

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

ГЮІК 433610 000 ПЗ  
(позначення документа)

Дослідження режимів роботи радіоелектронних засобів за допомогою тепловізора  
(тема)

Виконав:  
студент 6 курсу, групи МНПм-19-1  
Жабко Б.Г.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої  
(повна назва освітньої програми)

Керівник завідуючий кафедри МЕЕПІ  
Бондаренко І.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність (напря́м) \_\_\_\_\_ 153 Мікро- та наносистемна техніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Жабко Богдану Геннадійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження режимів роботи радіоелектронних засобів за допомогою тепловізора

затверджена наказом по університету від 06 листопада 2020 р. № 1560 СТ

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 20 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Проаналізувати предметну область,

Обґрунтувати, провести дослідження та оцінити технічні можливості застосування пристроїв теплобачення для контролю режимів роботи електротехнічних та радіоелектронних систем.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1. Напрямки і перспективи застосування систем теплобачення.

2. Принцип дії, функціональні схеми, приклади та технічні характеристики існуючих тепловізійних систем.

3. Опис та технічні характеристики тепловізору FLIR C2.

4. Експериментальні дослідження режимів роботи електротехнічних та радіоелектронних систем. Оцінка розривувальної спроможності проведених вимірювань.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Пояснювальна записка

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
1	<u>Бондаренко І. Н.</u>		

#### 7 Календарний план

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	30.07-23.08.2020	
2	Аналіз обраної літератури	24.08-10.09.2020	
3	Підготовка першого розділу роботи	11.09-01.10.2020	
4	Підготовка другого розділу роботи	02.10-20.10.2020	
5	Підготовка третього розділу роботи	21.10-25.11.2020	
6	Оформлення пояснювальної записки	26.11-01.12.2020	
7	Оформлення ілюстративного матеріалу	02.12-03.12.2020	

Дата видачі завдання 25 серпня 2020 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ зав. каф. МЕЕПШ Бондаренко І.М.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 51 с., 30 рис., 1 табл., 31 джерел, 2 додатки.

ТЕПЛОВІЗОРИ, ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ,, ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ, ІК-ТЕРМОГРАФІЯ.

Об'єкт дослідження – активний і пасивний тепловий неруйнуючий контроль виробів електронної техніки.

Мета роботи – оцінка можливостей окремого тепловізійного пристрою для проведення теплового контролю роботи радіоелектронних засобів.

Метод досліджень – Теоретично-експериментальний. Аналіз статей та праць по цій темі разом з експериментальним дослідженням тепловізійних систем.

Опис розділів

У першому розділі дана загальна інформація про інфрачервоне теплобачення.

У другому розділі описані принцип дії, приклади та технічні характеристики існуючих тепловізійних систем.

У третьому розділі описані характеристики тепловізору FLIR C2 , об'єкт дослідження , та саме дослідження.

## ABSTRACT

The explanatory note of the master's attestation work contains: 51 pp., 30 figs., 1 table, 31 sources, 2 appendices.

THERMAL VISORS, THERMAL VISION SYSTEMS, THERMAL CONTROL, IR THERMOGRAPHY.

The object of research is active and passive thermal non-destructive testing of electronic products.

The purpose of work - - an estimation of possibilities of the separate thermal imaging device for carrying out thermal control of work of radio electronic means. Research method - Theoretical and experimental. Analysis of articles and works on this topic together with experimental research of thermal imaging systems.

### Description of sections

The first section provides general information about infrared thermal imaging.

The second section describes the principle of operation, examples and technical characteristics of existing thermal imaging systems.

The third section describes the characteristics of the FLIR C2 thermal imager, the object of study, and the study itself.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ІНФРАЧЕРВОНОГО ТЕПЛОБАЧЕННЯ	11
1.1 Фізичні основи вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням .....	11
1.2 Тепловізор як засіб дослідження теплового поля об'єкта .....	15
1.2.1 Конструктивні особливості тепловизора як технічного засобу .....	15
1.3 Тепловий контроль в радіоелектроніці .....	17
1.4 Застосування тепловизорів у промисловості .....	19
2 ОГЛЯД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ.....	24
2.1 Принцип отримання термограм .....	24
2.2 Фізична модель отримання тепловізійної інформації. ....	25
2.3 Характеристики сучасних тепловізійних приладів .....	28
2.4 Точка вимірювання і відстань до вимірюваного об'єкта .....	32
2.5 Визначення коефіцієнта випромінювання і компенсації відбитої температури.....	35
3 ОПИС ПРИЛАДУ FLIR C2 ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ .....	34
3.1. Опис FLIR C2 .....	36
3.2 Короткий опис об'єкта дослідження .....	42
3.3 Результати тепловізійної діагностики блоку живлення Бетатрон ...	45
3.4 Висновки до 3 глави .....	46
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	48

ДОДАТОК А.....	54
ДОДАТОК Б.....	55

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІЧ – інфрачервоний

ІЧВ – інфрачервоне випромінення

ВТ – вимірювання температури

ТП – теплове поле

АЧТ – абсолютно чорне тіло

НК – неруйнівний контроль

ОСП – органи із сертифікації персоналу

ТВ – термометрія за випроміненням

ТМВ – термометр випромінення

ПВ – приймач випромінення

ОПС – оптично-приймальна система

ПСВ – площинний сірий випромінювач

КВ – коефіцієнт випромінення

КППС – коефіцієнт пропускання проміжного середовища

ФВ – фонове випромінення

ГТ – градієнт температури

РТ – розподіл температури

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки

## ВСТУП

Від природи людина не наділена здатністю бачити теплове випромінювання навколишнього світу. Щоб перевірити, теплий чайник чи холодний, нам потрібно піднести до нього руку. Проте відчуті теплове випромінювання ми все-таки можемо: перебуваючи поруч із потужним джерелом тепла, (поруч з багаттям, наприклад), ми на відстані відчуваємо вихідний від нього жар. Це випромінювання, (воно називається інфрачервоним), ми сприймаємо шкірою, але, на жаль, не очима. Якщо б його можна було бачити, то оточуючі нас предмети отримали б зовсім інший вигляд. Ми з подивом б виявили, що багато з них світяться або раптом стали злегка прозорі, або набули дзеркального блиску.

Інфрачервона термографія, теплове зображення або теплове відео - це науковий спосіб отримання термограми - зображення в інфрачервоних променях, що показує картину розподілу температурних полів. Термографічні камери, або тепловізори виявляють випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру (приблизно 900-14000 нанометрів або 0,9-14 мкм) і на основі цього випромінювання створюють зображення, що дозволяють визначити перегріті або переохоложені місця. Так як інфрачервоне випромінювання випромінюється всіма об'єктами, що мають температуру, згідно з формулою Планка для випромінювання чорного тіла, термографія дозволяє «бачити» навколишнє середовище з або без видимого світла. Величина випромінювання, що випускається об'єктом, збільшується з підвищенням його температури, тому термографія дозволяє нам бачити відмінності в температурі. Коли дивимося через тепловізор, то теплі об'єкти видно краще, ніж охоложені до температури навколишнього середовища; люди і теплокровні тварини легше помітні в навколишньому середовищі, як вдень, так і вночі. Як результат, просування використання термографії може бути приписано військовим і службам безпеки [10].

Створення термограм на основі теплових зображень знайшло багато застосувань. Наприклад, пожежні використовують їх для виявлення диму, пошуку людей і встановлення осередків займання. З тепловими зображеннями техніки, обслуговуючі лінії електропередачі, виявляють перегрів в місцях з'єднань і частини, що перебувають в аварійному стані, які потребують усунення потенційної небезпеки. Деяку фізіологічну діяльність організму, що вимагає більш пильної уваги у людей і теплокровних тварин, також можна спостерігати за допомогою теплових зображень.

Замість ПЗЗ датчиків більшість тепловізорів використовують блок фокусних площин КМОН. Найбільш часто використовуються матриці в фокальній площині з антимоніду індію (InSb), арсеніду галію та індію, телурид ртуті і кадмію. Новітні технології дозволяють використовувати недорогі неохолоджувані мікроболометричні датчики. Їх роздільна здатність більш низька, ніж у оптичних камер, - в основному  $160 \times 120$  або  $320 \times 240$  пікселів до  $640 \times 512$  у найбільш дорогих моделей. Тепловізори більш дорогі, ніж їх аналоги для видимої частини спектру і на моделі високого класу часто накладаються експортні обмеження. Старі болометри і більш чутливі моделі, такі, як з використанням антимоніду індію, вимагають кріогенне охолодження, зазвичай охолоджувач з циклом Стірлінга в мініатюрі або охолодження рідким азотом [11].

Використання теплового випромінювання для науково-дослідних цілей актуально в силу високої інформативності самого методу й повної безпеки його застосування для об'єкту досліджень та персоналу.

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ІНФРАЧЕРВОНОГО ТЕПЛОБАЧЕННЯ

У розділі проведено огляд тепловізорів (інфрачервоних камер) як засобів дослідження теплового поля поверхні об'єктів за інфрачервоним випроміненням, розглянуто їх конструктивні особливості, запропоновано розширену класифікацію тепловізорів. Проведено аналіз особливостей застосування тепловізорів у радіоелектроніці дослідженнях для вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єктів, визначено спільні проблеми застосування тепловізійної техніки в промисловості і медицині, сформульовано шляхи їх вирішення. Розглянуто основні фактори, що призводять до низької точності вимірювань температури та градієнта температури за випроміненням, проаналізовано існуючі методи її підвищення, вказано їх переваги та недоліки. Досліджено особливості калібрування тепловізорів у калібрувальних лабораторіях та їх функціонування в робочих умовах. Проведено огляд нормативного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури об'єктів промисловості та медицини. Виділено джерела виникнення непевності тепловізійних досліджень. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження.

## 1.1 Фізичні основи вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Температура є кількісним показником внутрішньої енергії об'єктів [1], яка випромінюється у вигляді електромагнітних хвиль. Аналіз теплового поля (ТП) поверхні об'єкта за оптичним випроміненням дозволяє отримати інформацію про стан цього об'єкта й процес його функціонування, застосовується при вивченні об'єктів та процесів у різних сферах діяльності, включаючи енергетику, будівництво, промисловість, медицину тощо.

Тепловізійні дослідження поверхні об'єктів за інфрачервоним випроміненням (ІЧВ) є одним із перспективних напрямків розвитку комплексної системи теплового контролю об'єктів різної природи [2-3]. Тепловізійні системи відіграють надзвичайно важливу роль у радіоелектроніці як ефективний дистанційний засіб отримання інформації про тепловий стан об'єктів дослідження. Обробка та аналіз отриманих термограм, тобто зображень ТП об'єктів, забезпечують можливість діагностування стану та порядку функціонування об'єкта, а просторово-часовий розподіл температури (РТ) поверхні інформує про його зовнішню та внутрішню структуру, приховані дефекти та місця їх знаходження [4]. Як наслідок, ця інформація є вихідною при прийнятті рішення про проведення профілактичних заходів, ремонтних робіт чи призначення лікування або є стимулом для призначення наступних уточнюючих досліджень.

Вимірювання температури (ВТ) та градієнта температури (ГТ) за ІЧВ ґрунтується на засадах оптичної термометрії за випроміненням (ТВ), яка займається методами та засобами безконтактного ВТ, ґрунтованого на реєстрації інтенсивності електромагнітного випромінення в оптичному діапазоні спектра (ультрафіолетова, видима та інфрачервона (ІЧ) ділянки) [5]. ТВ базується на вимірюванні енергетичної яскравості теплового випромінення поверхні об'єкта дослідження та порівнянні її з яскравістю абсолютно чорного тіла (АЧТ) при тій же температурі [6]. Теплове випромінення характеризують фізичними величинами, поданими в таблиці А.1 додатків.

У ТВ застосовується поняття АЧТ як ідеального випромінювача, який має максимальну яскравість на всіх довжинах хвиль при відповідній температурі. АЧТ повністю поглинає випромінення, що падає на нього, незалежно від довжини хвилі  $\lambda$ , напрямку падіння і поляризації випромінення [5]. АЧТ є еталонним об'єктом в теорії теплового випромінення. В природі немає АЧТ, але достатньо легко реалізувати таку

модель, для якої поглинання на всіх довжинах хвиль буде нехтуючи мало відрізнятися від одиниці.

Спектри випромінення реальних об'єктів різняться від АЧТ, а отже, описати їх єдиною аналітичною залежністю неможливо. У той же час АЧТ має універсальний спектр розподілу енергії випромінення.

Мірою кількості енергії випромінення даної поверхні, порівняно з енергією випромінення АЧТ, що знаходиться при тій самій температурі, є випромінювальна здатність, яка характеризується коефіцієнтом випромінення (КВ)  $\varepsilon(\lambda, T)$ . КВ дорівнює відношенню інтенсивності випромінення одиниці поверхні тіла  $L(\lambda, T)$  з температурою  $T$  до інтенсивності випромінення одиниці поверхні АЧТ  $L_{bb}(\lambda, T)$ , нагрітого до такої ж температури  $T$ :

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{L_{bb}(\lambda, T)} \quad (1.1)$$

Особливістю безконтактного ВТ за ІЧВ є те, що результати її вимірювання залежать від значення КВ поверхні об'єкта дослідження, яке в свою чергу залежить від температури, довжини хвилі випромінення, матеріалу та ступеня обробки поверхні. Врахування цієї обставини визначає необхідність характеризувати поверхню кожного тіла КВ, який для реальних об'єктів знаходиться в межах  $0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$ . Тому при безконтактному ВТ за ІЧВ необхідним є визначення КВ, його врахування або введення поправки в результат вимірювання на значення КВ досліджуваної поверхні. Значення КВ різних матеріалів для забезпечення реалізації досліджень зазвичай знаходять у довідкових таблицях. Але ця інформація не відповідає реальному значенню КВ поверхні  $\varepsilon(\lambda, T)$ , оскільки визначається при конкретних значеннях температури об'єкта дослідження та довжин хвиль за даних навколишніх умов.

Інтенсивність випромінення реального об'єкта дослідження  $L(\lambda, T)$  визначається за формулою:

$$L(\lambda, T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{bb}(\lambda, T) \quad (1.2)$$

У реальних умовах сумарна енергетична яскравість об'єкта  $L_{\Sigma}(\lambda, T)$ , яка надходить на оптичну систему засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) за ІЧВ, залежить також і від інших факторів:

$$L_{\Sigma}(\lambda, T) = \int_0^{\infty} [\varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{bb}(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) \cdot L_f(\lambda, T)] \cdot \tau(\lambda, T_{amb}) \quad (1.3)$$

де  $\rho(\lambda, T)$  – коефіцієнт відбивання поверхні досліджуваного об'єкта;

$L_f(\lambda, T)$  – енергетична яскравість відбитого від поверхні об'єкта фонового випромінення (ФВ) сторонніх об'єктів;

$\tau(\lambda, T_{amb})$  – коефіцієнт пропускання проміжного середовища (КППС).

В залежності від ширини спектрального каналу оптично-приймальної системи (ОПС) ЗВТ за ІЧВ, вихідний сигнал окремого приймача випромінення

(ПВ) матриці приймачів тепловізора визначається згідно формули:

$$S(\lambda, T) = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) \cdot L_{\Sigma}(\lambda, T) d\lambda \quad (1.4)$$

$R(\lambda, T)$  – спектральна чутливість ОПС тепловізора;

$K$  – коефіцієнт перетворення;

$\lambda_1 \div \lambda_2$  – робоча спектральна смуга перетворення.

Саме ця формула застосовується в ІЧ ТВ для опису реєстрації випромінення у спектральній смузі ІЧ ділянки спектра та є вихідною при фізичному представленні суті тепловізійних досліджень.

## 1.2 Тепловізор як засіб дослідження теплового поля об'єкта

Сучасні тепловізори дозволяють визначати ГТ до сотих значень градуса, формують зображення в телевізійному стандарті та активно використовуються у різних галузях промисловості та сферах медицини [12]. Результатом роботи тепловізора є видиме зображення, де певній температурі відповідає свій колір. Аномалії температур служать індикаторами дефектів, а величина температурних сигналів і їх зміна в часі лежать в основі кількісних оцінок тих або інших параметрів об'єкта дослідження.

На основі узагальнення даних про метрологічні характеристики тепловізорів світових та вітчизняних виробників (Fluke, CEM, DALI, Electrophysics, Балтех, Testo AG, Wuhan Guide Infrared Co., IPI, IRay Technology Co., Irisys, IRtek, JENOPTIK/InfraTec, Chauvin Arnoux, SAT Infrared Technology та ін.) та [13-14] можна так охарактеризувати їх сучасні моделі: це засоби вимірювання, які працюють у середній та тепловій ІЧ ділянках спектра (переважно лише в одній із них) у широкому температурному діапазоні та мають такі метрологічні характеристики:

- діапазон ВТ – від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- робочі спектральні діапазони –  $3\div 5\text{ мкм}$  та  $8\div 14\text{ мкм}$ ;
- швидкодія – до  $10^{-6}\text{ с}$ ;
- температурна чутливість – менше ніж  $20\text{ мК}$ .

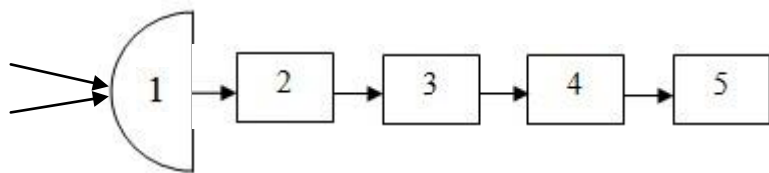
### 1.2.1 Конструктивні особливості тепловізора як технічного засобу

Тепловізор є ЗВТ, призначеним для визначення РТ поверхні об'єкта за ГТ [15]. Визначення РТ поверхні досліджуваного об'єкта відбувається за його ІЧВ [16]. Конструкція тепловізора дозволяє перетворювати ІЧВ, що

надходить від об'єкта, в електричний сигнал, який після підсилення та автоматичної обробки забезпечує візуалізацію видимого термографічного зображення на дисплеї тепловізора [17]. Спектральні діапазони роботи тепловізорів визначаються інтервалами довжин хвилі для максимуму енергії випромінення досліджуваних об'єктів у відповідних вікнах прозорості атмосфери та діапазоном вимірюваної температури від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [18].

В [19] подано таке визначення тепловізора: «оптико-електронний прилад, призначений для безконтактного (дистанційного) спостереження, вимірювання та реєстрації просторового та просторово-часового розподілу радіаційної температури об'єктів, що знаходяться в полі зору приладу, шляхом формування часової послідовності термограм та визначення температури поверхні об'єкта за відомими коефіцієнтами випромінення та параметрами зйомки (температура навколишнього середовища, пропускання атмосфери, дистанція спостереження і т.п.)». Отже, основною у цьому визначенні є інформація про те, що тепловізор працює безконтактно та забезпечує отримання даних про РТ.

Загальна функціональна схема конструкції тепловізора представлена на рисунку 1.1.



1 – оптична система; 2 – система сканування; 3 – матриця ПВ;  
4 – система перетворення сигналу [20]; 5 – блок візуалізації

Рисунок 1.1 – Загальна функціональна схема конструкції тепловізора:

Особливості конструкції конкретного тепловізора передбачені його призначенням, видами ПВ та іншими ознаками.

### 1.3 Застосування тепловізорів у промисловості

Тепловізори застосовуються у різних сферах промисловості з метою:

- візуалізації ТП об'єктів дослідження;
- дистанційного визначення РТ;
- для виявлення (у т.ч. і мікродефектоскопія) та реєстрації дефектів;
- для наукових досліджень тощо.

Серед переваг використання теплового контролю у промисловості можна відзначити:

- дистанційність проведення дослідження;
- оперативність доступу до результатів та можливість їх швидкої обробки;
- можливість контролю об'єктів із будь-яких матеріалів;
- можливість дослідження динамічних та статичних теплових процесів, процесів вироблення, передачі, перетворення, споживання та консервації енергії різних видів;
- відсутність спотворень ТП об'єкта при вимірюванні;
- можливість реалізації вимірювань в агресивному середовищі, в умовах радіоактивного випромінювання й високого електричного потенціалу та без потреби переривання технологічного процесу й відключення обладнання;
- можливість прогнозування теплової деградації виробів;
- суцільність та безперервність дослідження;
- можливість проведення експрес-контролю теплового стану промислових об'єктів з метою діагностування та прогнозування порядку їх подальшого функціонування, зважаючи на результати діагностування;

- доповнюваність теплового контролю іншими методами дослідження (перевагу серед яких першочергово віддають неруйнівним);
- можливість поєднання зі стандартними системами обробки інформації;
- можливість поточного контролю та створення повноцінних автоматизованих систем контролю й управління технологічними процесами
- можливість виявлення потенційно проблемних ділянок для проведення превентивного обслуговування, що скорочує подальші витрати з обслуговування та експлуатації.

Таким чином, за рахунок практичного використання, тепловізійні дослідження підтверджують свою ефективність як інструмент превентивного обслуговування та моніторингу роботи об'єктів виробничих процесів [14]. Узагальнивши, пропонуємо деякі напрямки успішного та ефективного використання тепловізорів:

- регулярні сервісні перевірки.
- забезпечення проведення превентивного механічного обслуговування.
- швидкий та простий моніторинг.
- вимірювання високих температур та робота в умовах підвищеної небезпеки.
- забезпечення формування бази даних вихідного стану досліджуваного об'єкту та динаміки процесу його експлуатації чи функціонування [23].

Таким чином, перспективність використання тепловізорів у найрізноманітніших галузях промислового комплексу визначається потребою реалізації не лише якісної, але й кількісної оцінки РТ поверхні промислових об'єктів.

#### 1.4 Тепловий контроль в радіоелектроніці

У 1980-х роках намітилася тенденція розробки комплексних програм забезпечення надійності, що включають використання апріорної інформації, побудову ймовірних-фізичних моделей, застосування фізико-технічних методів неруйнівного контролю та нових засобів вимірювання з високими метрологічними показниками [1].

Загальні методи НК розвиваються давно [6], їх вдосконаленням займаються великі колективи і спеціалізовані організації. Поряд зі звичайними методами НК - ультразвуковим, радіаційним, магнітним, рентгенівським - все більш популярним стає теплової метод НК.

В основі всіх теплових методів НК лежить зв'язок між тепловим потоком і температурним градієнтом, який виникає при наявності дефектів в досліджуваних об'єктах. Температура елементів радіоелектроніки є одним з ключових чинників, що визначають їх довговічність в робочому режимі. В СРСР для аналізу теплових режимів електронних схем використовувалися термопари [4-6]. Недоліком даного методу є наявність теплового контакту між термопарою і об'єктом дослідження. ІК метод контролю вільний від цього недоліку. Прикладом може служити застосування цього методу американською компанією Raytheon . Після перевірки на виході виробничої лінії по електричним параметрам одна з ключових інтегральних мікросхем (ІМС) була визнана придатною. Однак перевірка її теплового рельєфу показала, що один з резисторів має занадто високу температуру, яка вказує на погане з'єднання резисторів з матеріалом підкладки. Дана ІМС мала прихований дефект, який міг би привести незабаром до виходу її з ладу. На підставі результатів ІК контролю ІМС була забракована.

Для оцінки якості досліджуваного об'єкта, виявлення прихованих дефектів в радіоелектронній апаратурі та порушень суцільності в матеріалах можуть використовуватися як пасивний, так і активний методи ТК.

Особливість активного методу полягає у використанні зовнішнього джерела теплової енергії для формування режимів стаціонарного і нестаціонарного нагріву з подальшим дослідженням теплового поля по поверхні об'єкту. Контроль якості вихідних матеріалів і готових виробів радіоелектроніки методом активного ТК заснований на тому, що різного роду дефекти (тріщини в металах і неметалах; пропали, непровари, раковини в точкових зварних з'єднаннях; відсутність зв'язку між окремими елементами в клеєних виробках і т. д.) спотворюють характер поширення тепла в досліджуваних об'єктах внаслідок зміни теплових характеристик в дефектних ділянках. При цьому в зонах, де є дефект, відбувається підвищення або пониження (в залежності від характеру дефекту і способу реєстрації теплового потоку) температури в порівнянні із заданою.

Головною проблемою дослідження температурних полів виробів радіоелектроніки є малі габаритні розміри, слабкі температурні сигнали і суттєві флуктуації коефіцієнта випромінювання.

Фірма ІВМ (США) застосовує ТК для виявлення несправностей електронних плат і прогнозування їх ресурсу. Суттєвою проблемою при використанні ТК в радіоелектроніці є розкид випромінювальних властивостей використовуваних матеріалів, який може значно перевищувати 15%. При ТК радіоелектронних компонент, необхідно знати абсолютну температуру окремих елементів, тому що вона впливає на їх роботу. Для усунення цієї проблеми фірма ІВМ використовувала біле порошкоподібною покриття з оксиду алюмінію.

При пасивних теплових методах використовується власне теплове випромінювання контрольованих об'єктів при їх функціонуванні в робочому або спеціально обраному контрольному режимі. Застосування пасивного методу ТК можливо лише в разі перевищення випромінювання об'єкта над навколишньому фоном.

Тому використання пасивного методу ТК найдоцільніше для виявлення несправностей в працюючих електронних схемах, для оцінки ефективності

разлічних тепловідвідних пристроїв, а також вибору найбільш оптимального розміщення тепловиділяючих елементів.

Залежно від типу матеріалів, їх фізико-хімічних властивостей, передбачуваного характеру дефекту виробляється або одночасний нагрів всього об'єкта (стаціонарний тепловий режим), або послідовний (скануючий) нагрів окремих ділянок об'єкта (динамічний тепловий режим).

При одночасному нагріванні, що здійснюється спеціальними нагрівачами (лампами, гарячим газом, електричним струмом і т. д.), Можна виявити такі дефекти, як тріщини, порожнечі, включення, розташовані перпендикулярно напрямку теплового потоку і мають протяжність, порівнянну з товщиною виробу. Дуже ефективний стаціонарний тепловий режим для дослідження характеру розподілу температури в теплових трубах, які в даний час знаходять все більш широке застосування для відводу тепла від радіоелектронних пристроїв з високою щільністю компоновки елементів.

На практиці застосування отримав метод ТК, заснований на принципі нестационарного (динамічного) теплового режиму досліджуваного виробу [12]. Даний спосіб більш інформативний, універсальний, має широкі апаратурними і функціональними можливостями. Якість об'єкта дослідження оцінюється як за характером розподілу температури, так і по зміні температури окремих ділянок його поверхні в часі.

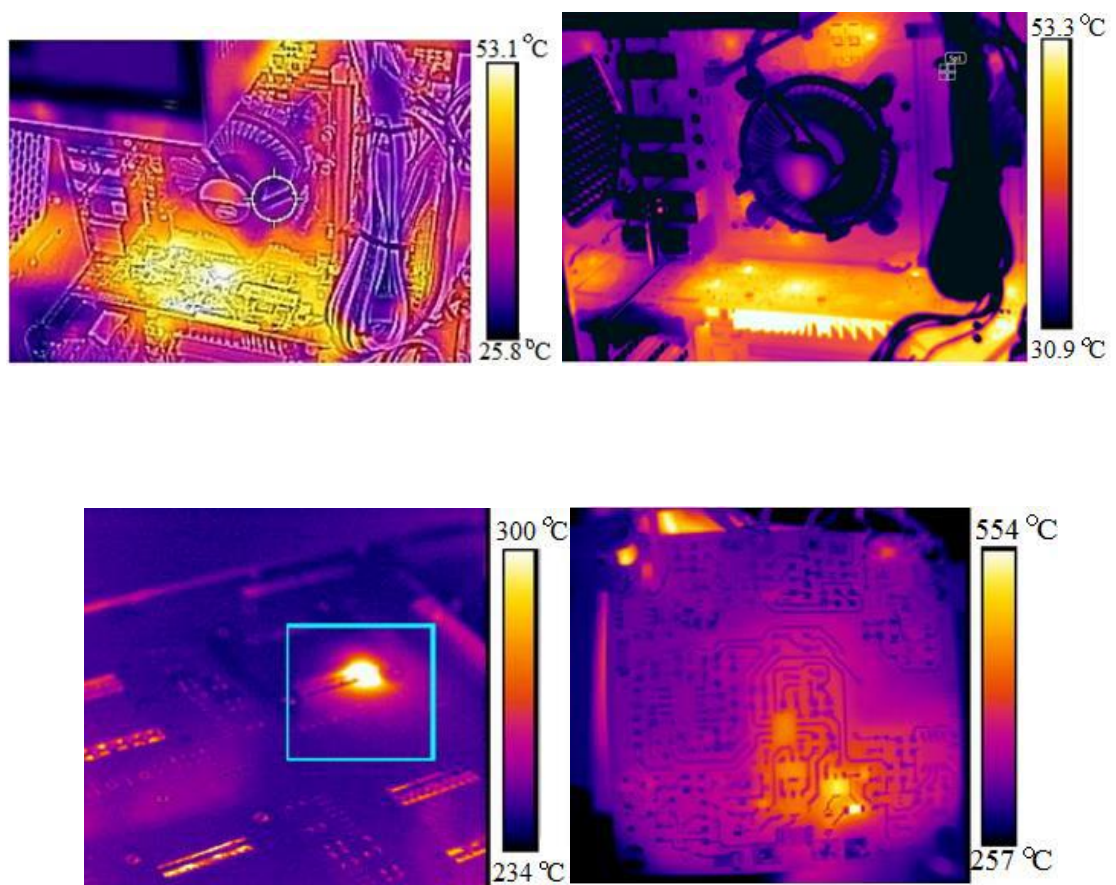
При цьому методі ТК нагрів об'єкта здійснюється локальним джерелом тепла, який переміщається по заданій траєкторії, забезпечуючи нестационарний тепловий режим. Як локальних джерел тепла можуть бути використані оптичні квантові генератори, а також ІК випромінювачі, електромагнітне випромінювання високої частоти, плазмовий струмінь і т.д.

У роки СРСР зазначалося інтенсивний розвиток радіоелектронної промисловості. Першочерговим державним завданням було підвищення технічного рівня якості, надійності, і термінів служби виробів.

Проводилися інтенсивні дослідження в області ТК (ВНДІ «Електронстандарт»), зокрема, були створені спеціалізовані системи

контролю 14ЕЕП300-021, 09ЕІ-1, АСТД та ін. [5, 45]. Теоретичні основи моделювання процесу ІК контролю і прогнозування робочого ресурсу радіоелектронних компонент були узагальнені ще в 1974 р Н.С. Даніліним з співавторами [6].

В якості ілюстрацій на рисунку 1.2 показані теплові поля різних радіоелектронних компонент при наявності перегрітих елементів.



а - блок живлення комп'ютера; б - електронна плата; в - ділянка перегріву на ДП; г - друкована плата з перегрітою елементом

Рисунок 1.2 – Теплові поля радіоелектронних пристроїв

## Висновки до розділу 1

Історично ТК виробів потужної електроніки і мікроелектроніки був однією з перших сфер застосування даного методу з метою виявлення прихованих дефектів і прогнозування їх якості. Провідні світові виробники, а також ряд вітчизняних організацій (в колишньому СРСР), розробили методики пасивного ТК, в яких об'єкти контролю стимулювали робочої або тестової електричної навантаженням.

Основними проблемами теплового методу є необхідність урахування коефіцієнта випромінювання, величина якого сильно варіюється в залежності від класу контрольованих виробів.

Процедури активного ТК порівняно мало розроблені, оскільки вони призводять до появи додаткової «координати» - часу - при аналізі температурної інформації і, отже, вимагають розробки нових алгоритмів виділення сигналів від дефектів на тлі перешкод. Очевидно, що при цьому доцільно використовувати нестационарні теплофізичні рішення.

У силу зазначених вище факторів, представляється доцільним проведення досліджень по активному ТК виробів радіоелектроніки, чому і присвячена ця дисертація.

## ГЛАВА 2 ОГЛЯД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Принцип отримання термограм

Принцип дії сучасного тепловізора (рівнозначна назва термограф, або тепловізійна камера) заснований на перетворенні природного теплового випромінювання від об'єктів досліджень, у видиме зображення (рис. 2.1) .

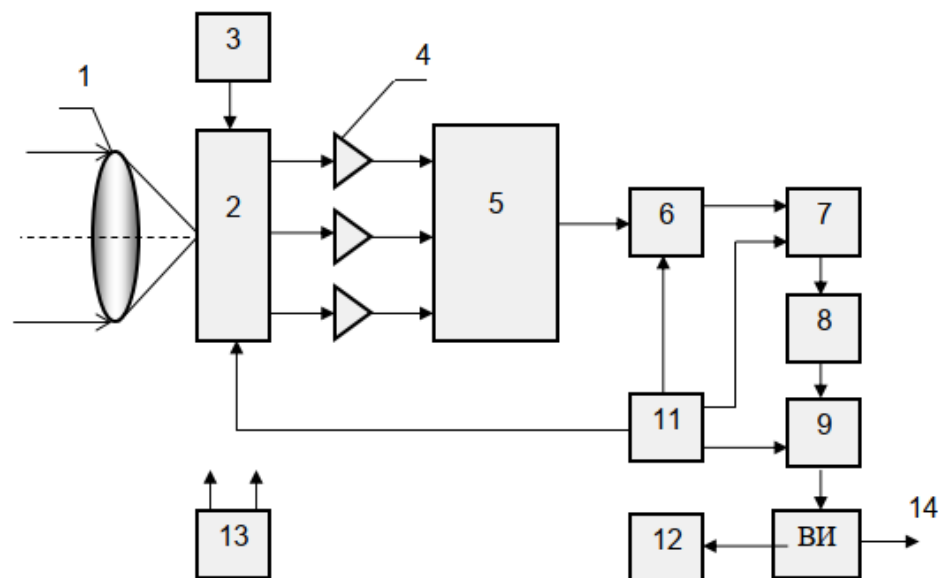


Рисунок 2.1 – Блок-схема сучасного тепловізора

Сигнал теплового поля від об'єкту досліджень проходить по шляху: ІЧ об'єктив – 1, матриця ІЧ фотоприймачів – 2, попередні підсилювачі – 4, мультиплексор – 5, аналоговий коректор неоднорідності сигналів – 6, аналого-цифровий перетворювач – 7, цифровий коректор неоднорідності сигналів – 8, коректор непрацюючих фотоприймачів матриці – 9,

блок формування зображення з мікропроцесорною обробкою – 10, тактовий генератор – 11, відеомонітор – 12, вихід для підключення персонального комп'ютера (ПК)–14.

Блок охолодження або термостабілізації (3), підтримує матрицю у стабільному функціональному стані, а джерело живлення (13) забезпечує необхідними напругами всі системи приладу. Неоднорідності сигналів елементарних фотоприймачів матриці попередньо коректуються в аналоговій формі, перетворюються в цифрову форму й коректуються з використанням даних, отриманих у процесі калібрування.

На виході блоку формування зображення (10) інформація надається або як відеосигнал, що надходить на відеомонітор, або у цифровій формі для передачі в персональний комп'ютер (ПК). Математичне забезпечення сучасних тепловізорів надає можливість виконувати цифрову обробку ІЧ зображення в реальному масштабі часу, обчислювати параметри теплового рельєфу, створювати бази даних ІЧ зображень і проводити порівняння теплових образів, отриманих у різний час .

## 2.2 Фізична модель отримання тепловізійної інформації

Той факт, що інфрачервоне випромінювання є функцією температури поверхні об'єкта, надає можливість за допомогою термографа розраховувати і відображати цю температуру.

Теплова енергія, що надходить від об'єкту досліджень  $W_{об}$ , як джерела інфрачервоного випромінювання, з температурою  $T_{об}$ , створює на виході термографа сигнал  $U_{вих}$  пропорційний тепловому випромінюванню об'єкта досліджень на вході термографа (рис. 2.2).

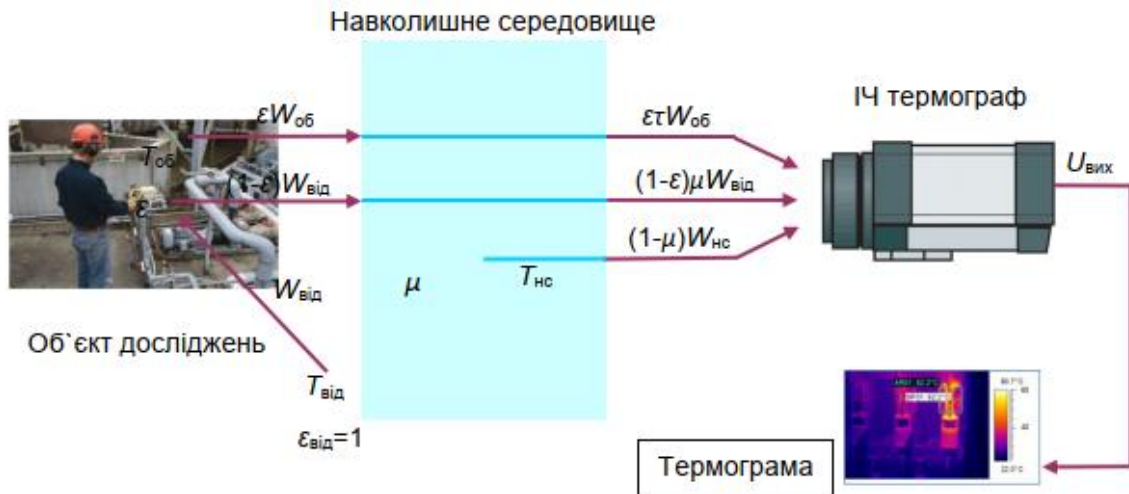


Рисунок 2.2 – Функціональна схема отримання термограми об'єкта досліджень

$\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювання об'єкта досліджень

(випромінювальна здатність);  $\mu$  – коефіцієнт пропускання атмосфери;

$T_{\text{від}}$  – відбита температура;  $T_{\text{нс}}$  – температура навколишнього середовища

Тоді можна записати:

$$U_{\zeta_0} = cW_{\zeta_0}, \quad (2.1)$$

де  $c = \text{const}$ .

Якщо об'єкт досліджень має випромінювальну здатність  $\varepsilon$ , то  $U_{\zeta_0} = W_{\zeta_0}$ . Але при проведенні інфрачервоних досліджень об'єкта, термограф фіксує випромінювання не тільки від об'єкту досліджень, а і від навколишнього середовища яке відбивається поверхнею об'єкта досліджень. Обидві ці складові, в певній мірі, послаблюються при проходженні скрізь атмосферу на шляху до термографа, що є третьою складовою.

З урахуванням цього можна записати три складові температури, що фіксуються термографом.

Температура об'єкту досліджень:

$$T_{\text{об}} = \varepsilon \mu W_{\text{об}} \quad (2.2)$$

Відбита температура:

$$T_{\text{від}} = (1 - \varepsilon) \mu W_{\text{від}} \quad (2.3)$$

Температура навколишнього середовища:

$$T_{\text{нс}} = (1 - \varepsilon) \mu W_{\text{нс}} \quad (2.4)$$

Загальна теплова енергія дорівнює:

$$W = \varepsilon \mu W_{\text{об}} + (1 - \varepsilon) \mu W_{\text{від}} + (1 - \mu) W_{\text{нс}} \quad (2.5)$$

Загальний вигляд сигналу на вході термографа можна представити рівнянням:

$$U_{\text{об}} = \frac{1}{\varepsilon \mu} U_{\text{вих}} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} U_{\text{від}} - \frac{1 - \mu}{\varepsilon \mu} U_{\text{нс}} \quad (2.6)$$

де  $U_{\text{об}}$  – напруга, яка може бути перетворена безпосередньо в дійсну температуру у вигляді термограми;

$U_{\text{вих}}$  – вимірювана вихідна напруга термографа для даного випадку;

$U_{\text{від}}$  – теоретична вихідна напруга термографа для відбитої температури;

$U_{\text{нс}}$  – теоретична вихідна напруга термографа для температури навколишнього середовища.

Компенсація згаданих вище ефектів здійснюється сучасними термографами автоматично в режимі реального часу, однак перед проведенням досліджень в термограф необхідно ввести наступні параметри:

- коефіцієнт випромінювання (наприклад, для людини  $\varepsilon = 0,98$ );
- температура навколишнього середовища (використовується термографом для компенсації випромінювання, відбитого від об'єкта досліджень і атмосфери);

- відстань між об'єкта досліджень і об'єктивом термографа (використовується для врахування поглинання випромінювання атмосферою, а також зменшення пропускання зі збільшенням відстані);
- відносна вологість повітря (для відстаней від 0,1 м до 3 м та нормальній вологості, можна залишати цей параметр за умовчанням 50%).

Представлена на рис. 2.2 ситуаційна модель є досить близькою до реальних умов проведення термографічних досліджень з урахуванням певних обмежень, а саме: зважаючи на невелику відстань від об'єкту досліджень до об'єктиву термографа (від 0,1 до 3 м), впливом атмосфери можна знехтувати

### 2.3 Характеристики сучасних тепловізійних приладів

Розглянемо технічні характеристики деяких тепловізорів фірми FLIR «Systems»



Рисунок 2.3 – Модель тепловізора FLIR T335

Параметри візуалізації:

- поле зору/ мінімальна фокусна відстань: 25°X 19°;15°;45°;

- Температурна чутливість: 0,05 °C при 30 °C;
- Частота кадрів: 9 Гц ;
- Фокусування: Ручна й автоматична;
- Цифрове збільшення: 1-2х безперервне;
- Тип детектора: Матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний;
- мікроболометр 320 x 240 пікселів;
- Спектральний діапазон: Від 7,5 до 13 мкм;

#### Вимірювання:

- інтервал температур: Від -20°C до +650°C у двох діапазонах, до +1200°C;
- точність:  $\pm 2^\circ\text{C}$  або  $\pm 2\%$  від абсолютної температури ( $y^\circ\text{C}$ ) ;
- повторюваність:  $\pm 1^\circ\text{C}$  або  $\pm 1\%$  від абсолютної температури ( $y^\circ\text{C}$ ) ;
- режим виміру: переміщені точки 5 і області 5, колірна сигналізація;
- про температуру вище або нижче заданого значення, максимальна температура по області, мінімальна температура по області;
- керування за допомогою меню: Палітри (кольору мінливості, веселка, веселка НС (високий контраст), чорно-біла, чорно-біла інвертована), автопідстроювання (безперервна, ручна);
- установки, що вводяться: Число/час, одиниці виміру температури З/ F, мова, масштаб, інформаційне поле, яскравість світіння РК дисплея (висока/нормальна/низька);
- коректування вимірів: Зміни коефіцієнта випромінювання від 0,1 до 1,0, поправка на відбиту температуру навколишнього повітря;

#### Джерело живлення:

- тип батареї: Літій-іонна, що перезаряджається, заміна в умовах експлуатації;

- час роботи: 4 години безперервної роботи. Дисплей показує стан батареї;
- система підзарядки: Підзарядка без витягу з камери; адаптер змінного струму 90 – 260 Вт, 50/60 Гц; 12 В від автомобільної мережі (з використанням кабелю, що поставляється за додаткову плату) ;
- робота від мережі змінного струму: Адаптер змінного струму 90 – 260В, на виході – напруга 12 В, постійний струм;
- напруга: 11 – 16 В, постійний струм;
- енергозбереження: Автоматичне вимикання й перехід у режим;

Вимоги до умов навколишнього середовища:

- інтервал робочих температур: Від  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ;
- інтервал температури зберігання: Від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ ;
- вологість: Робота й зберігання – від 20% до 80%, без конденсації вологи;
- герметичність: IP 54;
- ударне навантаження: 25 g, IEC 68068-2-29;



Рисунок 2.4 – Модель тепловізора FLIR B620

Створення теплового зображення:

- кут огляду/ мінімальна фокусна відстань:  $24^{\circ}$  x 18/0.3 м ;
- просторовий дозвіл: 0.65 мрад для об'єктива  $24^{\circ}$ ;
- температурна чутливість: 40 мК при  $30^{\circ}\text{C}$ ;

### Виміри:

- температурний діапазон:  $-40^{\circ}\text{C} \dots +120^{\circ}\text{C}$  ( по запиту до  $+2000^{\circ}\text{C}$ );

### Аналіз вимірів:

- ізотерма: 2 з інтервалом вище/нижче ;
- різниця температур: Різниця температур між функціями вимірів або референтною температурою;
- автоматичне виявлення гарячих/холодних ділянок: Макс./мін. знач. темп. і положення відображаються у вікні, області або на лінії;
- сигналізація точки роси: 1 сигнал про вологість, включаючи сигнал тривоги про точку роси;
- сигнал тривоги для функції виміру: Звукова/візуальна сигналізація (зверху/знизу) для будь-якої обраної функції виміру;
- референтна температура: Установлюється вручну або виходить за допомогою функції виміру ;
- поправка на коефіцієнт випромінювання: Варіюється від 0.01 до 1.0 або вибирається з переліку матеріалів ;
- поправка на відбиту ефективну температуру: Автоматично на основі вхідних значень відбитої температури;
- поправка на зовнішню оптику/вікна: Автоматично на основі вхідних значень пропущення оптики/вікна й температури ;

### Параметри навколишнього середовища:

- діапазон робочих температур:  $-15^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$ ;
- діапазон температур при зберіганні:  $-40^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$  ;
- вологість (експлуатація й зберігання): ІЕС 68-2-30/24 ч. 95% відносної вологості, від  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  ;
- стійкість до ударів: 25 g (ІЕС 60068-2-29) ;
- стійкість до вібрації: 2 g (ІЕС 60068-2-6) ;
- корпус: IP 54 (ІЕС 60529) ;

У даній роботі ставилося завдання аналізування радіоелектроніки за допомоги дешевого але в той же час, найбільш функціонуючого тепловізора, FLIR C2.

#### 2.4 Точка вимірювання і відстань до вимірюваного об'єкта

Існують три змінних, які необхідно враховувати при визначенні оптимальної відстані до вимірюваного об'єкта і максимального видимого й вимірюваного об'єкта:

- поле зору (FOV);
- найменший видимий об'єкт (IFOV<sub>geo</sub>);
- найменший вимірюваний об'єкт / вимірювана точка (IFOV<sub>meas</sub>).

Варто зауважити, що чим більша різниця між температурою вимірюваного об'єкта і температурою навколишнього середовища і чим нижче коефіцієнт випромінювання, тим більша ймовірність виникнення помилок. Кількість таких помилок збільшується, якщо коефіцієнт випромінювання заданий невірно.

- За допомогою тепловізора ви можете виміряти тільки температуру поверхонь; використовуючи даний прилад, неможливо заглянути всередину об'єкта або побачити крізь нього.
- Незважаючи на те, що багато матеріалів, наприклад, скло здаються нам прозорими, вони проявляють себе як матеріали не проникного типу, тобто стійкі до довгохвильового інфрачервоного випромінювання матеріали.
- Деякі пропускаючі матеріали містять, наприклад, тонкий пластик або германій - матеріал, з якого виготовлений об'єктив і захисний фільтр для об'єктива тепловізора.
- Якщо компоненти, які розташовані під поверхнею, впливають на розподіл температури по поверхні вимірюваного об'єкта через

провідність, структуру внутрішнього дизайну об'єкта вимірювання часто можна розглянути на отриманому ІЧ - зображенні / термограмі. Тим не менш, тепловізор може вимірювати тільки поверхневу температуру. Точне визначення значень температури внутрішніх елементів об'єкта за допомогою тепловізора здійснити неможливо.

Поле зору (FOV) тепловізора (рис. 2.5) являє собою область, видиму тепловізором. Розміри даної площі визначаються об'єктивом, використовуваним з тепловізором. Більш того, вам необхідно знати технічні характеристики найменшого видимого об'єкта (IFOV<sub>geo</sub>) вашого тепловізора. За допомогою цього визначається розмір пікселя в залежності від відстані. З просторовою роздільною здатністю об'єктива 3,5 мрад і відстанню до вимірюваного об'єкта 1 м., найменший видимий об'єкт (IFOV<sub>geo</sub>) має сторону пікселя рівну 3,5 мм і відображається на дисплеї в якості 1 - го пікселя.

Для отримання точних результатів вимірювання вимірюваний об'єкт повинен бути в 2-3 рази більше найменшого видимого об'єкта (IFOV<sub>geo</sub>). Отже, наступний наближений підрахунок застосовується до найменшого вимірюваного об'єкту (IFOV<sub>meas</sub>):

$$\text{IFOV}_{\text{meas}} \approx 3x \text{IFOV}_{\text{geo}} \quad (2.7)$$

Для збільшення поля зору слід використовувати ширококутний об'єктив [23].



Рисунок 2.5 – Поле зору тепловізора

2.5 Визначення коефіцієнта випромінювання і компенсації відбитої температури.

Коефіцієнт випромінювання (або ступінь чорноти) -  $\varepsilon$  показує відношення енергії теплового випромінювання 'сірого тіла' згідно із Законом Стефана Больцмана, до випромінювання 'абсолютно чорного тіла' при тій же температурі. Коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла  $\varepsilon = 1$ .

Коефіцієнт випромінювання - міра здатності об'єкта поглинати (випромінювати) ІЧ-енергію. Величина коефіцієнта може бути в діапазоні від 0 (дзеркало) до 1 (абсолютно чорне тіло).

Для визначення коефіцієнта випромінювання поверхні вимірюваного об'єкта на практиці використовують табличні коефіцієнти випромінювання, або визначають за допомогою еталонного вимірювання контактним термометром.

## 3 ОПИС ПРИЛАДУ FLIR C2 ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

### 3.1 Опис FLIR C2

Кишеньковий тепловізор FLIR C2 є першою повнофункціональною кишеньковою тепловізійною камерою в світі, розроблений спеціально для створення інфрачервоних візуалізацій.

Камера Flir C2 оснащена вбудованим акумулятором, який заряджається за допомогою кабелю та розрахований на безперервну роботу протягом двох годин.



Рисунок 3.1 — Тепловізор FLIR C2

Роздільна здатність термічного зображення FLIR C2 становить  $80 \times 60$  (4800) пікселів, висока чутливість детектора захоплює і показує тонкі теплові конструкції з невеликою температурною різницею. Кут огляду  $45^\circ$ .

Також присутня візуальна камера з роздільною здатністю  $640 \times 480$  пікселів для мультиспектрального зйомки якість зображення значно підвищується, що дозволяє побачити деталі, які зазвичай не помітні на інфрачервоному зображенні.

FLIR C2 має MSX® технологію, яка додає контури предметів від видимої камери на все інфрачервоне зображення в режимі реального часу. Результат:

все-в-одному, в нерозбавленому вигляді тепловизионна картинка з видимими особливостями архітектури приміщення, що дозволяє миттєво зрозуміти, де проблематична зона. MSX технологія працює в режимі реального часу як з РК-дисплея приладу, так і потокового відео через USB.

Зображення FLIR C2 зберігається в форматі JPEG, що дає можливість 4800 окремих вимірювань на цьому зображенні, які можуть бути проаналізовані за допомогою програмного забезпечення FLIR Tools

Камера C2 дозволяє зберігати у внутрішній пам'яті сотні зображень, які можна переглядати на екрані або завантажувати на комп'ютер. За допомогою програми FLIR Tools можна передавати потокове відео на комп'ютер за допомогою USB-кабелю.

Ключові особливості:

- компактний, тонкий з захисним корпусом від падінь і вологи;
- інтуїтивно зрозумілий трьох дюймовий сенсорний екран;
- фірмова технологія MSX FLIR;
- вбудований світлодіодний ліхтарик;
- ширококутний об'єктив оптимізований для створення додатків;
- повністю радіометричні зображення дозволяє вимірювати будь-яку точку на зображенні і подальший аналіз від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ ;
- потокове відео.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики тепловізора Flir C2

Роздільна здатність в інфрачервоному діапазоні	80 × 60 (4800 px)
Теплова чутливість	не більш 0,1°C
Кут огляду	45°
Мінімальна дистанція фокусування	0,15 м
Частота зміни кадрів	9 Гц
Фокусування	фіксоване
Спектральний діапазон	7,5-14 мкм

Продовження табл. 3.1	
Діапазон температур об'єкту	-10...150°C
Точність	± 2°C
Діапазон робочих температур	-10...50°C

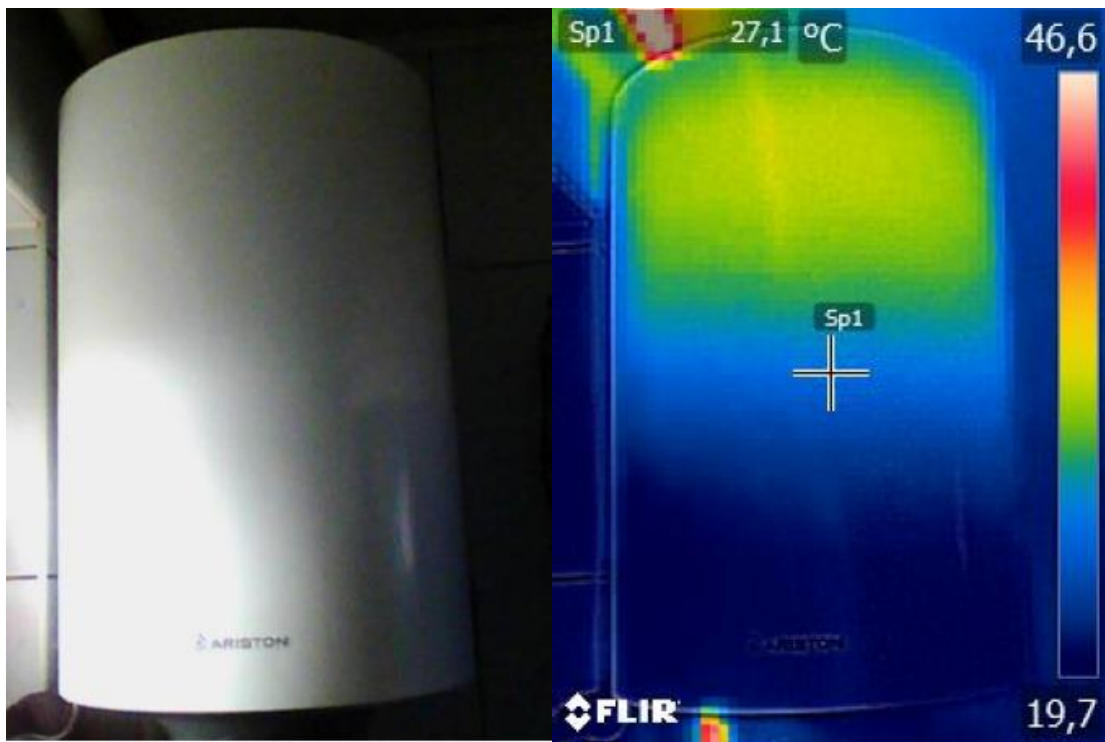


Рисунок 3.2 — Нерівномірне заповнення водонагрівного баку теплою водою

За допомогою тепловізора FLIR C2 є можливість спостерігати розподіл води у ємності залежно від температури (рис. 3.2), та місця найбільшого розігріву плати електроніки (рис. 3.3, 3.4).

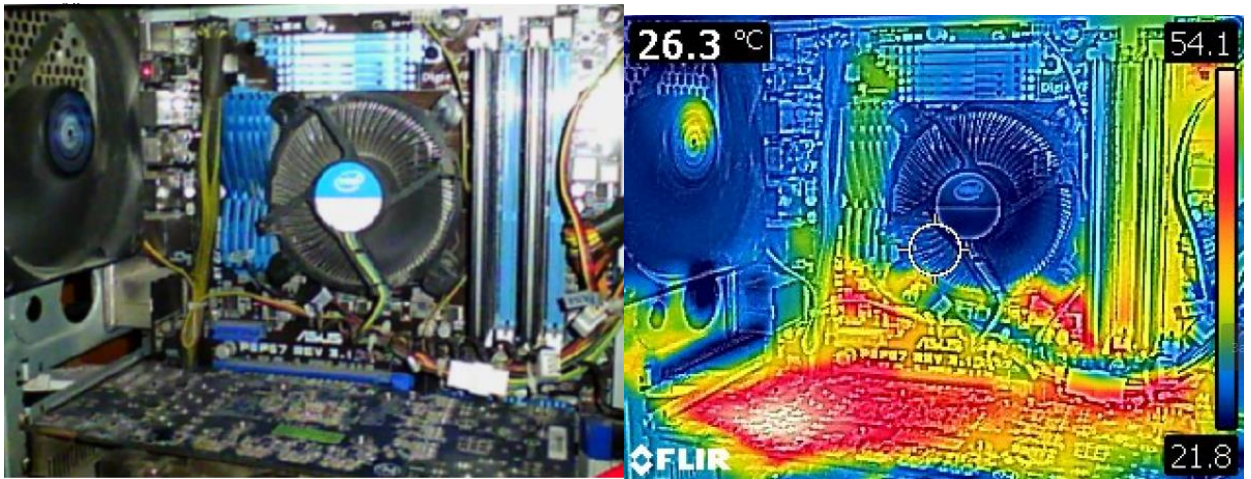


Рисунок 3.3 — Теплова картина системного блоку

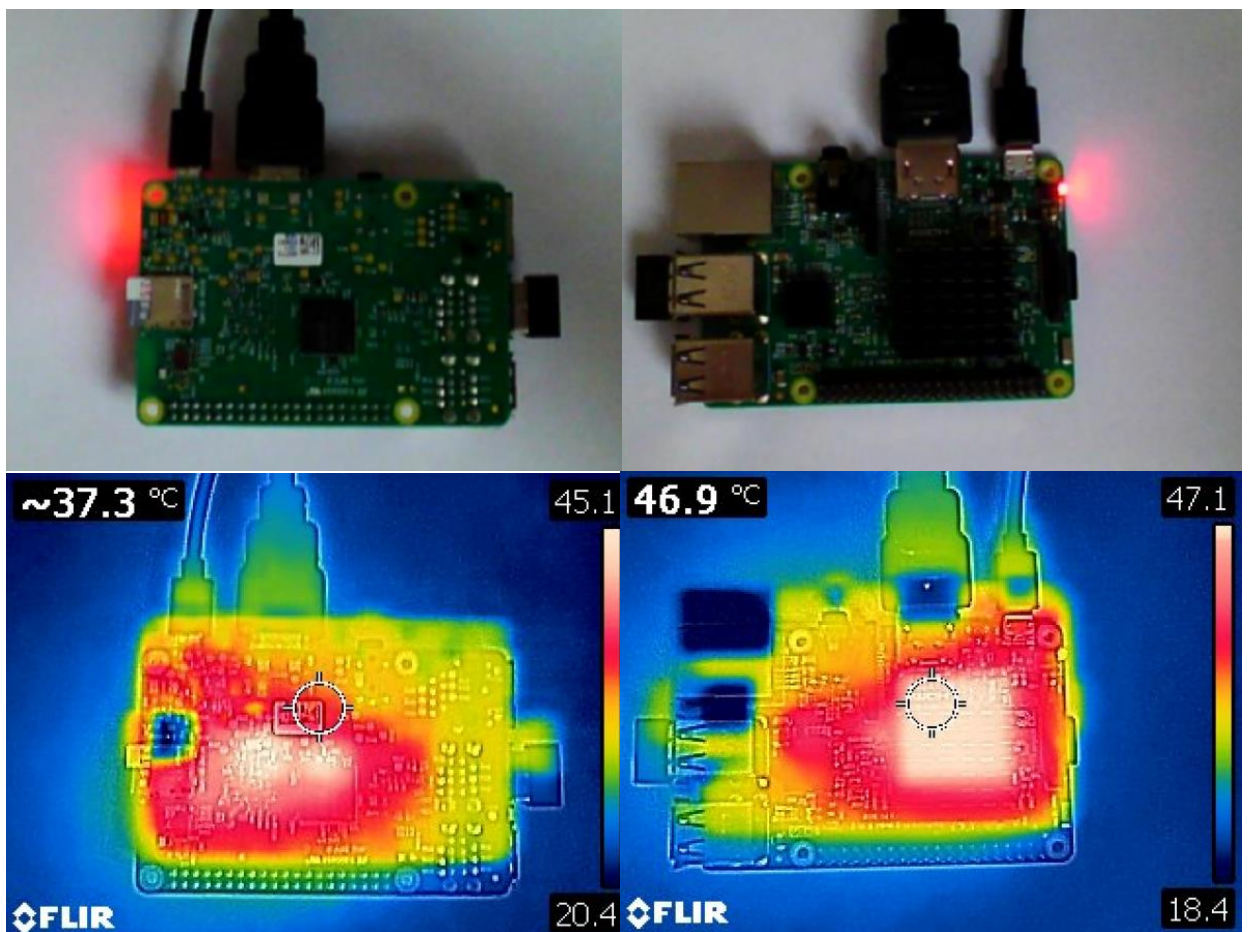


Рисунок 3.4 — Теплова картина плати мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3

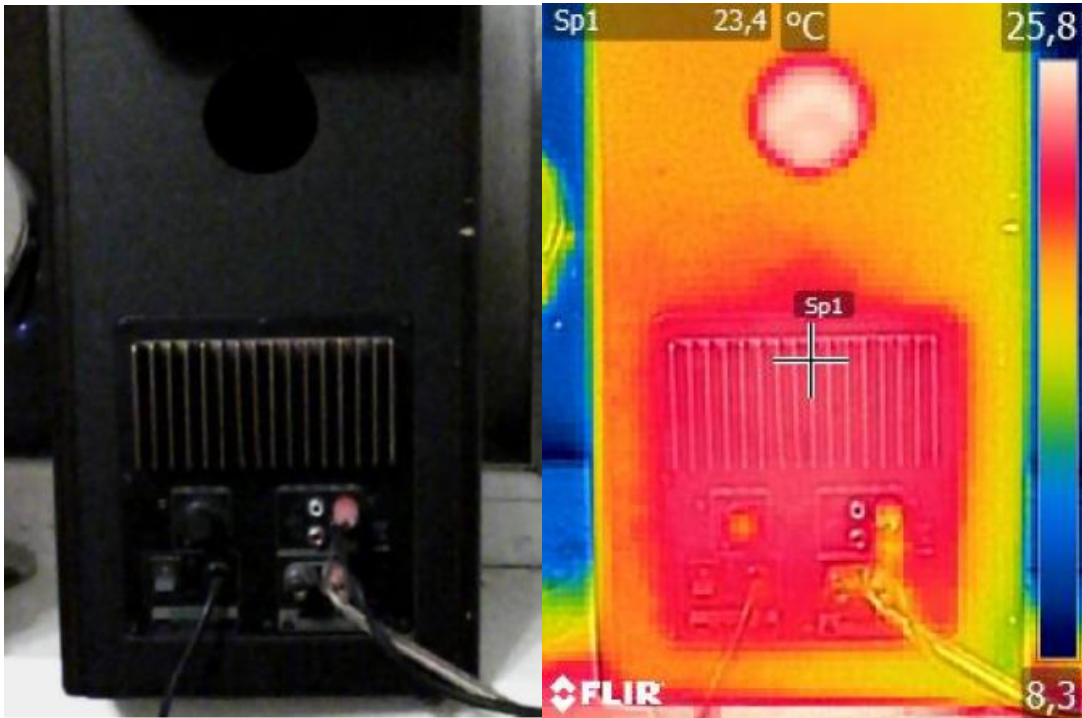


Рисунок 3.5 — Нагрів радіатора акустичної системи

Досить велика чутливість тепловізора FLIR C2 дає можливість відрізнити навіть незначну різницю температури в різних точках на поверхні об'єкту.

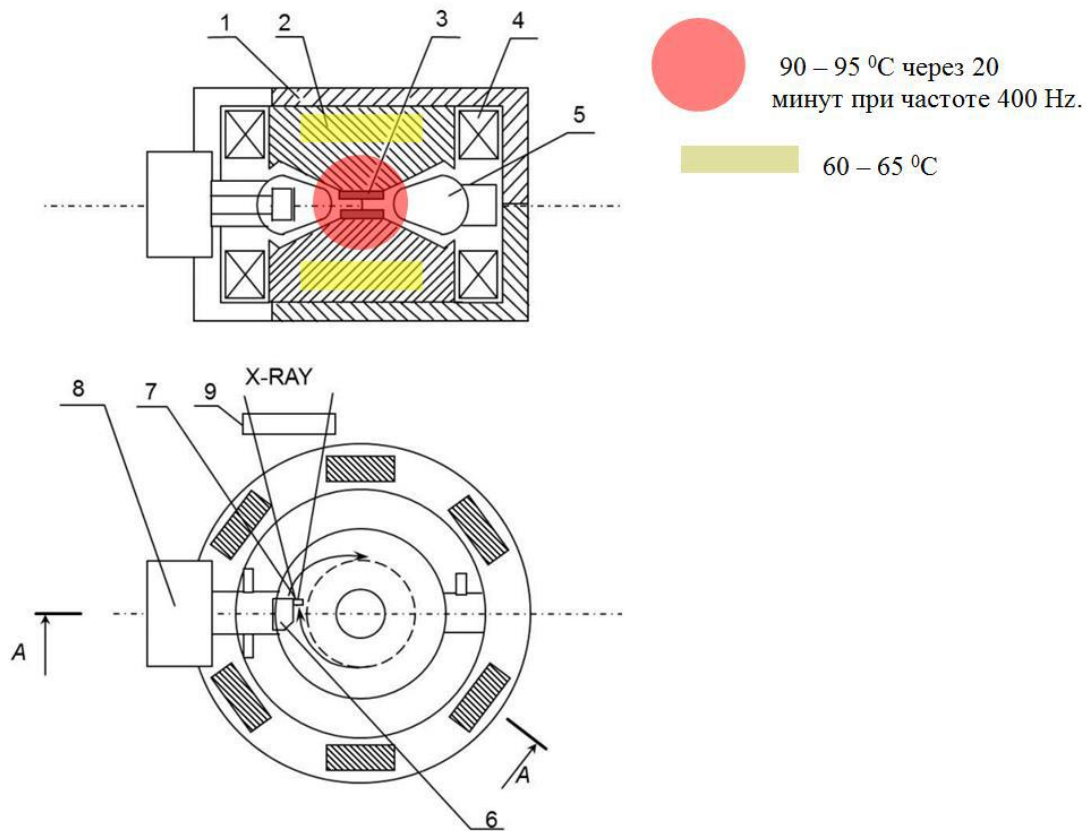
### 3.2. Короткий опис об'єкта дослідження

Якість роботи бетатронів залежить від налаштування параметрів блоків живлення, які задають режими роботи прискорювачів. Бетатрон працюють в режимі нагріву / охолодження, причому один цикл займає відповідно 45 і 15 хвилин для випромінювача і джерела живлення. В рамках цього дослідження було продемонстровано, як метод ІК термографії може бути використаний для оцінки теплових режимів блоків живлення бетатронів.

Рисунок 3.4 показує конструкцію типового Бетатрон. Кожна установка оснащена системою повітряного охолодження нагріваються елементів, тим не менш, проблемою є тепловідвід від компонент, що не контактують з охолоджуючим повітрям. До таких компонентів відноситься муздратракт, який складається з центральних полюсів (2) зі вставками (3), розділеними

діелектричними прокладками. Задня частина муздрамтеатру включає шість кріпильних елементів, також складових відсік блоку живлення (1). Сам муздрамтеатр виготовлений з пластин трансформаторної сталі, з'єднаних епоксидним клеєм.

Більша частина використовуваних в бетатроні матеріалів є низькотеплопровідною, тому тепловідвід від них шляхом теплопровідності невеликий. Слід зауважити, що до недавнього часу Бетатрон проектували з використанням стандартних розрахункових схем, тому відчувається необхідність забезпечити низький рівень нагріву ключових елементів бетатронів.

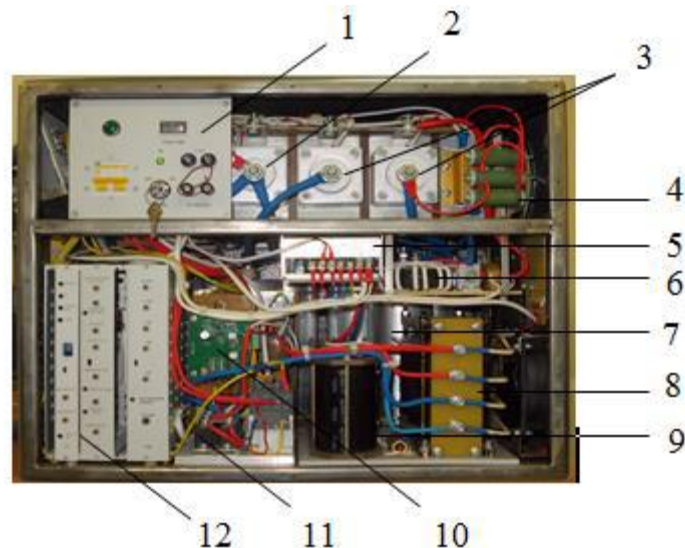


1 - магнітопровід; 2 - полюса; 3 - блок вставок; 4 - намагнічує обмотка; 5 - камера; 6 - інжектор; 7 - мішень; 8 - трансформатор; 9 - вимірювач дози

Рисунок 3.4 — Схема Бетатрон

Відомо, що однією з проблем застосування ІК термографії в радіоелектроніці є необхідність враховувати коефіцієнт випромінювання різноманітних компонент. Відсутність коригування результатів вимірювань за коефіцієнтом випромінювання призводить до вельми суттєвих помилок в величинах істинної температури, що необхідно для прогнозування робочого ресурсу компонент. Однак в цьому дослідженні акцент зроблений на інший малодосліджений аспект теплового контролю в радіоелектроніці, а саме, аналіз динаміки температурних полів, яка проявляється при включенні / виключенні апаратури. Концепція такого підходу запозичена з активного теплового контролю конструкційних матеріалів, в яких приховані дефекти виявляють по нестационарним температурним сигналам, що розвиваються на поверхні контрольованого матеріалу. Аналіз динамічних температур доцільно проводити за допомогою математичних методів дослідження нестационарних часових рядів, зокрема, інтегральні перетворення (Фур'є і вейвлет), метод декомпозиції сингулярних значень (аналіз головних компонент), нелінійний Фіттинга і багато інших.

Блок живлення малогабаритного портативного Бетатрон на енергію 7,5 MeV (рисунок 3.5) був проконтрольована за допомогою тепловізора FLIR C2. У зоні контролю блок був покритий поліетиленовою плівкою товщиною 60 мкм з метою імітувати конвекцію в закритому блоці живлення. Присутність плівки спотворювало температурні величини не більше ніж на 1,5% завдяки високій прозорості поліетилену в ІК діапазоні. Частоту записи термограмм була вибрана рівною 2 зображення в 1 хвилину, протягом 10 хвилин інспекційної сесії.



1-панель управління; 2-попередній доданий контур; 3 тиристор контуру потужності; 4-резистори попереднього контуру; 5-допоміжний джерело живлення; 6-гасить дросель; 7-конденсатори контуру потужності; 8-дросель схеми фільтрації; 9-конденсатори схеми фільтрації; 10-плата затримки включення розряду; 11-діодний модуль очищення сигналу; 12-пристрій управління

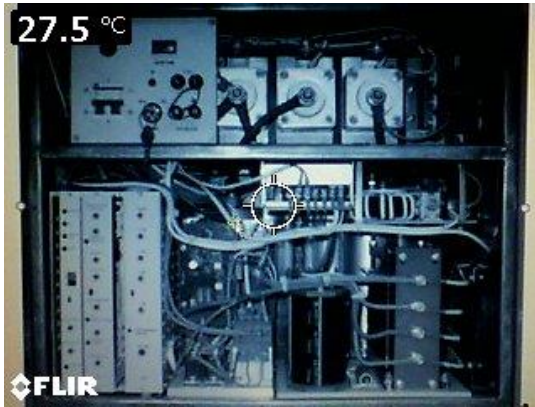
Рисунок 3.5 — Схема Бетатрон

#### 4.3. Результати тепловізійної діагностики блоку живлення Бетатрон

Приклади обробки записаних послідовностей ІК термограмм за допомогою тепловізора FLIR C2 показані на малюнку 3.6. Зауважимо, що вихідна термограма, отримана через 10 хвилин після включення Бетатрон (без включення режиму випромінювання) показує секцію блоку живлення з перегрітими тиристорами.

Статистична процедура аналізу головних компонент (Magk), застосована до всіх 20 термограм, дозволяє виділяти окремі теплові феномени в трьох перших компонентах (рисунок 3.6в-д). Перша компонента (рисунок 3.6в) нагадує вихідну ІК термограму, оскільки вона показує області з найбільшими змінами температури. Другий компонент ілюструє

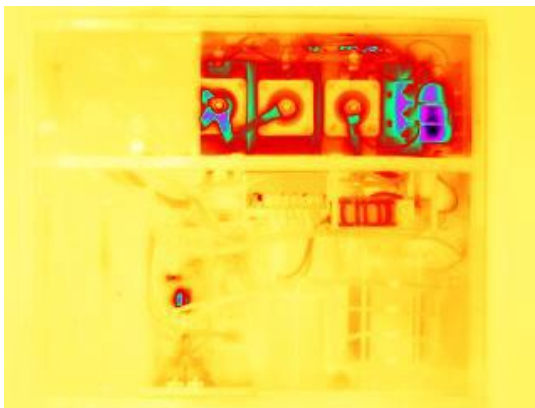
менш значущі теплові феномени, в той час як зображення третьої компоненти містить слабкі температурні сигнали.



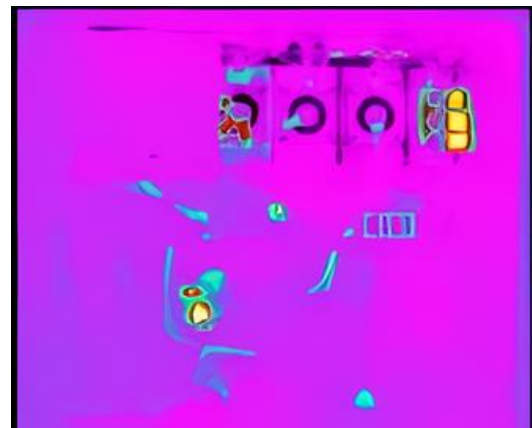
А)



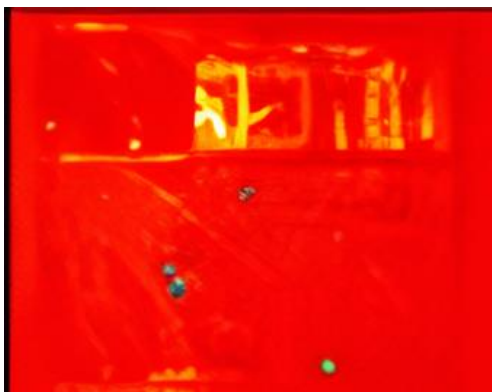
Б)



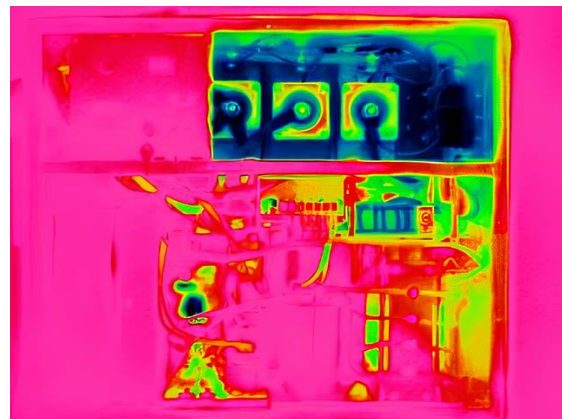
В)



Г)



Д)



Е)

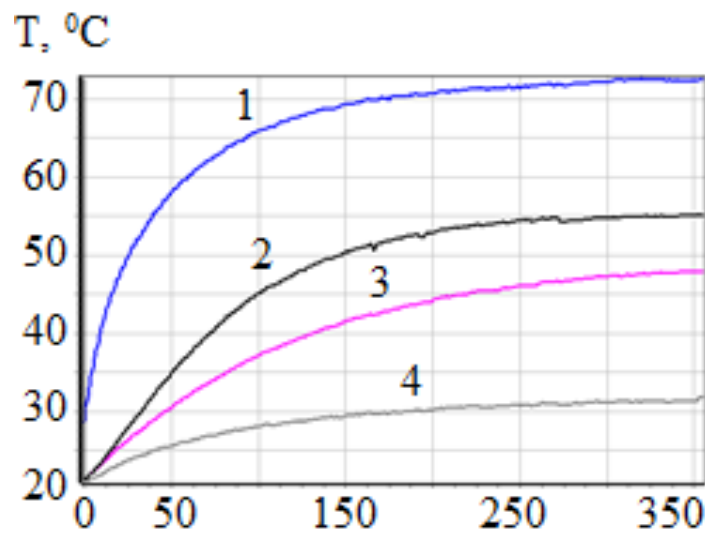
Рисунок 3.6 — Результати тепловізійної діагностики блоку живлення після включення Бетатрон

На рис.3.6 а - фотографія блоку живлення; б - ІК термограма через 10 хвилин після включення Бетатрон; в - після застосування методу аналізу головних компонент (Магк) - 1-я компонента; г - Магк, 2-я компонента; д Магк, 3-тя компонента; е – коррелограмм.

Слід нагадати, що Магк зводить послідовність з  $N$  зображень до послідовності  $N$  специфічних зображень головних компонент, з яких 3-5 перших компонент є значущими, відбиваючи динаміку температурних зон на поверхні об'єкта контролю. Всі інші компоненти містять шум. Рисунок 3.6е показує результат застосування спеціального алгоритму, суть якого зводиться до пошуку коефіцієнта кореляції між поведінкою в часі в кожній точці термограми з обраним еталонним пікселем. Результуюче зображення названо «коррелограмм» і відображає ділянки об'єкта контролю з подібним поведінням точок поверхні в часі. У дослідженому блоці живлення особливу увагу слід приділити секції з потужними тиристорами (синьо-зелена зона на рис. 3.6 е), де проектувальникам бетатронів рекомендовано посилити тепловідвід.

Слід зауважити, що переваги використання передових алгоритмів обробки даних в активному тепловому контролі стають візуально ілюстративними при використанні уявнокольорових палітр.

Рисунок 3.7 показує зміну температури в окремих точках блоку живлення (точки відзначені на термограмі зліва).



1-резистори в попередньої струмового схемою; 2-гасить дросель;  
3-тиристри контуру потужності; 4 діодний модуль очищення сигналу.

Рисунок 3.7 — Зміна температури в окремих точках блоку живлення  
Бетатрон МІБ-7,5:

#### 4.4 Висновки до Глави 3

Виконано експериментальне тепловізійне обстеження блоку живлення малогабаритного Бетатрон МІБ-7,5, причому основна увага

приділена аналізу динаміки зміни температури в окремих точках. Зокрема, продемонстрована ефективність методу аналізу головних компонент, в результаті чого в об'єкті контролю вдається виділяти теплові феномени різного рівня.

Встановлено перегрів секції блоку живлення з потужними тиристорами, в результаті чого розробникам бетатронів рекомендовано посилити тепловідвід від даних елементів блоку живлення

## ВИСНОВКИ

Використання методу інфрачервоної термографії у наукових дослідженнях і практичному використанні набуває великої популярності. Перевагою даного методу є можливість бачити візуальне зображення для порівняння температур на великих площах об'єктів досліджень. Термографія дозволяє проводити вимірювання в областях, де інші методи неможливі або небезпечні, а також перевагою даного методу є його абсолютно неінвазивність.

В результаті експериментальних досліджень, проведених в магістратській роботі, можна зробити наступні висновки:

Історично ТК виробів потужної електроніки і мікроелектроніки був однією з перших сфер застосування даного методу з метою виявлення прихованих дефектів і прогнозування їх якості. Провідні світові виробники, а також ряд вітчизняних організацій (в колишньому СРСР), розробили методики пасивного ТК, в яких об'єкти контролю стимулювали робочої або тестової електричної навантаженням. У той же час методики активного ТК, розроблені для випробувань конструкційних матеріалів, недостатньо використовуються при контролі виробів радіоелектроніки.

У силу зазначених вище факторів, представляється доцільним проведення досліджень щодо активного ТК виробів радіоелектроніки, чому і присвячена ця робота.

Отримано прості рішення, що дозволяють отримувати наближені оцінки потужності і глибини залягання локальних джерел тепловиділення в інтегральних мікросхемах.

Експериментально продемонстровано ефективність спеціалізованої обробки термограмм на прикладі контролю перехідного теплового режиму блоку живлення портативного Бетатрон 7,5 MeV, особливо, методу аналізу головних компонент, що дозволяє виділяти в окремі головні компонентах теплові текстури різного типу.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. – М: Наука, 1982. – 296 с.
2. Мисюк Ю.П. Тепловізори як сучасні інтегровані технічні засоби охорони державного кордону / Ю.П. Мисюк // Світлотехніка та Електроенергетика. – 2011. – № 3. – С. 43-49.
3. Коротаяев В.В. Основы тепловидения [Электронный ресурс] / В.В. Коротаяев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 122 с. – Режим доступа: <http://oeps.ifmo.ru/uchebn/thermography.pdf>.
4. Грабко В.В. Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету [Электронный ресурс] / В.В. Грабко, В.В. Грабко // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – Режим доступа: <http://praci.vntu.edu.ua/article/download/1316/763>.
5. ДСТУ 3518-97. Термометрія. Терміни та визначення. – Введ. 24.03.97. – К.: Держстандарт України, 1997. – 95 с.
6. Калинин М.И. Постоянная Больцмана, энергетический смысл температуры и термодинамическая необратимость / М.И. Калинин, С.А. Кононогов // Измерительная техника: научн.-техн. журн. / Комитет Рос. Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации. – 2005. – № 7. С. 5-8.
7. Брянский Л.Н. Краткий справочник метролога / Л.Н. Брянский, А.С. Дойников. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 79 с.
8. Енциклопедія термометрії / Я.Т. Луцик, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. – 428с.

9. Гордов А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М.: Металлургия, 1971. – 446 с.
10. Чепурний М. М. Тепломасообмін в прикладах і задачах: навчальний посібник / М.М. Чепурний, Н.В. Резидент. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 128 с.
11. Коэффициент излучения (степень черноты) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://temperatures.ru/pages/koefficient\\_izlucheniya](http://temperatures.ru/pages/koefficient_izlucheniya). – Назва з екрана.
12. Классификация тепловизоров и получение ими изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teplovizo.ru/klassifikaciyateplovizorov.htm>. – Назва з екрана.
13. Учебник основы термографии и тепловидения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://baltech.kz/catalog.php?catalog=164>. – Назва з екрана.
14. Minkina W. Infrared Thermography – Errors and Uncertainties / W. Minkina, S. Dudzik. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 200 p.
15. Гоц Н.Є. Підвищення точності вимірювання температури за випроміненням поверхні обертових об'єктів: дис. канд. техн. наук: 05.11.04: захищена 28.11.2003: затв. 11.02.2004 / Гоц Наталія Євгенівна; Національний ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2003. – 174 с.
16. Стороженко В.А. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом / В.А. Стороженко, В.П. Вавилов, А.Д. Волчек. – К.: Техника, 1988. – 127 с.
17. Криксунов Л.З. Тепловизоры. Справочник / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – К.: Техника, 1987. – 164 с.
18. Линевег Ф. Измерения температуры в технике: справочник / Ф. Линевег. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
19. ГОСТ Р 8.619-2006 Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 19 с.
20. Копп В.Я. Анализ внедрения инфракрасной термографи в диагностике высоковольтного оборудования / В.Я. Копп, Н.И. Кузнецова, Н.В. Серова //

Збірник наукових праць СНУЯЕтаП Загальнонаукові і спеціальні дослідження. – 2009. – № 1 (29). – С. 106-113.

21. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 399 с.

22. Справочник по приборам инфракрасной техники / Под ред. Л.З. Криксунова. – К.: Техника, 1980. – 416 с.

23. Назаренко Л.А. Приймачі інфрачервоного випромінення: розвиток і перспективи / Л.А. Назаренко, Н.Є. Гоц // Сучасні проблеми світлотехніки: матер. III Міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 2009 р. – Харків: 2009. – С. 94-

Rogalski A. Infrared devices and techniques / Rogalski, K. Chrzanowski // Opto-electronics review. – 2002. – № 10 (2). – P.111–136.

25. Rogalski A. History of infrared detectors / A. Rogalski // Opto-electronics review. – 2012. – Vol. 20. – №3. – P. 279-308.

26. Бондаренко И.Н., Технология локального микроволнового нагрева / И.Н. Бондаренко, Г.И. Бендеберя, А.Б. Галат, Е.А. Горбенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2019. Вып. 196, с. 138-144.

27. Bondarenko I.N., The local microwave heating / I.N. Bondarenko, G.N. Bendeberya, A.B. Galat, E.A. Gorbenko // Telecommunications and Radio Engineering, vol. 78, 2019, N 11, pp.1005-1013.

28. Бендеберя Г.Н., Исследование температурных зависимостей характеристик излучения мощных светодиодов / Г.Н. Бендеберя, И.Н. Бондаренко, Е.Г. Маковская // Сб. научн. трудов 8 Международной научн. конф. «Функциональная база нанoeлектроники», Харьков-Одесса, 2015, 28.09.-2.10.2015. с.188-191.

29. Бендеберя Г.Н., Оптический блок для измерения характеристик излучения мощных светодиодов в реальных условиях эксплуатации / Г.Н. Бендеберя, И.Н. Бондаренко, Е.Г. Маковская // Сб. научн. трудов 8 Международной научн. конф. «Функциональная база нанoeлектроники», Харьков-Одесса, 2015, 28.09.-2.10.2015. с.192-195.

30. Бендеберя Г. Н., Коррекция спектра изучения искусственных источников света / Г.Н. Бендеберя, И.Н. Бондаренко, Е.Г. Маковская // Материали XVII Міжнародної науково-технічної конференції „Приладобудування: стан і перспективи”, 15-16 травня 2018, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, С.35.
31. Бондаренко І. М., Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: Навчальний посібник. / І. М. Бондаренко, О. В. Бородін, В. П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2019. – 176 с.