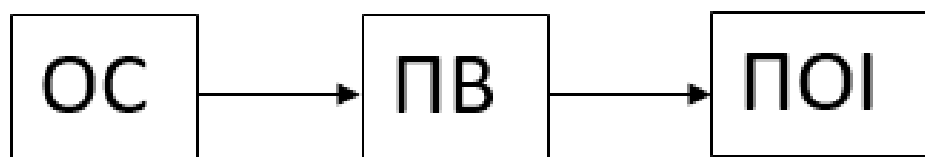


Рис. 1.9 Спрощена функціональна схема типового приладу для теплового бачення.

Виходячи із чіткості та точності значень температур отриманого зображення, його використовують для того щоб оцінити теплову картину. Тепловізори поділяються на два типи, а саме на споглядальні та вимірювальні. У вимірювальних тепловізорів присутня висока точністю визначення температури досліджувальних об'єктів. Споглядальні ж, у свою чергу, більш

орієнтовані на трансляцію потокового відео або його запис, що потребує дещо зменшену якість зображення.

Оптична система є необхідною частиною будь-якого тепловізора, оскільки використовується для фокусування теплового випромінювання об'єктів на чутливий датчик.

1.4. Сфери використання теплового неруйнівного контролю

На сьогоднішній день інфрачервоні неруйнуючі методи (IR NDT) широко використовуються для виявлення дефектів матеріалів завдяки забезпеченню економічної ефективності, ефективності та швидкості проведених досліджень. Вони можуть виявляти тріщини, пошкодження від удару, погіршення втоми або навіть вміст волокон без шкоди для цілісності конструкції. Оцінки можна проводити на виробничій лінії або протягом життєвого циклу компонентів. У порівнянні з традиційними методами контролю, що проводяться людиною, методи термографії можуть застосовуватися у складних (небезпечних для людини) умовах та дозволяють проводити постійну, рівномірну та повторювану оцінку. Цей метод потребує глибокого розуміння досліджуваного матеріалу та прикладної процедури перевірки [18, 19].

Композитні матеріали, такі як зміцнений волоконний пластик, широко використовуються у високоефективних застосуваннях завдяки своїм широко відомим перевагам: головним чином високій питомій міцності та жорсткості. Але варто згадати про їх ціну та доступність. Незважаючи на переваги цих матеріалів, вони також мають недоліки, головним чином, численні форми руйнувань (розшарування, розформування, розтріскування матриці тощо). Поєднання перерахованих режимів пошкодження може призвести як до локального ослаблення конструкції, так і до глобального збою (невиконання функціональних завдань). Тому раннє виявлення пошкоджень відіграє

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

життєво важливу роль, забезпечуючи бездоганність деталей для монтажу, експлуатацію без поломок і безпеку людей. Переваги, запропоновані термографією, добре підходять для цього завдання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Переваги та недоліки термографії

Переваги	Недоліки
Швидкий контроль	Висока вартість
Безконтактний контроль	Потребує кваліфікованого персоналу
Безпека користувача	Точність
Простота інтерпритації результатів	Ризик перегріву зразка (при активній термографії)
Широкий спектр застосувань	Обмеження допустимої товщини об'єкта контролю
Можливість контролю великих проц	Змінна випромінювальна здатність матеріалів
Унікальність контролю	Залежність від теплового контрасту

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто методи теплового неруйнівного контролю, методи та засоби визначення типу матеріалу та зроблено вибір на користь термографічного безконтактного вимірювання температури. Нині існує декілька методів визначення типів матеріалів. Проаналізувавши недоліки розглянутих методів, доцільним є застосування технологій теплового контролю. Використовуючи тепловий метод зпрощується процес діагностики, зменшуються часові витрати на її проведення та підвищується загальна точність вимірювань. Так як патерн охолодження матеріалу формує унікальний температурний профіль, який є характерним тільки для певного типу матеріалу, він може слугувати надійним показником при вимірюваннях.

Отримані результати у межах переддипломної практики дають поштовх до подальшої побудови оптичної системи приладу, підбору елементів та побудови електронно принципової схеми тепловізора.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІЗОРУ

2.1. Розробка структурної схеми приладу

Структурна схема розроблювального приладу для визначення типу матеріалу тепловим методом зображено на рис. 2.1.

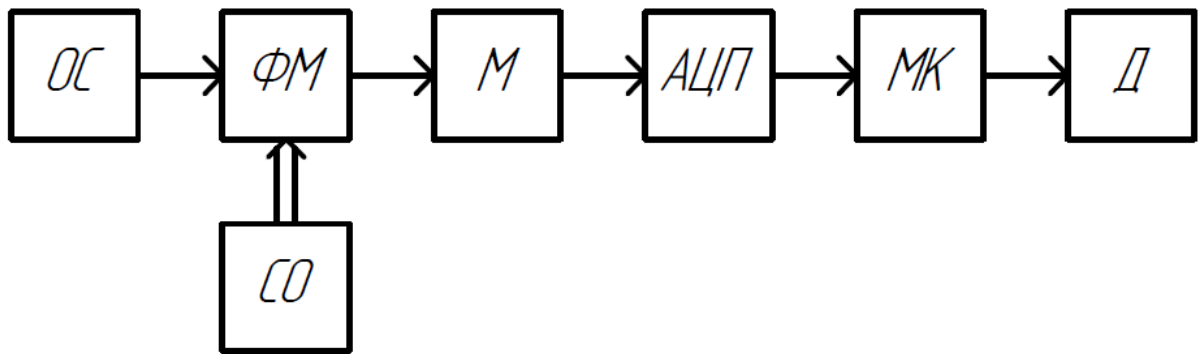


Рис. 2.1. Структурна схема тепловізора

Позначення:

- ОС – оптична система
- ФМ – фокальна матриця з підсилювачами
- СО – система охолодження, М-мультиплексор
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- МК – мікроконтролер
- Д – дисплей

Тепловізор має ПЗЗ-матрицю, через яку проходить теплове випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта. Далі сигнал проходить через МХ для керованої передачі інформації на вихідний канал. Наступним кроком є проходження сигналу через Ф, після якого вже відфільтрований сигнал потрапляє до АЦП, проходить через FIFO для організації отриманих даних та МК для подальшої обробки. Отримані дані виводяться на Д для

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

сприйняття їх користувачем. Керування системою здійснюється за допомогою БУ.

2.2. Розробка функціональної схеми приладу

Структурна схема прилада, що приведена на рис. 2.1, була покладена в основу функціональної схеми тепловізора для визначення типу матеріалу за тепловий профілем об'єкту контролю. Розроблену схему приведено на рис. 2.2.

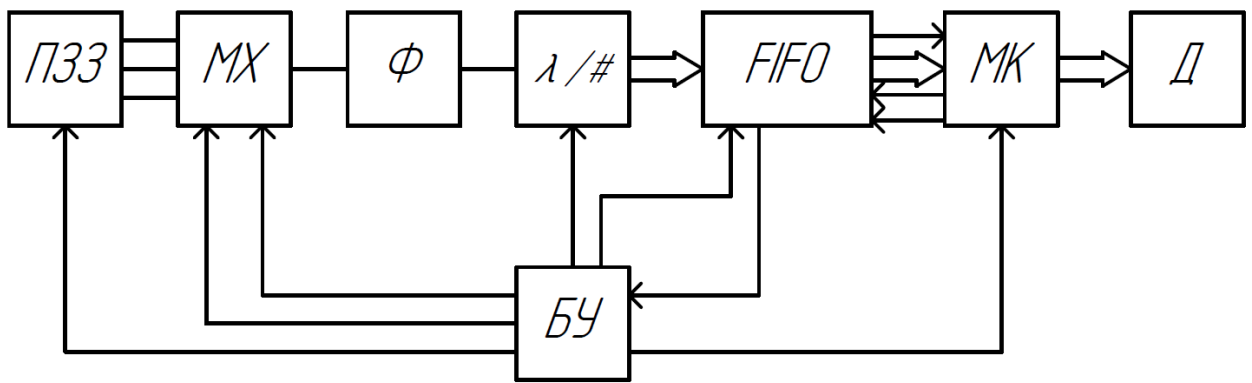


Рис. 2.2. Функціональна схема тепловізора

- ПЗЗ – ПЗЗ-матриця
- МХ – Мультиплексор
- Ф – фільтр
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- FIFO – система організації даних FIFO
- МК – мікроконтролер
- Д – дисплей
- БУ – блок управління

Тепловізор має ПЗЗ-матрицю (ПЗЗ), через яку проходить теплове випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта. При проходженні матриця записує випромінювання, виконуючи роль приймача випромінювання. Сама

ПЗЗ-матриця складається з світлочутливих фотодіодів та виконана на основі кремнію, що використовує технологію ПЗЗ - приладів із зарядним зв'язком. В кремнієвій підкладці при подачі напруги через полікремнієві затвори змінюються електричні потенціали поблизу електродів. Далі комбінація напруг на електродах створює потенційну яму, в якій можуть накопичуватися електрони, що утворилися в даному пікселі матриці в результаті впливу світла при експонуванні. Чим інтенсивніше світловий потік під час експозиції, тим більше накопичується електронів в потенційній ямі, відповідно тим вище підсумковий заряд даного пікселя. Після експонування послідовні зміни напруги на електродах формують в кожному пікселі і поруч з ним розподіл потенціалів, яке призводить до перетікання заряду в заданому напрямку, до вихідних елементів матриці.

Далі сигнал проходить через мультиплексор (МХ), який дозволяє одночасно передавати кілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну на різних несучих частотах.

Наступним кроком є проходження сигналу через фільтр(Ф) низької частоти (ФНЧ), застосовуваний на вході АЦП для підвищення якості оцифровки сигналу. Потім вже відфільтрований сигнал потрапляє до АЦП, що перетворює вхідний аналоговий сигнал в дискретний код. В подальшому вже цифровий сигнал проходить через FIFO для організації та маніпулювання отриманими даними щодо часу і пріоритетів, та мікроконтролер (МК) для подальшої обробки. Отримані дані виводяться на дисплей (Д) для сприйняття їх користувачем. Керування системою здійснюється за допомогою БУ.

2.2. Розрахунок об'єктива тепловізора

Оптична система є однією з найважливіших частин будь-якого приладу для реєстрації електромагнітного випромінювання. В тепловізорах застосовують оптичні системи, що працюють лише в заданому діапазоні

									Арк.
									38
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис А	Дата	ПК 71.130000.000ПЗ			

довжин хвиль. Для такого приладу, що працює у діапазоні 8-14 (LWIR) необхідно спроектувати відповідну заданому діапазону оптичну систему.

При проектуванні оптичної системи тепловізора однією з вимог до проектуємої моделі є її компактність. Буде доцільно, якщо довжина цього приладу не буде перевищувати 150 мм. Тепловізор є оптико-електронним пристроєм, який перетворює випромінювання діапазону хвиль LWIR у видимий спектр.

Згідно з технічним завданням слід досягнути таких характеристик оптичної системи приладу:

Задня фокусна відстань системи: 22,549

Задній фокальний відрізок системи: 4,28

Загальна довжина оптичної системи: 56,548

Спектральний діапазон: 8...14

Кут поля зору: 5

В першу чергу необхідно забезпечити захист оптичної системи. Для цього перед лінзами оптичної системи встановлюється проско-паралельна пластина. За пластиною розташовується вся оптична система, що у межах даного дипломного проекту складається з двох груп лінз. Перша група лінз складається з двох лінз, де перша має позитивне значення радіуса кривизни, а друга – від'ємне значення, та слугує для фокусування випромінювання. Їх форма та взаємне розташування показане на рис 2.3.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	

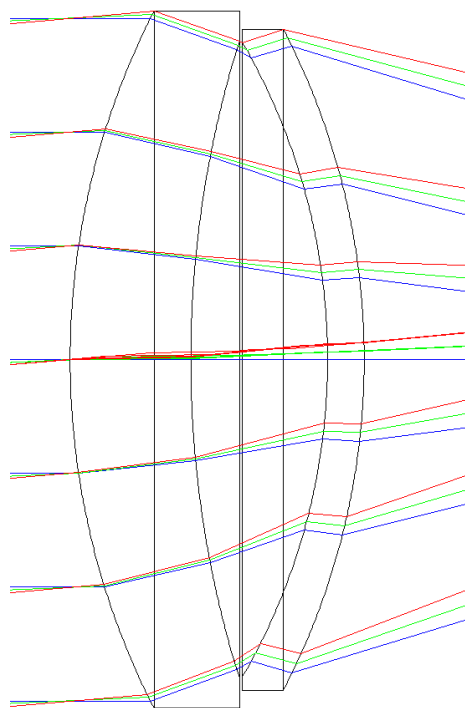


Рис 2.3. Перша група лінз

Після фокусування випромінювання першою групою лінз, воно потрапляє на другу групу лінз, завдання яких вже полягає у фокусуванні випромінювання на матриці.

Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата

ПК 71.130000.000ПЗ

Арк.

40

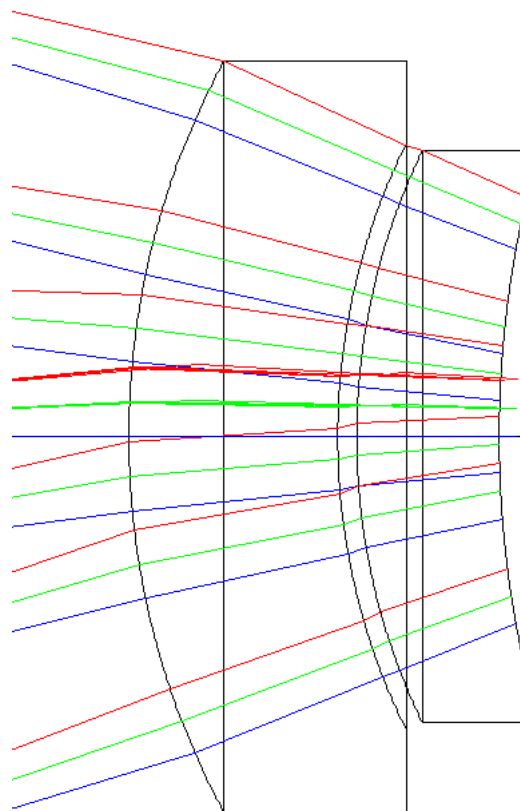


Рис 2.4. Друга група лінз

Другу групу лінз складають дві лінзи типу меніск з позитивним значенням радіуса кривизни для обох з них.

Моделювання оптичної системи проводиться у САПР Zemax [20, 21]. Параметри системи приведені на рис 2.5.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		Infinity	2.000	GERMANIUM	20.394
2	Standard		Infinity	4.000		20.350
STO	Standard		45.000	7.058	GERMANIUM	20.429
4	Standard		62.768	8.000		18.671
5	Standard		-37.200	2.140	GERMANIUM	18.582
6	Standard		-42.020	15.535		19.361
7	Standard		28.947	7.654	GERMANIUM	13.775
8	Standard		24.178	0.698		10.712
9	Standard		23.980	5.220	GERMANIUM	10.493
10	Standard		38.647	4.243		8.765
IMA	Standard		Infinity	-		2.017

Рис 2.5. Параметри проектуємої оптичної системи в САПР Zemax

Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис

ПК 71.130000.000ПЗ

Арк.

41

Для оцінки якості оптичної системи можна скорисатися вбудованим аналізом програми. Основними критеріями будуть:

- Відносна освітленість
- Модуляційна передавальна функція
- Функція концентрації енергії
- Діаграми плям розсіювання

Відносна освітленість

Відносна освітленість демонструє розмір поля, в якому відбувається фокусування зображення на поверхні приймача випромінювання, а також кількість випромінювання на ній. Zemax пропонує функцію «Illumination scan», яка демонструє значення кількості випромінювання у полі приймача випромінювання. Функція приведена на рис 2.6.

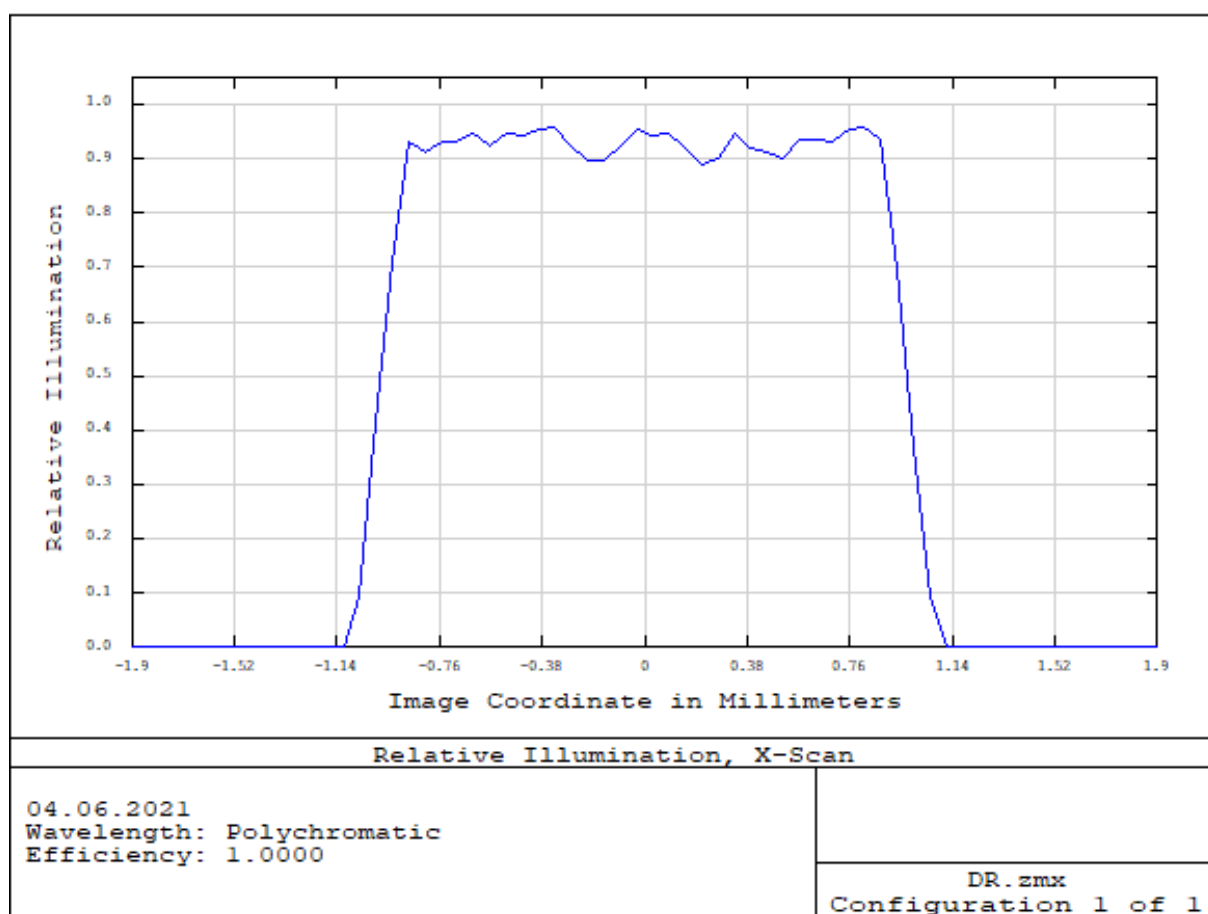


Рис 2.6. Функція Illumination scan САПР Zemax

Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис

Модуляційна передавальна функція

Модуляційна передавальна функція (МПФ) характеризує рівень контрасту в зображенні оптичної системи в залежності від просторової частоти для періодичного об'єкту (наприклад, гармонійної періодичної ґратки), відображаючи таким чином просторово-частотні характеристики якості зображення оптичної системи. Zemax має вбудовану команду FFT MTF для відображення МПФ.

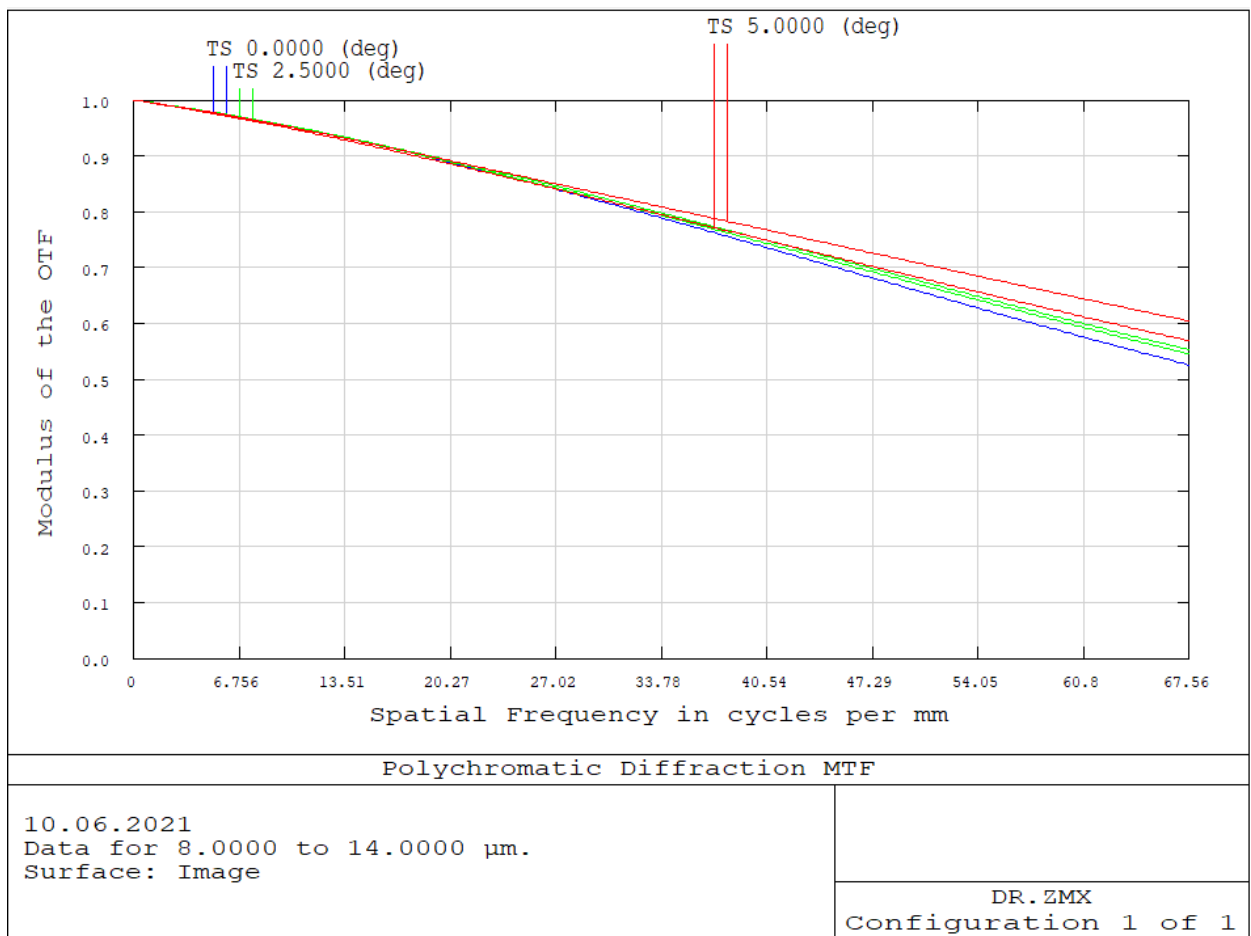


Рис 2.7. Функція FFT MTF САПР Zemax

Для відображення актуальних значень для конкретної оптичної системи необхідно розрахувати частоту Найквіста для системи.

$$\mu_H = \frac{1}{2q}, \text{мм}^{-1} \quad (2.1)$$

Де q – розмір пікселя приймача випромінювання.

Для обраного ПВ $\mu_H = 67.56 \text{ мм}^{-1}$. Для зображальних оптичних систем достатнім рівнем прийнято вважати МПФ вище 50%.

Функція концентрації енергії

ФКЕ характеризує рівень концентрації енергії в плямі розсіювання оптичної системи або в площадці плями розсіювання певного розміру, відображаючи енергетичні характеристики якості зображення оптичної системи. В Zemax ця функція представлена як Encircled Energy.

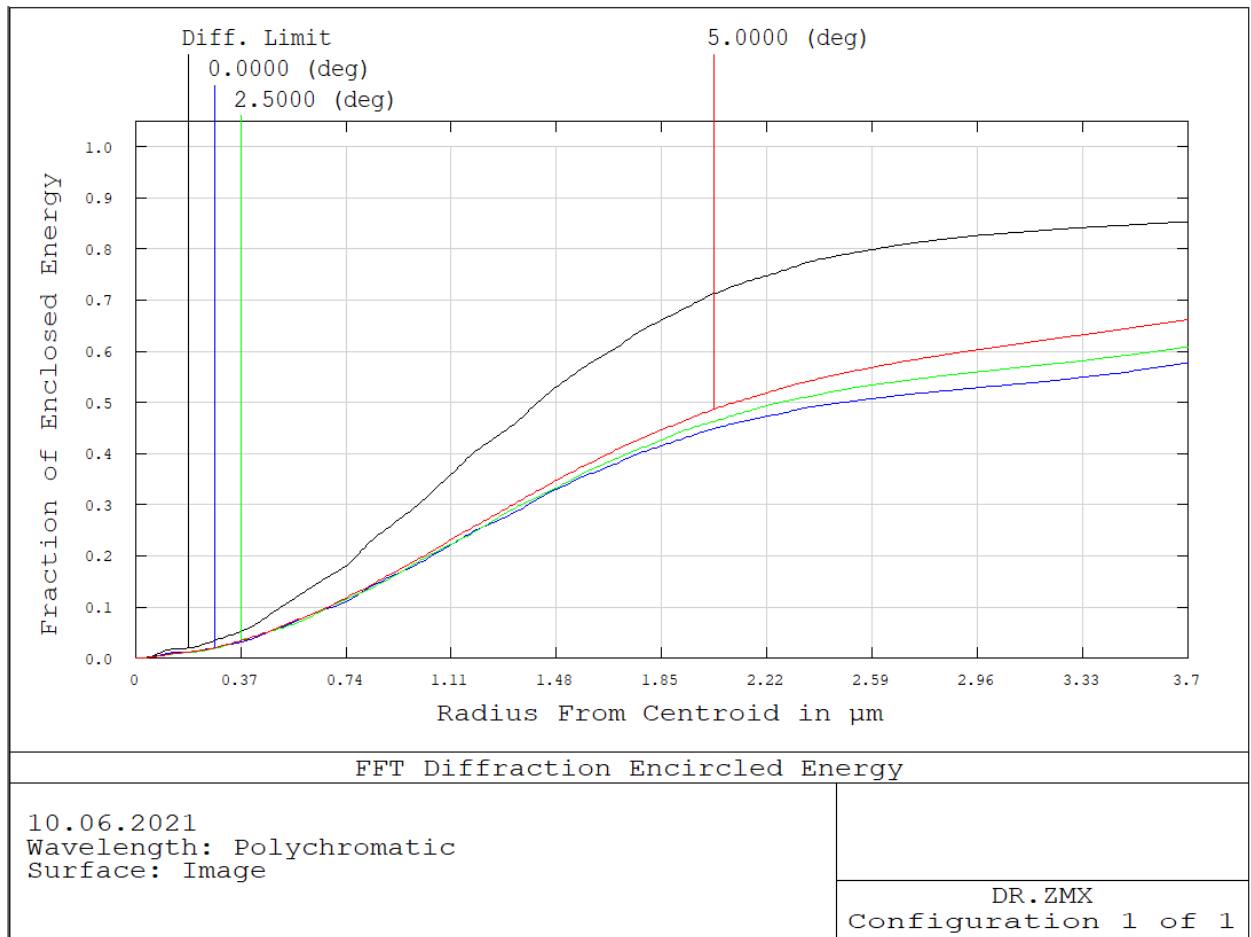


Рис 2.8. Функція Encircled Energy

Діаграми плям розсіювання

На діаграмі плям розсіювання наведена форма і геометричний розмір

									Арк.
									44
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	А	Дата			

плям розсіювання відповідно до спектрального діапазону роботи системи і обраних для аналізу кутів поля зору, що дозволяє комплексно оцінити геометричні характеристики якості зображення оптичної системи. Відобразити її в Zemax можна через функцію Spot Diagram.

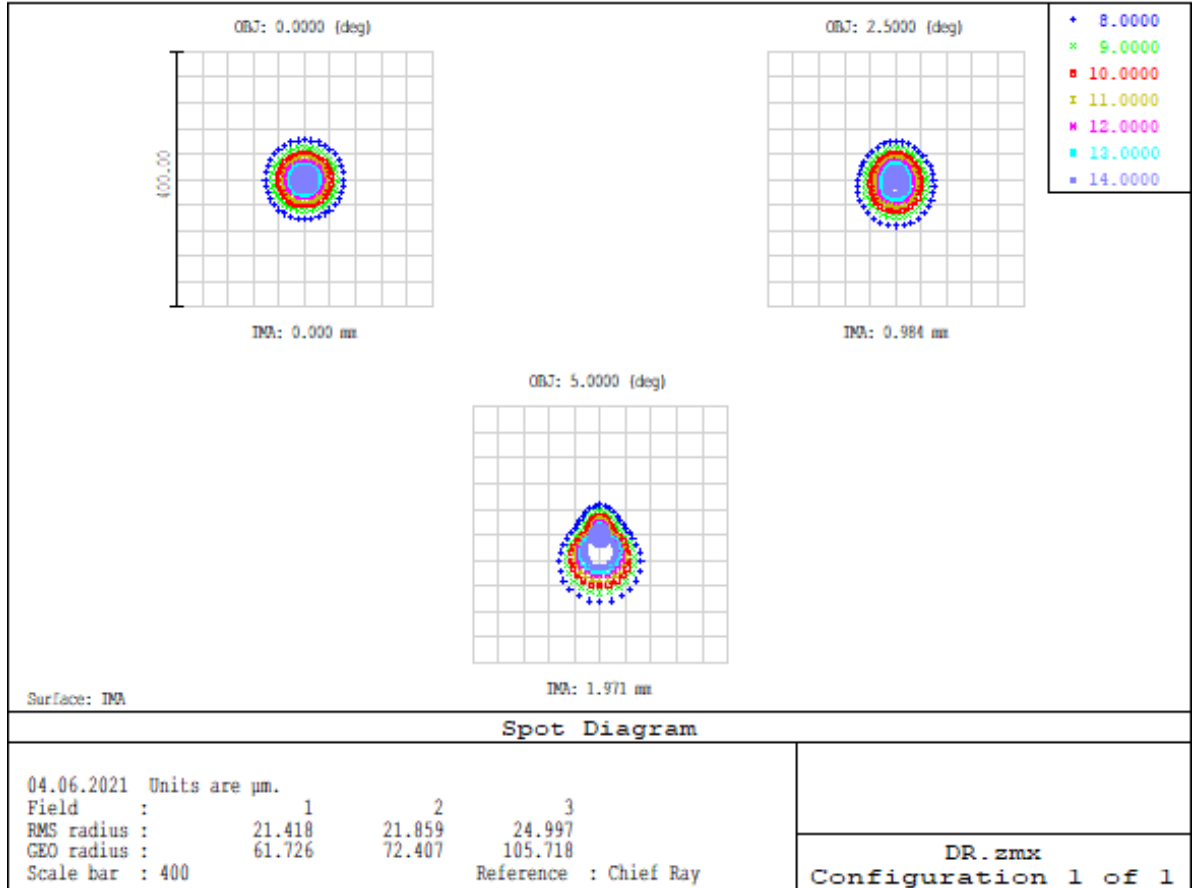


Рис 2.9. Функція Spot Diagram

2.3. Визначення параметрів ПЗЗ-матриці та аналого-цифрового перетворювача

В якості ПЗЗ-матриці для розроблювального приладу визначення типу матеріалу було обрано матрицю для швидкісних відеокамер KAI-0340 виробництва компанії Kodak Image Sensor Solutions [22].

Загальний зовнішній вигляд KAI-0340 наведено на рис. 2.10.

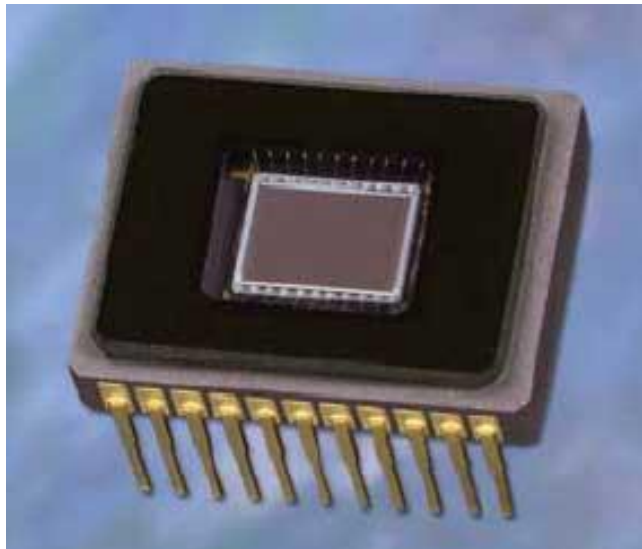


Рис. 2.10. Загальний вигляд матриці KAI-0340

Характеристики монохромної ПЗЗ-матриці KAI-0340D:

- Загальна кількість пікселів матриці 640 x 480
- Розмір одного пікселя становить 7,4 мкм x 7,4 мкм
- Можливість вибору розміру області інтересу при скануванні
- При зменшенні розміру вікна сканування можна збільшити частоту кадрів (список можливих значень наведено нижче)
 - Електронний затвор забезпечує одночасну експозицію всіх пікселів матриці відеокамери. Час експозиції для всіх елементів матриці може змінюватися від 20 мкс до 16 мс на частоті 60 Гц
 - Квантова ефективність матриці до 53%
 - Чутливість матриці 3,1 В / Люкс / с
 - Динамічний діапазон > 60 дБ
 - Коефіцієнт перетворення 31 $\mu\text{V} / \text{e}$
 - Споживана потужність до 4 Ватт
 - Напруга живлення 8-32 В
 - Робоча температура від 0 до +45 градусів С

Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис
				Дата

Мультиплексор захоплює дані з матриці всі одночасно $640 * 480$, таким чином АЦП повинен встигнути зчитати всі дані всіх пікселів. У ПЗЗ-матриці КАІ-0340D, яка була обрана для використання в розроблювальному пристрої зчитування температурних профілей з поверхні об'єкту контролю, є час на експозицію кадру, це той час за який на виході мультиплексора буде сигнал кожного з пікселів. Через такий же проміжок часу відбудеться зміна сигналу, а значить за цей час АЦП має встигнути опитати всі пікселі.

Загальна кількість пікселів на матриці становить $640*480$. Тобто сумарно 307200 пікселей.

$$640 * 480 = 307200$$

Час експозиції для всіх елементів обраної матриці може змінюватися від 20 мкс до 16 мс на частоті 60 Гц:

$$t_{e1} = 0.00002 \text{ с}$$

$$t_{e2} = 0.016 \text{ с}$$

Розрахуємо мінімальну та максимальну частоту експозиції матриці наступним чином:

$$f_1 = \frac{1}{0.00002} = 5 * 10^4 \text{ Гц} = 50 \text{ КГц}$$

$$f_2 = \frac{1}{0.016} = 62.5 \text{ Гц}$$

Обчислимо мінімальний та максимальний час експозиції одного пікселю:

$$t_1 = \frac{0.00002}{307200} = 6.51 * 10^{-11} \text{ с}$$

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	ПідписА	Дата	

$$t_2 = \frac{0.016}{307200} = 5.208 * 10^{-8} \text{ c}$$

За часом експозиції одного пікселу визначимо мінімальну та максимальну частоту дискретизації АЦП:

$$F_1 = \frac{1}{6.51 * 10^{-11}} = 1.536 * 10^{10} = 15.36 \text{ ГГц}$$

$$F_2 = \frac{1}{5.208 * 10^{-8}} = 1.92 * 10^7 = 19.2 \text{ МГц}$$

Для реалізації зчитування даних з матриці такої частоти оптимальним вибором буде АЦП з частотою дискретизації 160 МГц. У якості АЦП був обран AD9262 на 16 розрядів, з частотою 160 МГц та паралельним інтерфейсом.

Характеристики АЦП AD9262:

- SNR: 83 дБ (85 дБФС) до 10 МГц на вході
- SFDR: від -87 дБ до 10 МГц
- Показник шуму: 15 дБ
- Вхідний опір: 1 кОм
- Потужність: 600 мВт
- Робота аналогового живлення 1,8 В
- Вихідне живлення від 1,8 до 3,3 В
- Вибір смуги пропускання
2,5 МГц / 5 МГц / 10 МГц реальна
5 МГц / 10 МГц / 20 МГц уявна
- Швидкість вихідних даних: від 30 MSPS до 160 MSPS

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	ПідписА	Дата	

Однією з вимог до АПЦ є те, що шуми АЦП мають бути менші за шуми на матриці.

Обчислимо SNR за кількістю розрядів АПЦ:

$$SNR = 6.02 * 16 + 1.76 = 98.08 \text{ Дб}$$

На даташиті обраного АЦП вказано, що його SFDR становить 87 Дб. За цими даними розрахуємо кількість ефективних розрядів АЦП наступним чином:

$$N_{re} = \frac{87 - 1.76}{6.02} = 14.159 \sim 14$$

Визначимо звуковий тиск на матриці:

$$60 = 1000$$

Розрахуємо рівень шумів на матриці:

$$\frac{0.2}{1000} = 2 * 10^{-4} = 200 \text{ мкВ}$$

Визначимо звуковий тиск на АЦП:

$$84 = 20000$$

За цими даними розрахуємо рівень шумів на АПЦ:

$$\frac{2}{20000} = 1 * 10^{-4} \text{ В} = 100 \text{ мкВ}$$

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	

Таким чином, рівень шумів АЦП значно менше за рівень шумів матриці, а отже, за рівнем шумів АПЦ також підходить.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено проектування вузлів тепловізора – розроблено структурну та функціональну схеми приладу для визначення типу матеріалів, розглянуті принципи роботи приладу на основі цих схем.

За допомогою САПР Zemax була спроектована оптична система термометру. Отримані характеристики системи були проаналізовані вбудованими в середовище функціями.

Здійснено аналітичний розрахунок АЦП для узгодження його параметрів з параметрами обраного приймача випромінювання, розраховані шуми ПЗЗ-матриці та шуми АЦП.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	

РОЗДІЛ 3. ПІДБІР КОМПЛЕКТУЮЧИХ ДЛЯ ТЕПЛОВІЗОРА

3.1. Пам'ять (FIFO)

У рамках цього проекту була обрана мікросхема AL460. На рис. 3.9 показано розташування виводів AL460.

Пам'ять AL460 має повністю незалежні вхідні та вихідні порти. Вбудовані схеми управління адресою та показником забезпечують прямий інтерфейс шини для послідовного використання зчитування та запису пам'яті.

AL460 використовує високоефективні технології з розширеними функціями контролера, що дозволяє з максимальною ефективністю застосовувати нелінійність FIFO для читання та запису для в системах відеоспостереження.



Рис 3.1. Розташування виводів AL460

AL460 спроектований та виготовлений з використанням сучасних технологій низького споживання струму, що забезпечує високу

						ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата		51

енергоєфективність та продуктивність системи нарівні з невеликим споживанням електроенергії. Невеликий розмір мікросхеми спрощує проектування та дозволяє застосовувати її в мобільних переносних системах.

Особливості:

- Щільність 128-Мбіт, 8М x 16-бітна конфігурація;
- Підтримує відео NTSC, PAL та HDTV до роздільної здатності 1080 пікселів;
- Підтримка відео NTSC, PAL та HDTV до роздільної здатності 1080p
- Наявність незалежних 16-бітних операцій зчитування та запису при максимальній швидкості в 150 МГц;
- Високошвидкісний синхронний послідовний доступ;
- Управління активацією вводу та виводу;
- Можливість вибору полярності;
- Блок живлення 2,5 В і 3,3 В;
- Стандартний 128-контактний LQFP.

3.2. Мікроконтролер STM32F103x8

Мікроконтролером в межах даної дипломної роботи буде слугувати STM32F103x8, лінійна блок-схема роботи якого наведена на рис. 3.2. Характеристики цієї мікросхеми наступні:

- Ядро процесора ARM 32-біт Cortex-M3
 - Максимальна частота 72 МГц, продуктивність 1,25 МГц при 0 очікуванні доступу до пам'яті
 - Одноциклове множення та апаратний поділ
- Пам'ять
 - 64 або 128 Кбайт флеш-пам'яті
 - 20 Кбайт SRAM
- Годинник, скидання та управління живленням
 - живлення додатків та входів / виходів від 2,0 до 3,6 В

									Арк.
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис А	Дата	ПК 71.130000.000ПЗ			

- POR, PDR та програмований детектор напруги (PVD)
- Кристалічний генератор від 4 до 16 МГц
- Внутрішній 8 МГц RC із заводською обробкою
- Внутрішній RC 40 кГц
- PLL для годинника процесора
- Осцилятор на 32 кГц для RTC з калібруванням
- Енергоефективність
 - Режими сну, зупинки та очікування
 - VBAT живлення для RTC та резервних реєстрів
- 2 x 12-бітові, 1 мкс А / D перетворювачі (до 16 каналів)
 - Діапазон перетворення: від 0 до 3,6 В
 - Подвійна вибірка та можливість утримання
 - Температурний сенсор
- DMA
 - 7-канальний контролер DMA
 - Підтримується периферія: таймери, АЦП, SPI, I2C та USART
- До 80 портів швидкого вводу-виводу, всі вони відображаються на 16 векторах зовнішніх переривань і майже всі здатні витримати 5 V
- Режим Debug
 - Інтерфейси налагодження Serial wire debug (SWD) та JTAG
- 7 таймерів
 - Три 16-бітові таймери, кожен з до 4 IC / OC / PWM або лічильником імпульсів та квадратурним (інкрементальним) входом кодера
 - 16-розрядний таймер ШІМ управління двигуном з генеруванням часу та аварійною зупинкою
 - 2 сторожові таймери (незалежний та віконний)
 - 24-розрядний спадний лічильник таймера SysTick

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис		Дата

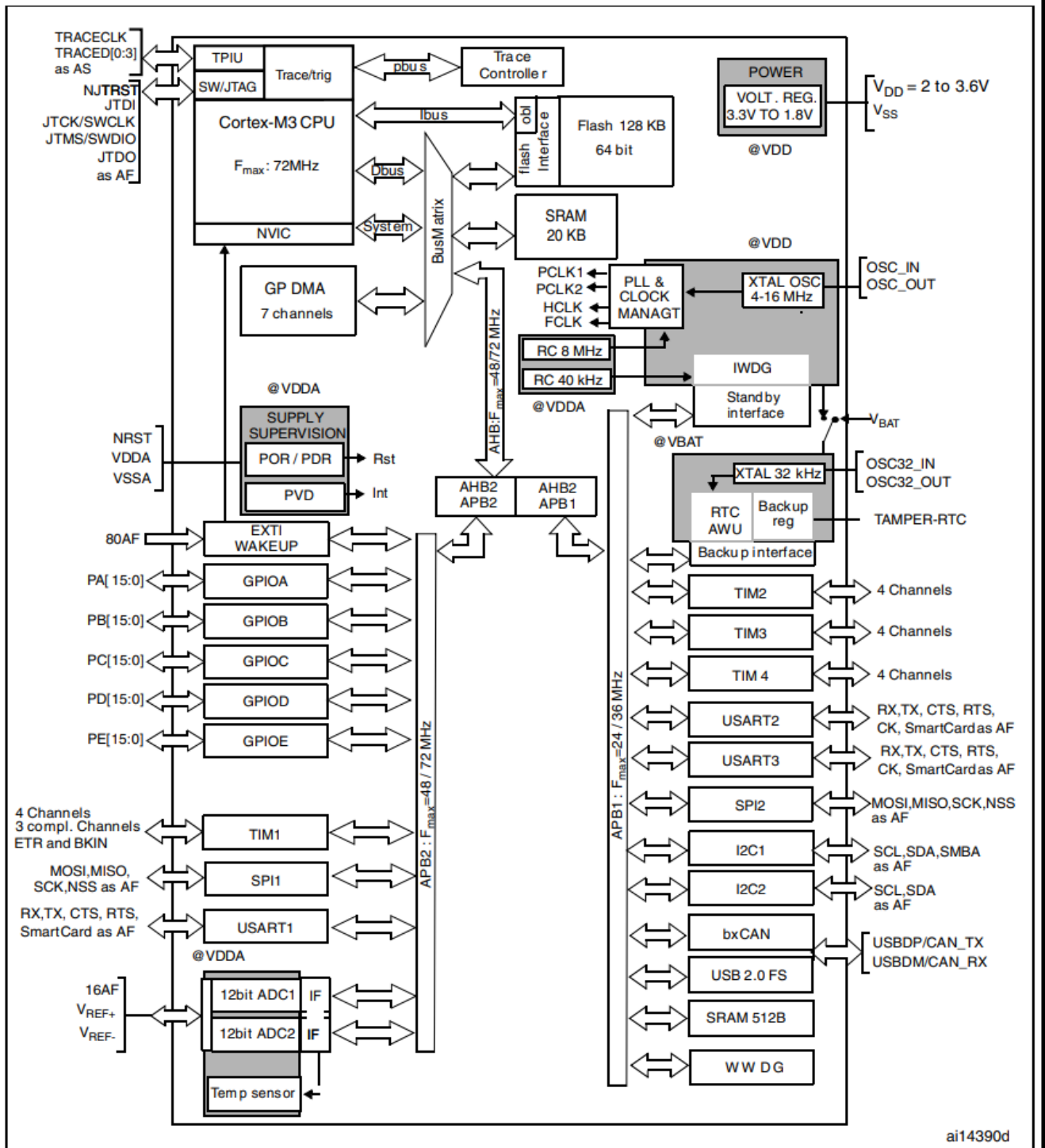


Рис. 3.2. Блок діаграма портів і протоколів мікропроцесора

- До 9 інтерфейсів зв'язку
 - До 2 інтерфейсів I2C (SMBus / PMBus)
 - До 3 USART (інтерфейс ISO 7816, LIN, сумісність IrDA, управління модемом)
 - До 2 SPI (18 Мбіт / с)

Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис

- CAN-інтерфейс (2.0В Active)
- Повношвидкісний інтерфейс USB 2.0

3.3. Вибір дисплею

Для виведення інформації ми скористаємося дисплеєм ER-TFTM050-3. Він має наступні характеристики:

- Роздільна здатність: 800x480 пікселів
- RGB дисплей
- Діагональ: 5 дюймів
- Інтерфейс:
 - підтримка 3-провідного, 4-провідного SPI, I2C
- Напруга живлення: +3.3В
- Яскравість: 300 cd/m²

На рис. 3.3 зображений зовнішній вигляд керуючої плати дисплею.

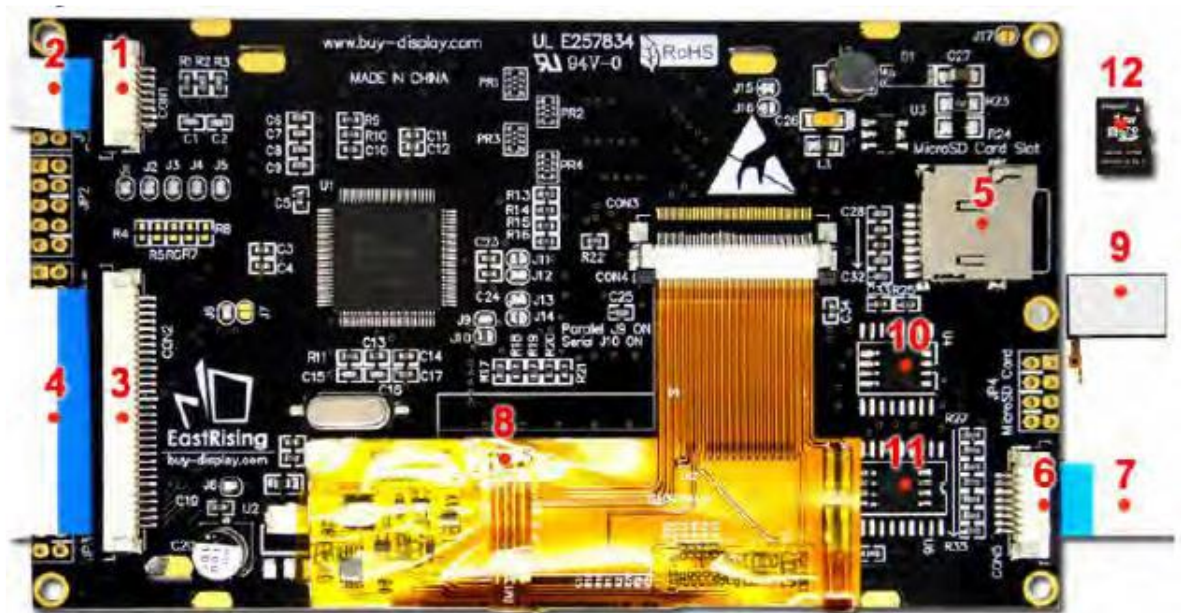


Рис. 3.3. Керуюча плата дисплею

									Арк.
									55
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	ПК 71.130000.000ПЗ			

3.4. Лазерне джерело

Оскільки визначення типу матеріалу здійснюється шляхом зчитування змін в температурному профілі об'єкта контролю, необхідний лазерний модуль для нагрівання зразка. У рамках даного дипломного проекту лазерний модуль фігурує як окремий пристрій та не входить в технічне завдання.

Для обраного типу контролю буде достатньо лазера потужністю 1 Вт.

Наведемо приклад характеристик лазера:

- Напруга: 5 В
- Довжина хвилі: 405/450 нм
- Потужність: 1000 мВт, 1 Вт
- Струм: 0,2 - 0,4 А
- Підключення: 2 пін
- Охолодження: Пасивне

На рис. 3.4. зображений приклад лазерного модуля з вищезазначеними характеристиками.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	



Рис. 3.4. Приклад лазера для нагрівання зразка

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено підбір комплектуючих для розроблюваного тепловізору. Було підбрано пам'ять FIFO, що дозволить зчитувати дані з матриці без втрат. Обран мікропроцесор, за допомогою якого було проводиться керування та узгодження процесів між іншими компонентами приладу. Підбран дисплей, який дозволить спотерігати дані та результати отримані приладом для визначення типу матеріалу.

Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата

ПК 71.130000.000ПЗ

Арк.

57

ВИСНОВКИ

У першому розділі дипломного проекту, присвяченого розробці приладу для автоматизованого визначення типу матеріалу тепловим методом контролю було розглянуто різні методи та засоби, які застосовуються для класифікації матеріалів. Розглянуті аудіовізуальна класифікація та класифікація на контактній основі. Був приведений тепловий метод контролю для визначення типу матеріалу, а також його переваги, що стало приводом зробити вибір на користь цього методу, а саме на використання тепловізора для поставлених задач. Розглянуті фізичні основи теплового неруйнівного контролю, активна та пасивна термографії. Проаналізовані термографічні методи неруйнівного контролю, а саме: імпульсна термографія, ступінчпасте нагрівання, фіксує термографія та вібротермографія. Були розібрані принципи роботи тепловізора. Приведені сфери використання теплового неруйнівного контролю.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	

Список використаних джерел

- [1] Giguere P, Dudek G. A simple tactile probe for surface identification by mobile robots. IEEE Trans Robotics. 2011 Jun;27(3):534–544.
- [2] Baglio S, Cantelli L, Giusa F, et al. Intelligent prodder: implementation of measurement methodologies for material recognition and classification with humanitarian demining applications. IEEE Trans Instrum Meas. 2015 Aug;64(8):2217–2226.
- [3] Taniguchi T, Takano T, Yoshino R. Multimodal hierarchical dirichlet process-based active perception. Cornell University Library Online; 2015 [cited 2017 Nov 21].
- [4] Технології електромагнітного неруйнівного контролю. Лабораторний практикум / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с. – Назва з екрана.
- [5] Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс] / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 264с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27002> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.
- [6] Brandao M. Material recognition CNNs and hierarchical planning for biped robot locomotion on slippery terrain / M. Brandao, Y. Shiguematsu, K. Hashimoto // Cancun. – 2016. – С. 81-88.
- [7] Liu H. Surface material recognition through haptic exploration using an intelligent contact sensing finger / H. Liu, X. Song, J. Vimbo // Vilamoura. – 2012. – С. 52–57.
- [8] Галаган Р.М. Застосування нейромережових технологій для вирішення обернених задач неруйнівного контролю / Р. М. Галаган, А. С. Момот // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування:

									Арк.
									59
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис	Дата	ПК 71.130000.000ПЗ			

стан і перспективи», 16-17 травня 2017 р., м. Київ, Україна : збірник тез доповідей. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 144.

- [9] Aujeszky T. Thermography-based material classification using machine learning / T. Aujeszky, G. Korres, M. Eid // IEEE International Symposium on Haptic Audio-Visual Environments and Games – Abu Dhabi. – 2017. – С. 1-6.
- [10] Momot, A. Defect classification in active thermal testing with the use of neural networks / A. Momot // Матеріали III науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі» з міжнародною участю – NDT – UA 2019, 17-19 вересня 2019 року, м. Київ, Україна. – Київ : УТ НКТД, 2019. – С. 16-18
- [11] Головинов А.О. Преимущества нейронных сетей перед традиционными алгоритмами / А.О. Головинов, Е.Н. Климова // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по матер. V междунар. научно-практической конференции.– № 5(5). – Новосибирск: СибАК, 2017. – С. 11-15.
- [12] Huth S. Lock-in IR-Thermography a novel tool for material and device characterization / S. Huth, O. Breitenstein, A. Huber // Diffus Defect Data Part B Solid State Phenom. – 2002.
- [13] Raad P. Non-contact surface temperature measurements coupled with ultrafast real-time computation / P. Raad, P. Komarov, M. Burzo // Twenty-Third Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. – 2007. – С.57-63.
- [14] Ionescu C. Studies on thermal properties of substrates for electronics using IR thermography / C. Ionescu, M. Branzei, B. Mihailescu // IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). – 2014. – С.45-49.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	ПідписА		Дата

- [15] Usamentiaga R. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing / R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga // Sensors. – 2014.
- [16] Dong H. Infrared sequence transformation technique for in situ measurement of thermal diffusivity and monitoring of thermal diffusion / H. Dong, B. Zheng, F. Chen // Infrared Phys Technol. – 2015. – С.130-140.
- [17] Aujeszky T. Measurement-based thermal modeling using laser thermography / T. Aujeszky, G. Korres, M. Eid // IEEE Trans Instrum Meas. – 2018.
- [18] Протасов, А. Г. Технології теплового неруйнівного контролю / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133 с.
- [19] Петрик В.Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі: навчальний посібник / В.Ф. Петрик, А.Г. Протасов. – Київ: НТУУ "КПІ", 2015. – 266 с.
- [20] Протасов А.Г. Моделювання задач теплового неруйнівного контролю з використанням компютерних технологій / А. Г. Протасов // Методи та прилади контролю якостію – 2014. – № 1(32). – С. 14-17.
- [21] 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.
- [22] KAI-0340 Imager Board User's Manual [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/kai-0340-d.pdf>.

					ПК 71.130000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Дата	Підпис		Дата

ДОДАТКИ

Технічне завдання

1. Найменування приладу.

„Тепловізор для визначення типу матеріалу”.

2. Мета виконання дипломного проекту та призначення приладу.

Розробка приладу безконтактного визначення типу матеріалу, що може використовуватись в промисловості.

3. Передумови для розробки приладу.

Дана розробка виконується відповідно до тематики дипломного проектування, затвердженої кафедрою приладів і систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

4. Вимоги до технічних характеристик.

Основні параметри:

- Кут поля зору $2\omega = 10^\circ$;
- Робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda = 8 - 15$ мкм;

5. Робочі умови експлуатації приладу.

Номінальне значення кліматичних факторів відповідно до ДСТУ 12.005-88:

- температура навколишнього середовища $-10...50^\circ\text{C}$;
- відносна вологість 65% при температурі навколишнього середовища $20\pm 5^\circ\text{C}$;
- атмосферний тиск 750 ± 30 мм.рт.ст.

6. Вимоги до конструкції приладу.

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

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

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

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

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

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

7. Техніко-економічні вимоги.

7.1. Передбачається виготовлення одного дослідного зразка приладу.

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

8. Вимоги до упаковки.

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

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

9. Стандартизація та уніфікація.

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

10. Вимоги до техніки безпеки.

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

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

11. Строк зберігання, служби та технічний ресурс.

11.1. Прилад повинен витримувати зберігання протягом 3 років.

11.2. Строк служби 5 років.

11.3. Технічний ресурс 1000 год.