

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко

ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

*Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як підручник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»,*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензенти: *Сучков, Г.М.*, д.т.н, професор, зав. кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики факультету комп'ютерних та інформаційних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Середюк, О.Є., д.т.н, професор, зав. кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу

Відповідальний редактор *Богдан, Г.А.*, к.т.н

Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 5 від 17.05.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Протасов Анатолій Георгійович, д-р пед. наук, проф.
Лисенко Юлія Юріївна, канд. техн. наук

ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Технології теплового неруйнівного контролю [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133 с.

Розглянуто закони передачі теплової енергії, викладено фізичні основи реєстрації температури та наведені схеми побудови вимірювальних приладів, в тому числі й приладів для бесконтактного визначення температури. Розглянуто конструкції загальнозживаних типів пірометрів, описано принцип їх дії та специфіку застосування. Подано огляд конструкцій тепловізійних систем, розглянуто способи вирішення завдань автоматизації процесів вимірювання температури з метою сприяти розвитку у студентів творчого мислення і спонукати їх до самостійного аналізу інженерних рішень. Також розглянуто фізичні принципи теплової дефектоскопії, наведено приклади застосування моделювання у сучасних дослідженнях.

Для студентів та аспірантів вищих навчальних закладів спеціальності «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» та споріднених спеціальностей, а також наукових та інженерно-технічних працівників, фахівців в приладобудуванні та неруйнівному контролі.

© А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	6
ПЕРЕДМОВА	8
ВСТУП.....	9
1. ЗАКОНИ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ.....	10
1.1. Теплова енергія та способи її передачі.....	10
1.2. Закони інфрачервоного випромінювання	13
1.2.1. Закони інфрачервоного випромінювання для АЧТ	16
1.2.2. Інфрачервоне випромінювання реальних тіл	21
1.2.3. Пропускання інфрачервоного випромінювання атмосферою	22
1.3. Фізичні основи вимірювання температури	24
Запитання для перевірки.....	29
2. АПАРАТУРНІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	30
2.1. Контактні засоби вимірювання температури.....	30
2.2. Безконтактні засоби вимірювання температури.....	34
Запитання для перевірки.....	37
3. ПІРОМЕТРИ	38
3.1. Яскравісні пірометри.....	38
3.2. Колірні пірометри	40
3.3. Радіаційні пірометри та радіометри.....	42
Запитання для перевірки.....	47
4. ОСНОВИ ТЕПЛОБАЧЕННЯ	48
4.1. Тепловізори з оптико-механічним скануванням	48
4.1.1. Основні характеристики тепловізорів	49
4.1.2. Оптичні системи тепловізорів.....	51
4.1.3. Системи сканування	55
4.2. Оптичні системи промислових тепловізорів з оптико-механічним скануванням	58
4.2.1. Оптична схема тепловізора «ТВ-03».....	59
4.2.2. Оптична схема тепловізора «Радуга»	60
4.2.3. Функціональна схема тепловізора «Янтар».....	61

4.3. Тепловізори з електронним скануванням	63
4.4. Прилади з зарядовим зв'язком	66
4.4.1. Принцип дії приладів з зарядовим зв'язком	66
4.4.2. Прилади з зарядовим зв'язком у оптоелектроніці	70
4.4.3. Формування ПЗЗ матрицею кольорового зображення	75
4.4.4. ПЗЗ в системах формування інфрачервоних зображень	76
4.4.5. CMOS технологія.....	77
4.5. Тепловізори третього покоління	79
Запитання для перевірки.....	81
5. ТЕПЛОВІ ДЕФЕКТОСКОПИ.....	83
5.1. Джерела теплового збудження	84
5.2. Теплометричний дефектоскоп.....	88
Запитання для перевірки.....	91
6. ПРИКЛАДИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ ДЕФЕКТОСКОПІВ	92
6.1. Контроль якості теплоізоляції термоса	92
6.2. Контроль гарячого прокату	93
6.3. Приклад використання спеціалізованої системи.....	94
6.4. Теплові дефектоскопи-дрони	95
Запитання для перевірки.....	96
7. ЗАВАДИ В ПРОЦЕСІ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ	97
7.1. Вплив коефіцієнта теплового випромінювання на результати контролю	97
Запитання для перевірки.....	99
8. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ.....	100
8.1. Методи вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів	100
8.2. Прилади з оптичним імпульсним нагріванням.....	103
Запитання для перевірки.....	104
9. УЛЬТРАЗВУКОВІ ТЕРМОМЕТРИ	105
9.1. Загальні відомості	105
9.2. Методи побудови ультразвукових термометрів.....	106
9.3. Способи збудження і реєстрації ультразвукових сигналів.....	107
9.4. Резонансний ультразвуковий термометр	108
9.5. Імпульсний ультразвуковий термометр	110

Запитання для перевірки.....	111
10. ШУМОВІ ТЕРМОМЕТРИ.....	112
10.1. Загальні відомості.....	112
Запитання для перевірки.....	116
11. ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ.....	117
11.1. Тепловізійний метод контролю вологості	117
11.2. Вібротепловізійний метод контролю цілісності матеріалу.....	117
11.3. Термохвильовий метод контролю	118
11.4. Інші методи контролю.....	119
Запитання для перевірки.....	120
12. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ	121
12.1. Моделювання об'єктів простої форми у форматі 2D	122
12.2. Моделювання стільникових структур у форматі 3D	125
Запитання для перевірки.....	129
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

Умовні скорочення

ТНК	– тепловий неруйнівний контроль
ІЧ-випромінювання	– інфрачервоне випромінювання
АЧТ	– абсолютно чорне тіло
КТВ	– коефіцієнт теплового випромінювання
МПТШ	– міжнародна практична температурна шкала
ЛХА	– лабораторія холодних атомів
ОК	– об'єкт контролю
е.р.с.	– електрорушійна сила
ТО	– термометр опору
ПВ	– приймач випромінювання
ВКП	– відеоконтрольний пристрій
СФВ	– система фокусування і відхилення
ОС	– оптична система
ПЗЗ	– прилад із зарядним зв'язком
МДН структура	– структура метал-діелектрик-напівпровідник
МДП структура	– структура метал-діелектрик- провідник
ФСЗ	– формувач сигналів зображення
РЗ	– регістр зчитування
CMOS	– Complementary Metal Oxide Semiconductor
КМОН	– комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник
ТД	– тепловий дефектоскоп
ДТЗ	– джерело теплового збудження
ККД	– коефіцієнт корисної дії
ТЗ	– тепловий зонд
БПЛА	– безпілотний літальний апарат
АТНК	– активний тепловий НК
АРП	– автоматичне регулювання підсилення
ТФХ	– теплофізичні характеристики
УЗ	– ультразвуковий
КМ	– комп'ютерне моделювання

Позначення

t	– час
q	– густина теплового потоку
T	– температура
α	– коефіцієнт тепловіддачі
$t_{p,\Gamma}$	– температура рідини або газу,
t_C	– температура середовища
a	– коефіцієнт температуропровідності
c	– теплоємність речовини
ρ	– густина речовини
n	– нормаль до поверхні об'єкту,
T_c	– температура навколишнього середовища
c_0	– швидкість світла
W	– енергія рівнів n і m ;
h	– стала Планка, $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ [Дж·с]
Me_λ	– спектральна густина енергетичної світимості
Me	– інтегральна густина енергетичної світимості
σ	– стала Стефана-Больцмана
$I(\varphi)$	– сила випромінювання
L	– енергетична яскравість

ПЕРЕДМОВА

Підручник «Технології теплового неруйнівного контролю» призначений для студентів, що здобувають ступінь бакалавра за освітніми програмами «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики» та «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Завдяки ефективності тепловий неруйнівний контроль на сьогодні має найширше застосування з усіх методів неруйнівного контролю. В основі теплового контролю лежить процес вимірювання температури та оцінка її значення, тому у підручнику розглянуто закони передачі теплової енергії, викладено фізичні основи вимірювання температури та наведені схеми побудови вимірювальних приладів. Окремий розділ присвячено пірометрам – приладам, які використовуються для безконтактного визначення температури. Розглянуто конструкції загальноживаних типів пірометрів, описано принцип їх дії та наведено приклади їх застосування.

У підручнику подано огляд конструкцій рінманітних тепловізійних систем, від перших, що мають оптико-механічне сканування, до найсучасніших електронних приладів. Акцент зроблено на способах вирішення задач, які є спільними для тепловізорів різних поколінь, з метою сприяти розвитку у студентів творчого мислення і спонукати їх до самостійного аналізу інженерних рішень.

Також розглянуто фізичні принципи теплової дефектоскопії та приведено функціональні схеми теплових дефектоскопів. Наведено приклади їх використання для виявлення дефектів різного типу у конструкційних матеріалах.

Завдяки впорядкованому та систематизованому матеріалу у запропонованому підручнику, студенти спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» мають змогу поглибити розуміння принципів побудови систем теплоснабження та методів теплового неруйнівного контролю.

ВСТУП

В основі теплового неруйнівного контролю лежить реєстрація теплових полів, вимірювання температури або перепаду температури на різних ділянках об'єкта. Теплове зображення містить інформацію про внутрішню структуру об'єкта, що дає можливість виявляти різноманітні аномалії та приховані дефекти структури.

Ще задовго до відкриття радіоактивності, електромагнітних та ультразвукових коливань, які були покладені в основу традиційних методів неруйнівного контролю, було відомо, що тепловий потік, який протікає в об'єктах, несе інформацію про їх фізичні властивості та структуру. Однак, відсутність на той момент засобів вимірювання температури, які б дали швидку оцінку її зміни, завадило широкому розповсюдженню методу з метою виявленню локальних змін.

На сьогодні тепловий неруйнівний контроль надає можливість виявити дефекти у різних матеріалах: композитних виробках, багат шарових структурах, армованих, клеєних та зварних конструкціях, теплозахисних оболонках та ін. Крім того, програми тепловізійного моніторингу запроваджені на багатьох об'єктах будівництва, транспорту, енергетики та на всіх атомних станціях України та західних країн.

У теперішній час теплова діагностика та контроль являють собою високотехнологічну галузь прикладних досліджень, яка об'єднує досягнення не тільки у створенні тепловізійної апаратури, але й у теорії теплопередачі, інформаційних і комп'ютерних технологіях.

1. ЗАКОНИ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Даний розділ присвячено огляду термінів та визначень в тепловому неруйнівному контролі (ТНК) та поясненням фізичної сутності явищ пов'язаних з тепловою енергією. Наведено основні закони передачі теплової енергії, її випромінювання, розповсюдження та поглинання. Розглянуто фізичні основи вимірювання температур, методика побудови температурних шкал та актуальні термодинамічні температурні шкали [1, 2].

1.1. Теплова енергія та способи її передачі

Теплова енергія – це енергія руху молекул. Одним з проявів теплової енергії є її передача і поширення в просторі. Поширення відбувається у вигляді теплообміну між двома (або декількома) тілами, що мають різну температуру. Більш нагріте тіло передає частину своєї енергії менш нагрітому, яке в процесі поглинає цю енергію.

Передача тепла – це процес мимовільний та незворотній, і призводить до вирівнювання температур. Існують три способи передачі теплової енергії:

- *теплопровідність* – молекулярний перенос теплоти на мікрорівні, за рахунок передачі зміни інтенсивності коливань від молекули до молекули;
- *конвекція* – перенесення теплової енергії частинками речовини, рідини, або газу;
- *випромінювання* – передача енергії шляхом випускання електромагнітних хвиль. Діапазон електромагнітних коливань для теплового випромінювання – $3 \cdot 10^{11} \div 4 \cdot 10^{14}$ Гц, довжина хвилі $1 \text{ мм} \div 0.75 \text{ мкм}$.

Тепловим полем називається сукупність миттєвих значень температури у всіх точках тіла (або середовища) в певний момент часу. У випадку, коли температура тіла змінюється в часі, то таке поле називають нестационарним, якщо ж температура тіла має постійну величину і не залежить від часу – стаціонарним тепловим полем.

Аналітичні вирази для теплових полів мають вигляд: для нестационарного – $T = f(x, y, z, t)$, де t – час; для стаціонарного – $T = f(x, y, z)$.

В залежності від системи координат, в якій вимірюється температура поле може бути тривимірним, двовимірним або одновимірним.

Основний закон теплопровідності – закон Фур'є

Основний закон теплопровідності базується на експериментальних дослідженнях процесу розповсюдження тепла в твердих тілах та показує, що вектор густини теплового потоку (q) є пропорційним вектору градієнта температури (T) в тій же точці і в той же момент часу [2]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T,$$

де q – густина теплового потоку, що показує кількість теплоти за одиницю часу віднесена до одиниці площі $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$; λ – коефіцієнт теплопровідності $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$, T – температура.

Знак «-» означає, що вектори q і T спрямовані протилежно. Закон Фур'є використовують для твердих тіл.

Основний закон конвекції

Тепловий потік, що виникає при передачі теплової енергії способом конвекції залежить від різниці температури теплоносія та температури навколишнього середовища.

$$q = \alpha(t_{p,\Gamma} - t_c),$$

де: α – коефіцієнт тепловіддачі $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$, $t_{p,\Gamma}$ – температура рідини або газу, t_c – температура середовища.

Закон теплового випромінювання

Величина теплового потоку, що виникає при передачі теплової енергії випромінюванням, пропорційна значенню температури у четвертій степені.

$$q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де C – коефіцієнт випромінювання тіла $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right]$.

Диференціальне рівняння теплопровідності

Теплові процеси, що відбуваються в твердому тілі, описує диференціальне рівняння в частинних похідних другого порядку. Це рівняння називається

диференціальним рівнянням теплопровідності і дозволяє визначити температуру в будь якій точці твердого тіла в будь якій момент часу.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності $\left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$.

Коефіцієнт температуропровідності a характеризує швидкість поширення температури у просторі та пов'язаний з іншими коефіцієнтами:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

де λ – показує здатність тіла передавати теплову енергію; c – теплоємність речовини, яка визначається як кількість енергії необхідної для нагріву одиниці маси речовини на 1° ; ρ – густина речовини.

Стаціонарне рівняння теплопровідності

У випадку, коли температура тіла є постійною в часу, використовують стаціонарне рівняння теплопровідності, яке має наступний вигляд:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

Як видно з наведеного рівняння, стаціонарне теплове поле не залежить від часу і теплофізичних характеристик речовини.

Для вирішення диференціального рівняння теплопровідності та знаходження єдиного правильного рішення необхідно задати граничні умови на поверхні об'єкту та початкові умови. Розглядають чотири види граничних умов.

1. Граничні умови першого роду. Задається розподіл температури на поверхні об'єкту:

$$T = f(x, y, z, t).$$

2. Граничні умови другого роду. Задається густина теплового потоку на поверхні об'єкту:

$$q = f(x, y, z, t).$$

3. Граничні умови третього роду. Задається температура навколишнього середовища та інтенсивність теплообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c),$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, n – нормаль до поверхні об'єкту, T_c – температура навколишнього середовища.

4. Граничні умови четвертого роду характеризують рівність теплових потоків, що проходять через границю розділу двох тіл:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n}.$$

Початкові умови враховують температуру навколишнього середовища або початкову температуру об'єкту: $T_0 = T_c$.

На рис. 1.1 показано розподіл температури всередині твердого тіла при умові його нагріву тепловим потоком q .

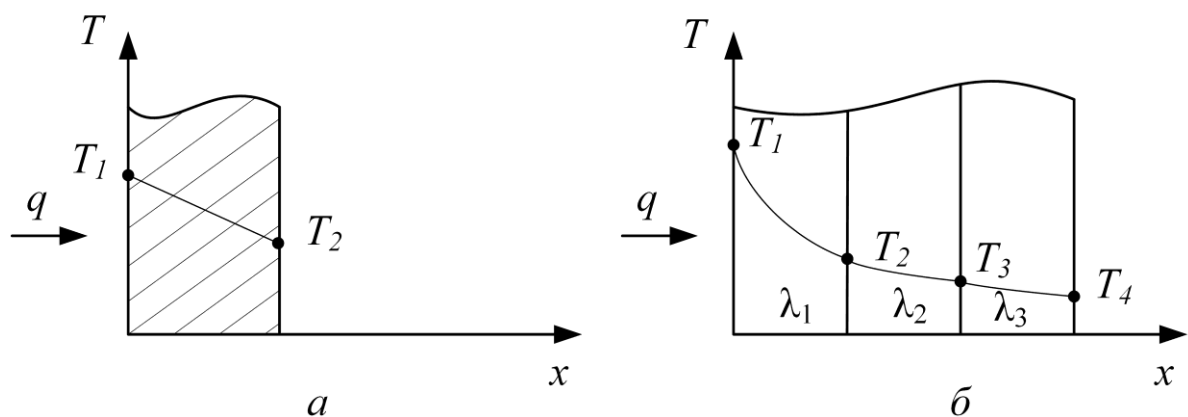


Рис. 1.1. Розподіл температури в середині одношарового (а) та тришарового (б) матеріалу, де $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$

1.2. Закони інфрачервоного випромінювання

Всі тіла, які мають температуру вище абсолютного нуля, тобто 273,15 К, є джерелом інфрачервоного випромінювання. Характер цього випромінювання залежить від агрегатного стану речовини – тверде тіло, рідина або газ.

Згідно з теорією Н. Бора, теплове випромінювання викликане переходами атомів з більш високих енергетичних рівнів на нижчі. Ці переходи супроводжуються випусканням квантів, енергія яких дорівнює:

$$h \frac{c_0}{\lambda} = W_n - W_m,$$

де c_0 – швидкість світла; λ – довжина хвилі; W – енергія рівнів n і m ; h – стала Планка, $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ [Дж·с].

Сpektри випромінювання газів складаються з окремих ліній та смуг, характерних для конкретного газу. У твердих тіл спектри випромінювання стають суцільними в наслідок сильної взаємодії між молекулами в середині цих тіл.

Інфрачервоне випромінювання (ІЧ-випромінювання) займає досить широкий спектральний діапазон. З одного боку ІЧ-діапазон межує з видимим випромінюванням, а з іншого – електромагнітні коливання радіодіапазону. На рис. 1.2 показано місце розташування ІЧ-випромінювання у спектрі електромагнітних хвиль.

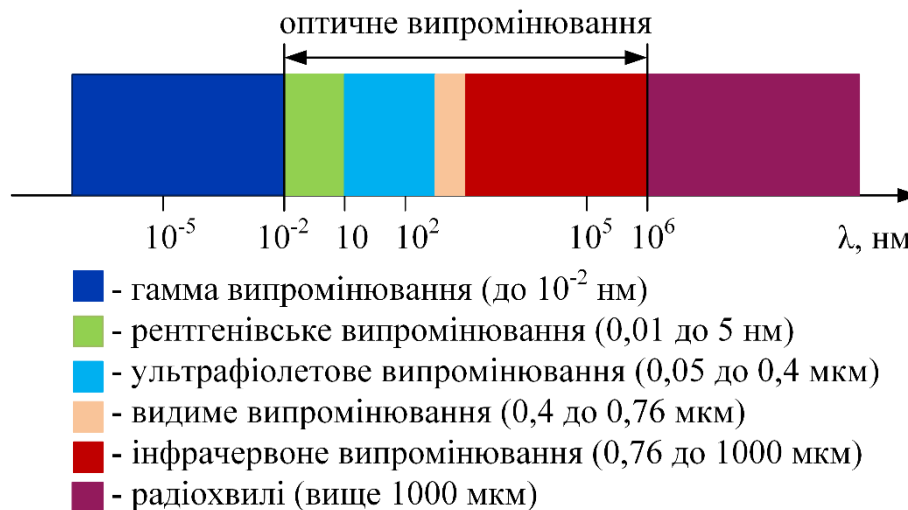


Рис. 1.2. Спектр електромагнітних хвиль

Найменшу довжину хвилі у спектрі електромагнітних хвиль має гамма випромінювання, джерелом якого є радіоактивні речовини. Це випромінювання має велику проникаючу здатність і є дуже небезпечним для живих організмів. Наступним у спектрі розташовані рентгенівські промені, які були відкриті в 1915 році. Рентгенівські промені з'являються при гальмуванні швидких електронів в мішенях. Особливістю таких променів є їх велика проникаюча здатність та здатність викликати почорніння фотоемульсії, свічення екрану, що має флуоресцентне покриття.

Джерелом ультрафіолетового випромінювання є Сонце. Ультрафіолет сильно поглинається повітрям та склом. Половина випромінювання Сонця це ІЧ-випромінювання, яке є невидимим для людського ока. Таке випромінювання, як і видиме світло, поширюється по прямій лінії, підпорядковується законам оптики та може відбиватися, заломлюватися, зазнавати дифракції, інтерференції та поляризації. Швидкість поширення ІЧ-променів дорівнює швидкості поширення світла.

ІЧ-область спектра займає діапазон від 0,76 мкм до 1000 мкм. Цей діапазон умовно поділяють на чотири області:

- ближня область: $\lambda = 0,76 \div 3$ мкм;
- середня область: $\lambda = 3 \div 6$ мкм;
- дальня область: $\lambda = 6 \div 15$ мкм;
- наддалека область: $\lambda = 15 \div 1000$ мкм.

Види випромінювачів

Розрізняють три види випромінювачів ІЧ-випромінювання: абсолютно чорне тіло (АЧТ), сірий випромінювач та селективний випромінювач [2].

1. АЧТ при певній температурі випромінює та поглинає максимум випромінювання. Такий випромінювач зазвичай використовується як еталонний у випадках визначення теплофізичних характеристик реальних тіл. Поняття АЧТ ідеалізоване, в природі такого тіла не існує. Всі реальні тіла є або сірими, або селективними.

2. Сіре тіло - це тіло, яке має безперервний спектр випромінювання і криву розподілу енергії випромінювання по спектру подібну до кривої АЧТ. На відміну від АЧТ, яке має тільки власне випромінювання, сіре тіло здатне частково відбивати випромінювання, що падає на нього від інших тіл.

Фактично, сірих тіл, так само як і абсолютно чорних, в природі не існує. Жодне тіло в усьому ІЧ-діапазоні не є сірим. Проте, в окремих спектральних діапазонах багато тіл можна вважати сірими з певною точністю.

3. Селективне тіло – це тіло, що володіє змінною випромінювальною здатністю в різних діапазонах довжин хвиль. Всі природні тіла мають селективність, але в різній мірі.

Найбільшою селективністю володіють гази. Вони мають здатність до випромінювання тільки у вузьких смугах спектру. Найменшу селективність мають тверді тіла з шорсткою поверхнею та діелектричними властивостями. На рис. 1.3 показано характер спектрів випромінювання для трьох видів ІЧ-випромінювачів.

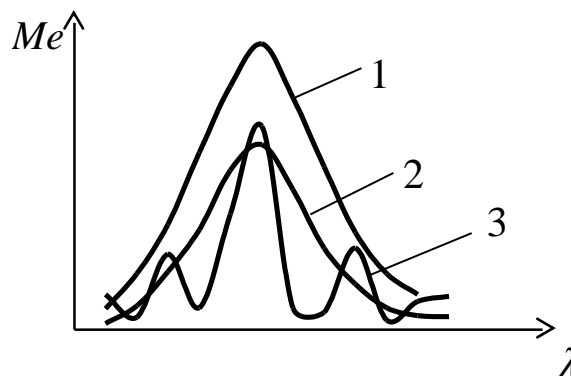


Рис. 1.3. Спектр випромінювання АЧТ (1), сірого тіла (2) і селективного тіла (3)

Припущення, що нагріті тіла є джерелом невидимого випромінювання, з'явилися ще на початку ХІХ століття. У 1800 році англійський астроном В.Гершель під час проведення серії дослідів з оптичним спектром сонячного світла намагався з'ясувати, яку нагріваючу здатність мають різні ділянки сонячного спектру [3]. Для цього В.Гершель, за допомогою призми, розклав біле світло на складові і вимірював

ртутним термометром температуру ділянок цього спектру. Різні ділянки спектру по різному нагрівали термометр. Вчений вичувив, що при переміщенні термометра за межі червоного оптичного діапазону спектра, нагрівання термометра збільшувалось. Він дійшов висновку, що існує випромінювання, яке не видиме для людського ока, але реєструється термометром. Це випромінювання В.Гершель назвав інфрачервоним або тепловим.

Після відкриття інфрачервоного випромінювання було встановлено безпосередній зв'язок інтенсивності теплового випромінювання тіла з його температурою. Цей зв'язок було обґрунтовано в законах теплового випромінювання Стефана-Больцмана, Віна і Планка.

У 1879 році австрійський фізик Йозеф Стефан експериментально показав, що енергія, яка випромінюється нагрітим тілом, пропорційна 4-ому ступеню його абсолютної температури. Таку саму залежність, але теоретично, отримав інший австрійський фізик Людвиг Больцман. Він застосував закони термодинаміки до процесів випромінювання і у 1884 році теоретично вивів закон теплового випромінювання для абсолютно чорного тіла. Тепер цей закон відомий як закон Стефана-Больцмана.

Німецький фізик, приват-доцент Берлінського університету Вільгельм Він у 1893 році встановив, так званий, теоретичний закон зміщення. В. Віну належить розповсюдження на теплове випромінювання поняття температури та ентропії і саме В.Він показав, що зі збільшенням температури максимум випромінювання у спектрі абсолютно чорного тіла зміщується в бік коротких хвиль.

Через 100 років після відкриття інфрачервоного випромінювання, у 1900 році, відомому вченому з Німеччини Макс Планку вдалося вивести формулу, яка достатньо пояснювала експериментальні дані і дуже добре узгоджувалась з результатами вимірювань [4]. З формули Планка логічно випливали закони Стефана-Больцмана і Віна.

Таким чином, було створене теоретичне підґрунтя, що дало можливість винайти прилади, які не тільки дистанційно вимірювали температуру, а й робили теплове поле видимим.

1.2.1. Закони інфрачервоного випромінювання для АЧТ

Закон Планка

Залежність спектральної густини енергетичної світимості АЧТ від довжини хвилі і температури виведена німецьким фізиком М. Планком та має вигляд:

$$M_{e\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}, \quad (1.1)$$

де $M_{e\lambda}$ – спектральна густина енергетичної світимості $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}} \right]$; C_1, C_2 – постійні коефіцієнти (пов'язані зі світовими постійними).

Криві, що демонструють розподіл спектральної густини енергетичної світимості АЧТ в залежності від довжини хвилі і температури приведено на рис. 1.4.

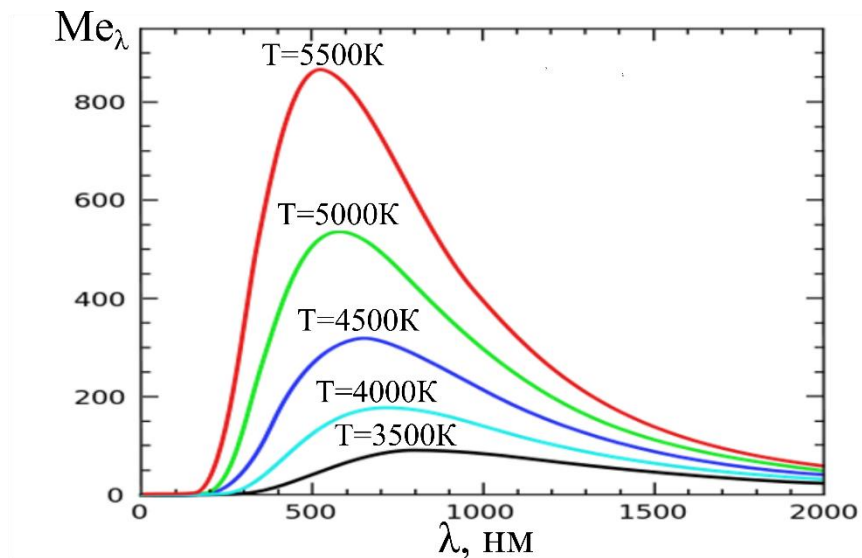


Рис. 1.4. Криві Планка

Закон Віна

Закон Віна визначає довжину хвилі випромінювання λ_{max} , яка відповідає максимуму кривої Планка, тобто максимуму випромінювання АЧТ при даній температурі (рис. 1.5).

$$\lambda_{max} = \frac{C}{T},$$

де C – постійна Віна, що має значення 2897,8 мкм·К.

Аналіз рис. 1.5 показує, що зі збільшенням температури максимум випромінювання зсувається вліво по спектру, тому цей закон називають *законом зміщення*.

Закон Віна можна математично вивести з закону Планка шляхом диференціювання по довжині хвилі.

Закон Стефана - Больцмана

Закон Стефана-Больцмана визначає залежність інтегральної густини енергетичної світимості АЧТ від температури. Інтегральна густина енергетичної світимості прямо пропорційна температурі у четвертій степені:

$$Me = \sigma \cdot T^4,$$

де Me – інтегральна густина енергетичної світимості; σ – стала Стефана-Больцмана,

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{e}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^4} \right]; T - \text{температура.}$$

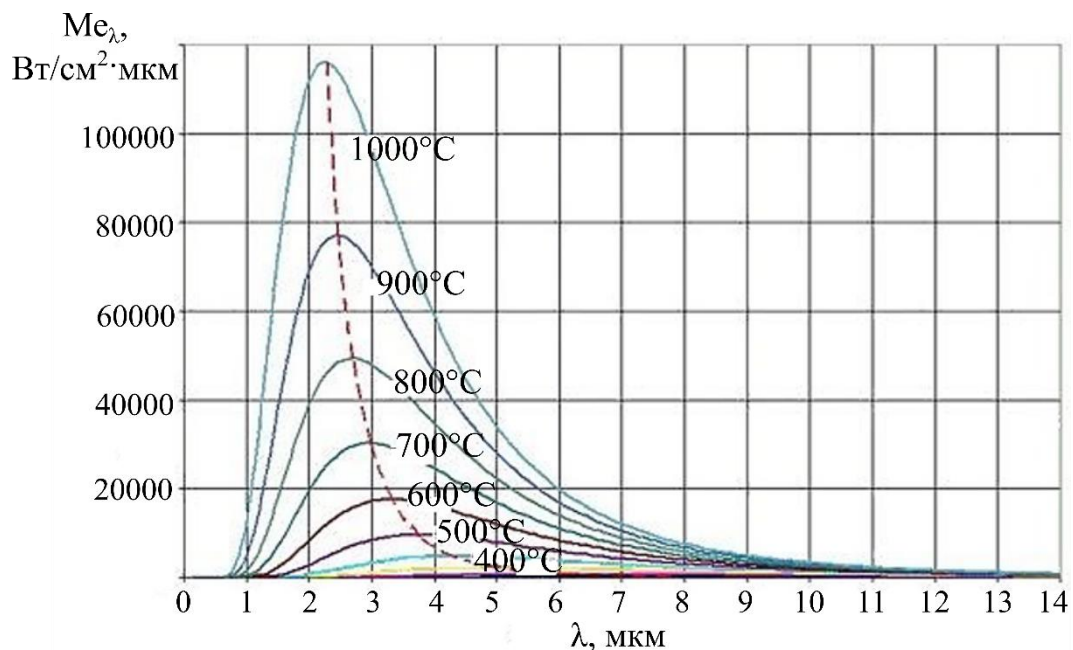


Рис. 1.5. Графічна інтерпретація закону зміщення Віна

Закон Стефана - Больцмана отримано шляхом інтегрування виразу (1.1) закону Планка по всьому спектру випромінювання.

Закон Ламберта

Даний закон описує зміну сили випромінювання в залежності від кута спостереження. Закон справедливий тільки для АЧТ та матової поверхні і має вигляд:

$$dI(\varphi) = L \cdot dS \cdot \cos \varphi,$$

де $I(\varphi)$ – сила випромінювання; L – енергетична яскравість; dS – елемент площі поверхні, що випромінює.

Графічна залежність $dI(\varphi)$ зображується на площині за допомогою кола, дотичного до поверхні dS (рис. 1.6).

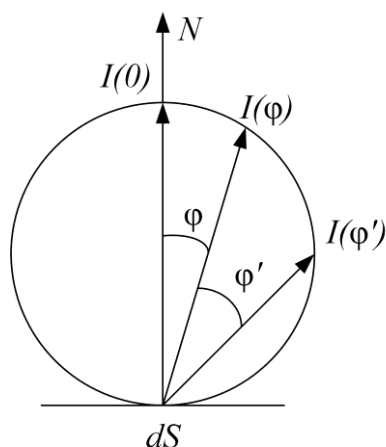


Рис. 1.6. Графічна інтерпретація закону Ламберта, N - нормаль до поверхні

Використовуючи закон Ламберта, можна визначити енергетичну світимість в напрямку φ і в заданому просторовому куті $d\omega$.

$$dMe = L \cdot \cos \varphi \cdot d\omega. \quad (1.2)$$

З виразу (1.2) можна отримати залежність енергетичної світимості від енергетичної яскравості:

$$Me = L \cdot \pi.$$

Геометричне місце кінців вектору сили випромінювання $I(\varphi)$ у заданому напрямку називають *індикатрисою сили випромінювання*.

Моделі абсолютно чорних тіл

Моделі АЧТ широко використовують у вимірювальних приладах в якості еталонів, що забезпечують повне поглинання теплового потоку, або повне випромінювання, яке максимально наближене до випромінювання АЧТ. На рис. 1.7 показано конструкції найбільш вживаних моделей АЧТ, що працюють на поглинання теплового випромінювання.

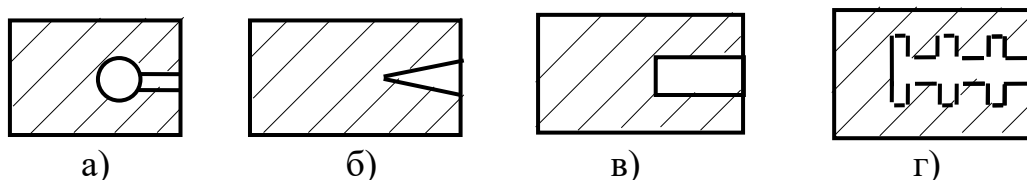


Рис. 1.7. Конструкції поглинаючих моделей АЧТ: а - сферична, б - клиноподібна, в - циліндрична, г - ступенева

Для кращого поглинання теплового випромінювання внутрішні порожнини моделей АЧТ покриваються чорною фарбою. Конструкції зроблені таким чином, що теплові промені потрапляючи всередину багаторазово відбиваються від внутрішньої поверхні порожнини моделі і не мають змоги вийти назовні. Таким

чином, властивість моделі поглинати теплове випромінювання, що потрапляє до неї, максимально повторює властивість АЧТ.

На рис. 1.8 показано залежність коефіцієнта поглинання теплового випромінювання від співвідношення розмірів порожнини моделі АЧТ.

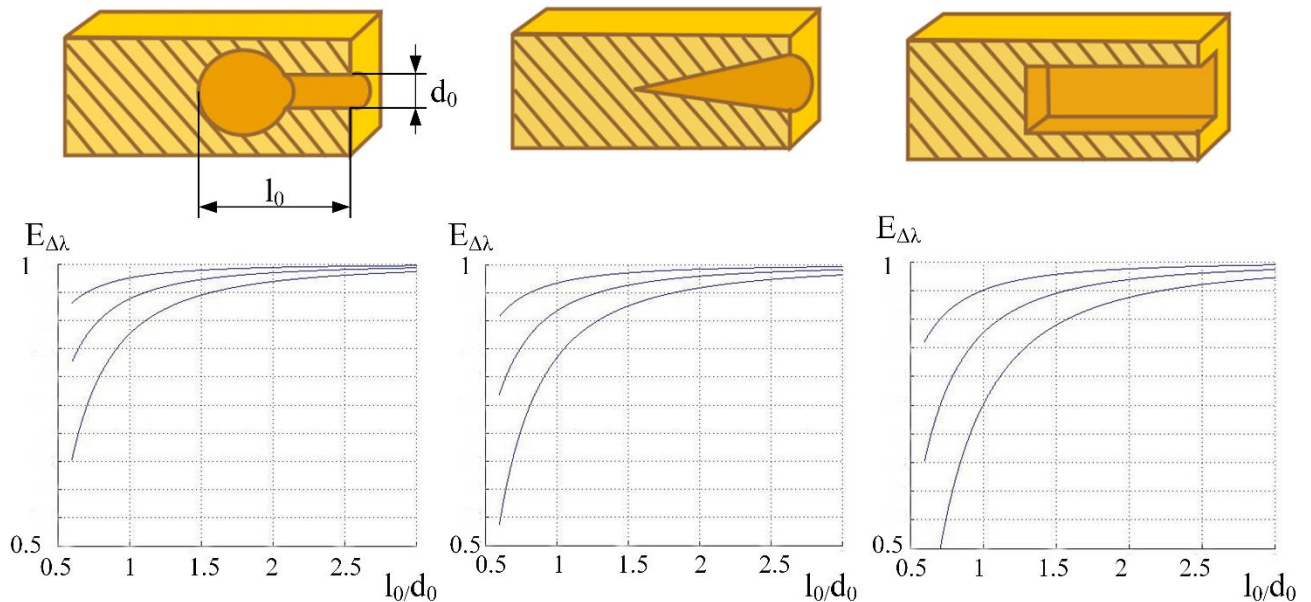


Рис. 1.8. Залежність коефіцієнта поглинання теплового випромінювання від розмірів моделі АЧТ

Моделі АЧТ, що працюють на випромінювання, являють собою спеціальні пристрої, випромінювання яких у потрібному діапазоні температур наближене до випромінювання АЧТ. На рис. 1.9 показано конструкцію трубчатого випромінювача.

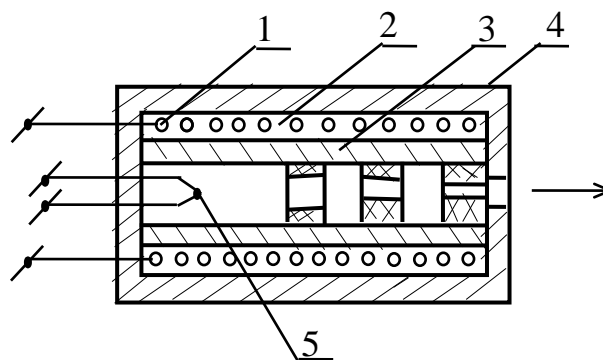


Рис. 1.9. Модель АЧТ, що випромінює (1 – спіраль нагрівача, 2 – теплоізолятор, 3 – трубчатая основа, 4 – кожух, 5 – контрольна термопара)

Принцип дії пристрою полягає у наступному. Спіраль нагрівача підключається до джерела живлення з метою нагріву внутрішніх елементів конструкції до необхідної температури. Температура в середині пристрою контролюється за допомогою контрольної термопари. Значення електричної напруги з термопари передається в блок керування нагрівом, який при необхідності вмикає або вимикає нагрівач, що забезпечує підтримку необхідної

температури. На виході моделі АЧТ відбувається випромінювання, яке наближене до випромінювання точкового випромінювача.

Випромінюючі моделі АЧТ використовуються з метою градування апаратури теплового контролю. Такі моделі створюють еталонне випромінювання в умовах застосування компенсаційних та балансних методів вимірювання.

1.2.2. Інфрачервоне випромінювання реальних тіл

Теплове випромінювання реального тіла характеризується коефіцієнтом теплового випромінювання ε . Коефіцієнт теплового випромінювання (КТВ) – це відношення енергетичної світимості сірого тіла до енергетичної світимості АЧТ за умови, що тіла мають однакову температуру [2].

ε – величина безрозмірна та характеризує частку сумарного по спектру випромінювання даного матеріалу тіла від випромінювання АЧТ за умови, що тіла мають однакову температуру. Для АЧТ $\varepsilon = 1$, для сірих тіл завжди $\varepsilon < 1$.

Коефіцієнт теплового випромінювання залежить від поверхні об'єкта, температури об'єкта та ступеня окислення поверхні. При збільшенні шорсткості поверхні коефіцієнт теплового випромінювання збільшується. Коефіцієнт теплового випромінювання тіла з шорсткою поверхнею $\varepsilon_{ш}$ визначається за формулою:

$$\varepsilon_{ш} = \varepsilon \left[1 + 2,8 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \right], \quad (1.3)$$

де ε – КТВ гладкої поверхні матеріалу. Вираз (1.3) є справедливим за умови, що висота нерівностей перевищує довжину хвилі в декілька разів.

До таблиці 1.1 занесено значення коефіцієнтів теплового випромінювання для деяких матеріалів при температурі 20 °С. З даних таблиці видно, що метали мають менші значення ε ніж діелектрики. Для діелектриків характерне збільшення коефіцієнта ε зі збільшенням довжини хвилі, а для металів навпаки. Проте, при збільшенні температури КТВ збільшується як для металів, так і діелектриків.

Таблиця 1.1. Значення КТВ для деяких матеріалів

Матеріал	ε
срібло (поліроване)	0,3
алюміній (полірований)	0,04 ÷ 0,06
золото (поліроване)	0,04
латунь (матова)	0,22
скло	0,7
ебоніт	0,9
дерево	0,6 ÷ 0,8
цемент	0,9
вода (>0,1 мм)	0,96

Закон Стефана – Больцмана для сірого тіла

Випромінювання сірого тіла залежить не тільки від температури, але і від коефіцієнта теплового випромінювання. Вираз для інтегральної густини енергетичної світимості має вигляд:

$$Me = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4.$$

Закон Кірхгофа

Закон Кірхгофа встановлює рівність між коефіцієнтами випромінювання та поглинання за умови однакових довжинах хвиль та температурах в усіх тілах.

$$\varepsilon_\lambda(T) = a_\lambda(T).$$

Закон Ламберта для сірих тіл

Графічна інтерпретація закону Ламберта для сірих тіл відрізняється від інтерпретації для АЧТ. Розподіл вектору сили випромінювання реальних тіл на площині не подібний до класичного кола (рис. 1.10). Для металів такий розподіл має вигляд трохи приплюснутого до поверхні кола, а для діелектриків, навпаки, – трохи витягнутим вздовж нормалі до поверхні (рис. 1.10).

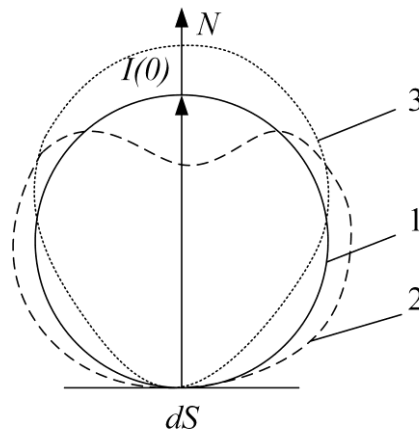


Рис. 1.10. Розподіл сили випромінювання на площині випромінювача (1 – для АЧТ, 2 – металів, 3 – неметалів)

1.2.3. Пропускання інфрачервоного випромінювання атмосферою

При проходженні через шар атмосфери ІЧ-випромінювання ослабляється внаслідок поглинання та розсіяння молекулами газів, аерозолями, дощем, а також дрібними частинками, що знаходяться в атмосфері в підвішеному стані. Головною причиною ослаблення випромінювання є молекулярне поглинання. В діапазоні

довжин хвиль більше 1 мкм суттєвий впливає на випромінювання має водяна пара, вуглекислий газ та озон (ці речовини поглинають ІЧ-випромінювання).

Іншою причиною ослаблення випромінювання є розсіювання молекулами повітря та різними частинками (порошинки та ін.) Туман і хмари для ІЧ-випромінювання не є прозорою речовиною і також впливають на випромінювання. Наприклад, коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання на трасі довжиною 1,8 км при слабкому дощі складає 0,88, при середньому – 0,74, при сильному – 0,66 і при зливі – 0,38.

Для аналізу ефективності тепловізійної апаратури введено поняття – *коефіцієнт використання випромінювання*, який враховує спектральний склад випромінювання об'єкта, спектральну характеристику приймача випромінювання і функцію пропускання випромінювання шаром атмосфери. Вираз для *коефіцієнта використання випромінювання* має вигляд:

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[Me_{\lambda} / (Me_{\lambda})_{max} \right] \cdot S_{\lambda} \cdot \tau_a \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[Me_{\lambda} / (Me_{\lambda})_{max} \right] \cdot d\lambda},$$

де $Me_{\lambda} / (Me_{\lambda})_{max}$ – функція відносної спектральної густини енергетичної світимості об'єкта, λ_1, λ_2 – спектральний діапазон чутливості приймача випромінювання (рис. 1.11), де S_{λ} – спектральна характеристика приймача випромінювання, τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери в діапазоні довжин хвиль чутливості приймача випромінювання (λ_1, λ_2).

Найбільша складність в процесі розрахунку коефіцієнта використання випромінювання виникає через визначення функції $\tau_a = f(\lambda)$, яка залежить від великого числа параметрів і не є безперервною функцією за рахунок неоднакового поглинання випромінювання на певних довжинах хвиль молекулами газів (рис. 1.12).

Для інженерних розрахунків прийнято використовувати табличні значення коефіцієнта τ_a , що враховують можливість широкого варіювання вхідних параметрів. До числа параметри, які необхідно враховувати, належать: H – висота об'єкта над рівнем моря; D – дальність (відстань між об'єктом і спостерігачем); t_n – температура повітря; f – вологість повітря; d_g – дальність метрологічної видимості; T – температура об'єкта.

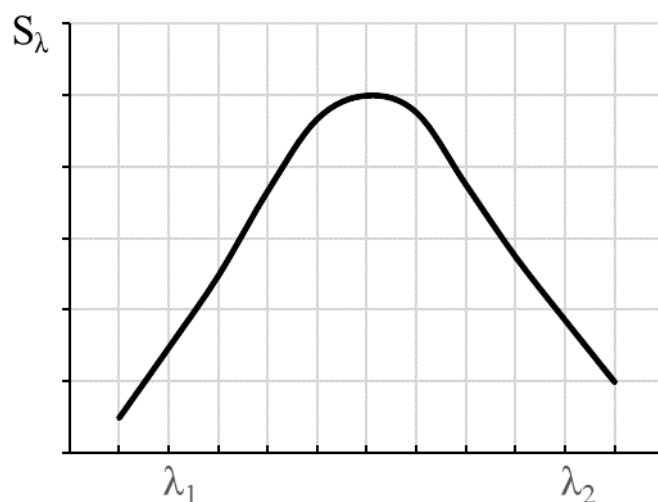


Рис. 1.11. Спектральний діапазон чутливості приймача випромінювання

Поглинаючі молекули

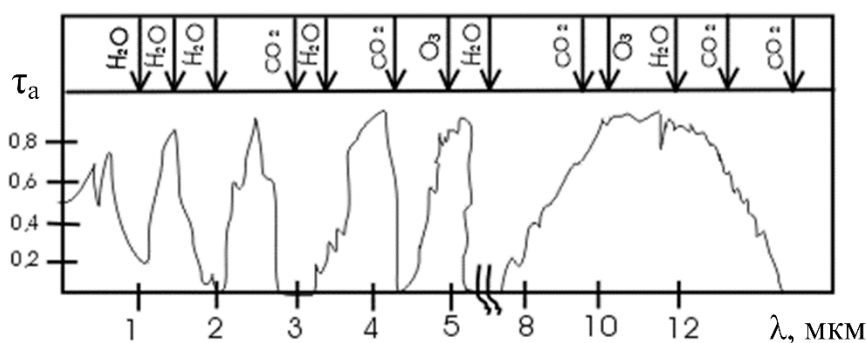


Рис. 1.12. Поглинання ІЧ-випромінювання молекулами повітря

При контролі тепловими методами необхідно враховувати:

1. Випромінювання, яке надходить від об'єкта контролю, залежить від ступеня чорноти (коефіцієнта теплового випромінювання) його поверхні та спектра.
2. Напрямок нормалі до поверхні об'єкта контролю щодо лінії візування.
3. Можливість загасання випромінювання в проміжному середовищі, крізь яке проходить випромінювання.
4. Вплив інших нагрітих предметів на об'єкт контролю, в тому числі і відбиття.

1.3. Фізичні основи вимірювання температури

Температура – це фізична величина. *Фізична величина* – одна із властивостей фізичного об'єкта. Розрізняють декілька груп фізичних величин. До першої групи відносять *екстенсивні величини*, для яких можливі операції додавання й віднімання, тобто величини, в результаті додавання яких (стосується величини

однієї властивості) отримуємо таку ж фізичну величину. До подібних величин відносяться довжина, маса, сила електричного струму і т. ін. [5].

Друга група – це *інтенсивні величини*, для яких визначені відносини порядку й еквівалентності (більше – менше, тепліше – холодніше, однаково теплі). Операція додавання для таких величин не має фізичного змісту. Але діапазони цих величин (різниця двох розмірів) відносяться вже до величин першої групи (екстенсивних величин) і для них справедлива операція додавання. Величини, що відносяться до другої групи, мають одиницю виміру, але їх шкали не мають природного нуля [5].

Таким чином, *температура* – це фізична величина, яка визначається як параметр стану термодинамічної рівноваги мікроскопічних систем. Температура є величиною інтенсивною, а тому для її вимірювання необхідна наявність не тільки одиниць виміру, а й шкали, за якою відрховуються значення. Одиниця виміру визначається масштабом шкали.

Під терміном *температурна шкала* прийнято розуміти безперервну сукупність чисел, лінійно пов'язаних з числовими значеннями будь-якої вимірюваної фізичної властивості, що представляє собою однозначну і монотонну функцію температури.

Принцип побудови температурної шкали полягає в наступному: вибирають дві основні опорні точки (реперні) легко відтворюваних температур. Цим температурам присвоюють числові значення t_1 і t_2 . Температурний діапазон $(t_1 - t_2)$ поділяють на N рівних частин, де $1/N$ буде відповідати одиниці виміру температури або масштабу шкали. Потім обирають термометричну властивість E , яка є лінійно пов'язаною з температурою:

$$dt = k \cdot dE, \quad (1.4)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Виконавши інтегрування виразу (1.4) отримаємо наступне:

$$t = k \cdot E + C.$$

Для визначення коефіцієнтів k та C використовуються попередньо обрані точки t_1 і t_2 . Нехай для цих точок значення термометричної властивості будуть E_1 та E_2 . Тоді:

$$\begin{cases} t_1 = k \cdot E_1 + C \\ t_2 = k \cdot E_2 + C. \end{cases} \quad (1.5)$$

Після вирішення системи рівнянь (1.5) отримаємо рівняння шкали:

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{E_2 - E_1} \cdot (E - E_1).$$

Проте, в природі не існує фізичних властивостей, що пов'язані лінійно з температурою, і коефіцієнт k в дійсності є функцією температури.

Термодинамічна температурна шкала

Термодинамічна температурна шкала була прийнята в 1927 році на 7-й Генеральній конференції з мір та ваг. Вона реалізується за допомогою газових термометрів і базується на двох реперних точках.

Перша реперна точка це температура танення льоду ($t_1 = 0$ °С). Друга реперна точка – температура кипіння води ($t_2 = 100$ °С). Після поділу цього діапазону на 100 було отримано масштаб шкали. В такому випадку числові значення температур, що відраховуються від точки танення льоду позначаються через t і супроводжуються позначкою °С, а значення, що відраховуються від абсолютного нуля позначаються літерою T і супроводжуються позначкою K . Для T_0 було прийнято значення 273,15 К [6].

Незважаючи на теоретичну простоту запропонованої шкали, її застосування супроводжувалося наступними труднощами:

1. Газові термометри, що реалізують шкалу, мають обмежений діапазон використання. При температурі 1100 °С починається дифузія газу через стінки термометра, що призводить до його непридатності для подальших вимірювань.

2. Складність апаратури і недостатня відтворюваність результатів вимірювань.

У зв'язку з цим, в 1968 р. була прийнята міжнародна практична температурна шкала (МПТШ-68), що базувалась на інших реперних точках. Нова МПТШ була розроблена таким чином, щоб температура, яка по ній вимірюється була максимально наближена до термодинамічної. В основу МПТШ-68 покладено ряд відтворюваних рівноважних станів, яким приписані певні значення температур (це основні реперні точки) і які відтворюються на еталонних приладах. Можна виділити наступні приклади основних реперних точок:

1. Рівновага між твердою, рідкою та пароутворюючою фазами водню: $t = 13,81$ К або $-259,34$ °С.

2. Рівновага між твердою, рідкою і пароутворюючою фазами води: $t = 273,16$ К або $0,01$ °С.

3. Рівновага між твердою і рідкою фазами срібла: $t = 1235,08$ К або $961,913$ °С.

4. Рівновага між твердою і рідкою фазами золота: $t = 1337,58$ К або $1064,43$ °С.

У діапазоні температур від 34 °С до 630,74 °С еталонним приладом є платиновий термометр опору.

У діапазоні температур від 630,74 °С до 1064,43 °С еталонним приладом є термометр з електродами платинородію і платини.

У діапазоні температур вище 1064,43 °С температура визначається відповідно до закону Планка.

Перша температурна шкала була запропонована і реалізована німецьким фізиком Даніелем Габрієлем Фаренгейтом у 1724 р., який винайшов спиртовий (1709 рік) та ртутний (1714 рік) термометри. В основу своєї шкали він поклав 3 основні точки. Перша точка, «найсильнішого холоду», виходила при змішуванні в певних пропорціях води, льоду і нашатирю. Він прийняв її за нульову позначку (за Цельсієм це -17,8 °С). Друга точка – плавлення льоду, позначалася їм як +32°. Третя точка це нормальна температура людини, була позначена +96°. Ця шкала використовується в США до сих пір.

У 1731 р французький вчений Рене Реомюр дослідив та почав використовувати для скляних термометрів спирт певної концентрації, який при температурі танення льоду заповнював об'єм в 1000 одиниць, а при температурі кипіння води розширювався до 1080 одиниць [7, 8]. Такі показники дали змогу позначити температуру танення льоду 1000°, а кипіння води 1080°. Пізніше було запропоновано спростити цю шкалу і перейти до наступних значень 0° і 80°.

У 1742 р шведський астроном та математик Андерс Цельсій запропонував свою шкалу. Використовуючи ртуть в скляних термометрах він позначив температуру танення льоду як 100°, а точку кипіння води 0°. Таке позначення виявилось незручним, тому у 1744 году інший шведський вчений М. Штремер запропонував перевернути цю шкалу [7].

Нарешті в 1848 р математик з Ірландії Вільям Томсон запропонував побудувати температурну шкалу на термодинамічній основі, прийнявши за нульове значення температуру абсолютного нуля і позначивши температуру танення льоду +273,15 К.

Формула для переходу від шкали Цельсія до інших шкал:

$$1\text{ }^{\circ}\text{C} = 5/4\text{ }^{\circ}\text{R} = 5/9\text{ }(^{\circ}\text{F} - 32) = \text{K} - 273,15.$$

У 1866 році В. Томсон був посвячений у лицарське звання, та в 1892 році королева Вікторія подарувала йому перство з титулом «барон Кельвін» по річці Кельвін, що протікає повз університет Глазго і впадає в річку Клайд. Таким чином, шкала отримала назву «шкала Кельвіна».

Шкали Цельсія, Фаренгейт і Реомюра зручні для користування в побуті, але для експериментальних даних, коли температура опускається нижче нуля і виражається негативними числами це незручно. Тому для інженерних розрахунків були введені абсолютні шкали Кельвіна і шотландського фізика Вільяма Ранкіна.

Обидві шкали починаються при температурі абсолютного нуля. Вони відрізняються тільки тим, що градус Кельвіна дорівнює градусу Цельсія, а градус Ранкіна дорівнює градусу Фаренгейта. Їх співвідношення $Ra = F + 459,67$.

Найнижча температура

Перше, що спадає на думку, це найнижча температура в Антарктиці, де позначка на градусника падає до -85° за Цельсієм. Однак, темна сторона Місяця ще холодніша та має -173°C .

Останні наукові дослідження шведських фахівців свідчать, що найхолодніше місце у Всесвіті знаходиться в протопланетарній туманності, яку ще називають туманністю Бумеранг. Ця туманність входить до складу сузір'я Центавра та перебуває на відстані 5 тисяч світлових років від Землі [9].

Базовою складовою речовиною в цій туманності є розріджений газ, що свідчить про масштабні руйнування планет у цій системі. Вчені виявили, що, з огляду на особливе розташування туманності й розрідженість структури речовини, температура туманності становить у середньому -272° за Цельсієм, а це лише на 1 градус вище за нижню межу температури – абсолютного нуля (мінімальна теоретична межа температури, яку може мати фізичне тіло). Вважається, що досягти абсолютного нуля на практиці неможливо.

Температура туманності була визначена за допомогою 15-метрового телескопа, розташованого на одному з високогірних плато в Чилі. Особливість цієї туманності полягає ще й у тому, що її температура нижча за температуру, яку має фон Всесвіту в наші дні, а це -270° . На сьогодні виявлена туманність є єдиним об'єктом, який має нижчу температурою, ніж фон Всесвіту.

В то же час, науковці NASA в Лабораторії холодних атомів (ЛХА), яка знаходиться на Міжнародній космічній станції, створили ще холодніше середовище [10]. ЛХА стала першою установкою для охолодження атомів до температури -273°C – найнижчої температури, яку може досягти матерія. Таким чином, ЛХА є найхолоднішою точкою у Всесвіті.

В ЛХА реалізовано декілька технологій, які раніше ніколи не відправляли до космосу, наприклад, спеціалізовані вакуумні клітини з атомами. За повідомленнями вчених такі клітини дуже щільні, що унеможливорює проникнення всередину інших сторонніх атомів. Охолоджені атоми в ЛХА є ультрахолодними. З квантової фізики відомо, що крижані частинки набагато повільніші за атоми з кімнатною температурою. Швидкість їхнього руху в 200 тис. разів менша, що відкриває нові можливості в дослідженнях атомів, їх властивостей та багатьох фізичних явищ [10, 11].

Сучасна ЛХА дозволяє вченим світу проводити фундаментальні фізичні дослідження з метою пізнання принципів роботи природи на найпростіших рівнях. Зокрема сучасні дослідження присвячені питанням поведження атомів в умовах мікрогравітації, можливості маніпулювання ними, вплив магнітних полів тощо [11].

Найвища температура на Землі

Понад сто років тому, 10 липня 1913 року, в Долині Смерті (штат Каліфорнія, США) були зареєстровані рекордні для нашої планети $+56,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. За даними кліматологів, в Долині Смерті було поставлено ще один рекорд – найвища середньомісячна температура, яка вже декілька років поспіль не припиняє збільшуватись, і на сьогодні складає $+46,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12].

Запитання для перевірки

1. Розкрити значення понять «температура», «теплове поле», «теплова енергія».
2. Наведіть основні закони теплопередачі та їх короткий зміст.
3. Поясніть вплив зміни температури на спектральну густину енергетичної світимості тіла на прикладі АЧТ.
4. Назвіть величини, на яких базується диференціальне рівняння теплопровідності.
5. Поясніть поняття моделей абсолютно чорних тіл: їх види, способи застосування.
6. Які закони інфрачервоного випромінювання ви знаєте? Які види випромінювачів?
7. Поясніть теплове випромінювання реальних тіл та поняття КТВ.
8. Поясніть фізичні основи вимірювання температури.
9. Поясніть побудову рівняння шкали. Що таке термодинамічні температурні шкали?
10. Знайти значення температури при якій шкала Цельсія збігається зі шкалою Фаренгейта.

2. АПАРАТУРНІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Апаратурні засоби вимірювання температури поділяються на контактні та безконтактні. В тепловому неруйнівному контролі такі засоби мають дуже широку область застосування. По-перше, це виявлення порушень суцільності матеріалу, розшарувань клейових з'єднань, дефектів структури композитів, пошкодження захисних покриттів, наявності вологи в стільникових панелях [13, 14]. По-друге, ці засоби є ефективними при тепловій діагностиці енергетичного обладнання, контролі теплових режимів машин і механізмів та різноманітних технологічних процесів [15]. Нарешті, без таких засобів сьогодні важко уявити діагностику стану теплоізоляції будівель і споруд або медичну діагностику.

2.1. Контактні засоби вимірювання температури

Контактні засоби вимірювання температури передбачають контакт таких засобів з об'єктом контролю (ОК), тому до них відносяться всі види термометрів. За принципом дії термометри можуть бути рідинні, манометричні, термоелектричні, термометри опору та інші.

Рідинні і манометричні термометри в тепловому контролі використовують дуже рідко. Недоліками таких термометрів є їх суттєва інерційність та необхідність надійного контакту з ОК, через що термоелектричні і термометри опору набули більшої популярності та широкого використання.

Термоелектричні термометри

До термоелектричних термометрів відносять термопари – сплав двох різних металів у вигляді маленької краплі. Дія такого термометра заснована на ефекті, що відкрив німецький фізик Томас Зеєбек. Ефект Зеєбека полягає у наступному: в замкнутому ланцюзі, до складу якого входять два провідники з різних матеріалів, виникає електричний струм за умови, що температура у місцях з'єднань цих провідників буде різною. На рис. 2.1 схематично показано термопару, яка розміщена у середовищі з температурою t_1 , а кінці цієї термопари під'єднані до приладу, розташованого у середовищі з температурою t_2 . За умови коли $t_1 \neq t_2$, на кінцях термопари виникає термо-е.р.с., а індикатор приладу буде реєструвати наявність у замкнутому контурі електричного струму.

В місця з'єднання (контакту) двох різних металів на атомному рівні виникає рух електронів, що призводить до виникнення різниці електричних потенціалів. Ця контактна різниця потенціалів залежить тільки від природи цих металів і температури. Площа контакту не впливає на різницю потенціалів.

Величина термо-е.р.с. залежить від типів металів та є функцією різниці температур, яку можна записати у вигляді степеневого ряду:

$$E = \alpha_1(t - t_0) + \alpha_2(t - t_0)^2 + \dots + \alpha_n(t - t_0)^n, \quad (2.1)$$

де α – коефіцієнти пропорційності, значення яких залежить від типу використаного металу.

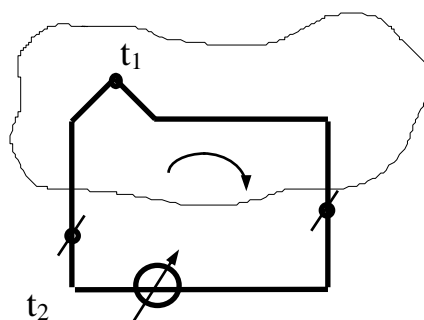


Рис. 2.1. Вимірювання температури за допомогою термопари

З формули (2.1) видно, що термо-е.р.с. має нелінійну залежність від температури. Проте для невеликого діапазону температур дозволяється враховувати тільки перший член даного ряду та припустити, що температурна залежність є лінійною.

$$E = \alpha \cdot [t_1 - t_2],$$

де $\alpha = (41 \div 64) \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$. Коефіцієнт α називають коефіцієнтом Зеєбека.

При вимірюванні температури у широкому діапазоні, для отримання бажаної точності, необхідно брати до уваги більше одного коефіцієнту. Зі збільшенням n вираз (2.1) описує поведінку термопари більш точно. Для більшості матеріалів необхідно враховувати приблизно 8 коефіцієнтів з метою отримання похибки в межах 1 %.

Термопари використовують для вимірювання температури у діапазоні від -200°C до $+1500^\circ\text{C}$.

Найбільш розповсюдженими типами термопар є наступні:

- Мідь-константан (для температур до 400°C). Константан – сплав міді (52 % Cu) і нікеля (48 % Ni).
- Хромель-копель (до 600°C). Хромель – сплав 89 % Ni, 9,8 % Cr, 1 % Fe, 0,2 % Mn. Копель – сплав 55 % Cu, 45 % Ni.

- Хромель-алюмель (до 1000 °С). Алюмель – сплав нікелю (92 % Ni) з алюмінієм (2,4 % Al); манганом (2,7 % Mn); кремнієм (1,7 % Si) і кобальтом (1,2 % Co). Назва сплаву походить від частин слів «АЛЮМіній» та «нікЕЛЬ».

- Платинородій-платина (до 1300 °С); Платинородій – сплав з платини (90 % Pt) і родія (10 % Rh).

- Вольфрамові сплави (до 2500 °С).

Залежність е.р.с. для широкорозповсюджених типів термопар від температури приведена на рис. 2.2.

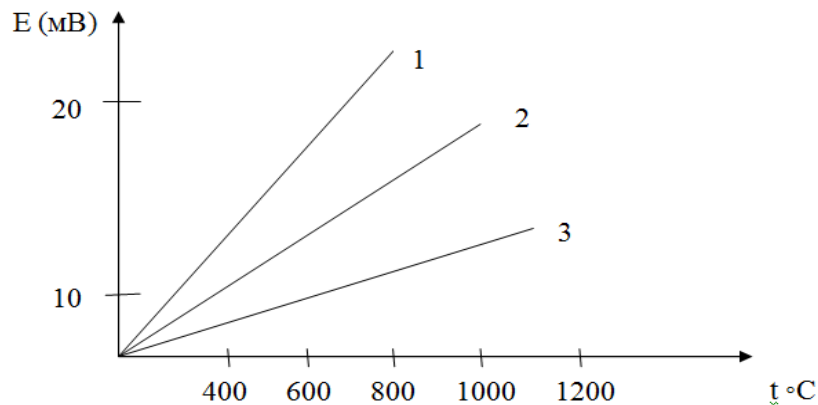


Рис. 2.2. Залежність е.р.с. термопар від температури: 1 – мідь - константан, 2 – хромель - копель, 3 – платинородій - платина

Термопара є датчиком активного типу, яка за умови наявності різниці температур генерує електричний струм, тому при її використанні застосовуються вторинні прилади, наприклад, мілівольтметри.

Термометри опору

Дія термометрів опору (ТО) базується на властивості металу змінювати свій опір в залежності від температури. Якщо відома залежність зміни, то є можливість визначити температуру. Розрізняють металеві термометри і напівпровідникові.

Опір чистого металу можна записати у вигляді наступного ряду:

$$R_t = R_0 \left(1 + \alpha \cdot (t - t_0) + \beta \cdot (t - t_0)^2 + \gamma \cdot (t - t_0)^3 + \dots \right), \quad (2.2)$$

де R_0 – опір в умовах дії початкової температури; R_t – поточний опір; α , β , γ – температурні коефіцієнти опору резистора.

З формули (2.2) видно, що температурна залежність опору металу є нелінійною для вузького температурного діапазону. Через це вважають, що залежність опору від температури близька до лінійної за умови використання тільки двох членів цього ряду:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t),$$

Відомо, що метал має позитивний температурний коефіцієнт, тобто при збільшенні температури опір металу також збільшується. Для платини цей коефіцієнт становить $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, для нікелю $\alpha = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Найбільш оптимальним матеріалом для термометра опору вважається платина. Вона має високий питомий опір, що дозволяє виготовляти з неї окрім звичайних термометрів ще й еталонні.

На відміну від металів, напівпровідники мають від'ємний температурний коефіцієнт, тобто при збільшенні температури опір напівпровідника зменшується. В такому випадку опір напівпровідника можна представити у вигляді:

$$R_t = R_0 \cdot e^{b \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_0} \right)},$$

де b – температурний коефіцієнт, $\alpha = -\frac{b}{t^2}$ – температурний коефіцієнт, який знаходиться в діапазоні: від $-3 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ до $-6 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Діапазон вимірюваних температур ТО від $-260 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Такий вид термометрів відносять до пасивних, а вони вимагають додаткового джерела живлення, через що їх використовують в комплекті з логометрами або мостовими схемами.

Недоліки використання термоелектричного термометра та термометра опору

До основних недоліків термометрів, що розглянуті вище, відносять наступні:

1. Термометром неможливо виміряти температуру великогабаритних об'єктів (розраховані на невелику площу).
2. При контакті термометра з об'єктом контролю, термометр вносить зміни в температуру об'єкта, що впливає на похибку вимірювання.

Термоіндикатори

Для контролю об'єктів великого розміру доцільним є використання термоіндикаторів. Розрізняють наступні види термоіндикаторів: термофарби, термоіндикатори плавлення, рідкі кристали.

Термофарби – речовини, які змінюють свій колір під впливом температури, при цьому вони є оборотними індикаторами, що передбачає їх багаторазове використання. Термофарба наноситься на поверхню об'єкту контролю, потім протягом 8 години проводиться її сушіння при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Після цього термоіндикатор готовий до використання. Термофарби широко застосовуються в

промисловості з метою своєчасного та швидкого виявлення перегріву виробів. Особливо вони ефективні при контролі рухомих об'єктів: підшипників, муфт тощо. Крім того, термофарби використовуються в металургійних печах для виявлення перегріву.

Другий різновид термоіндикаторів є *термоіндикатори плавлення*, дія яких ґрунтується на незворотній зміні кольору під впливом температури. В процесі використання такі індикатори наносять на об'єкт контролю як фарби. Як правило, колір термоіндикатора плавлення змінюється в діапазоні від світло помаранчевого до темно помаранчевого кольорів. Застосовуються термоіндикатори плавлення з метою реєстрації місць перегріву в недоступних ділянках об'єкта, наприклад місця перегріву елементів літальних апаратів.

В якості термоіндикаторів також можуть використовуватися *рідкі кристали*. Зі зміною температури змінюється довжина хвилі відбитого від рідкого кристалу світла. Рідкі кристали-термоіндикатори утворюються органічними сполуками – складними ефірами холестерину (холестериками), їх структура нагадує спіралі, які дуже чутливі до зміни температури. Холестерики яскраво пофарбовані, і найменша зміна температури (до тисячних градуса) призводить до зміни кроку спіралі і, відповідно, до зміни забарвлення рідкого кристалу. Шляхом підбору складу рідкокристалічної речовини створюють індикатори для різних діапазонів температури та різних конструкцій. Наприклад, рідкі кристали у вигляді плівки наносять на транзистори, інтегральні схеми і друковані плати електронних схем. Несправні елементи, такі як сильно нагріті або холодні непрацюючі, відразу стають помітними по яскравим кольорним плям. Діапазон контрольованих температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$, чутливість становить $0,1 - 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, інерційність – $0,1 - 10\text{ с}$.

Термолюмінофори – індикатори, що змінюють яскравість світіння під дією температури. До термолюмінофорів відносять тверді або рідкі речовини, які під впливом температури здатні до люмінесценції. Сфера застосування даного виду індикаторів дуже широка – виявлення мікротріщин в ОК, аерографія, медична діагностика, контроль електронних компонентів, макрування товарів тощо. В залежності від сфери застосування визначається склад люмінофорного індикатору, що впливає на його параметри (спектр активації, спектр випромінювання, відношення випроміненої енергії до поглинутої теплової енергії, часові характеристики тощо) [16].

2.2. Безконтактні засоби вимірювання температури

В основі безконтактних засобів вимірювання температури лежить реєстрація теплового випромінювання. Широкого застосовуються набули такі

прилади безконтактного типу, як тепловізори, радіометри та пірометри, основним компонентом яких є приймач випромінювання (ПВ) [2].

Приймач випромінювання – це пристрій, на вхід якого надходить теплове випромінювання, що перетворюється в електричний сигнал, пропорційний параметрам цього випромінювання. Головним параметром ПВ є пороговий потік $\Phi_{пор}$, що визначається за формулою:

$$\Phi_{пор} = H_0 \cdot A_d \cdot \frac{U_n}{U_s},$$

де H_0 – коефіцієнт опромінення приймача, Вт·см⁻²; A_d – площа чутливої ділянки приймача, см²; U_n, U_s – середньоквадратичне значення напруги корисного сигналу на виході приймача і шуму, відповідно.

Приймачі випромінювання поділяються на охолоджувані та неохолоджувані. Проте ці два типи ПВ, в свою чергу, поділяються на приймачі ближнього, середнього і дальнього інфрачервоного діапазону.

За принципом дії приймачі випромінювання бувають фотоелектричні, теплові, болометри.

В основі *фотоелектричних приймачів випромінювання* покладено явище внутрішнього фотоефекту. Вони відносяться до класу селективних приймачів і працюють тільки в одному з зазначених ІЧ-діапазонів. Як правило, ці приймачі необхідно охолоджувати, але існують і не охолоджувані. Такі приймачі використовуються в більшості тепловізорів і радіометрів.

Фотоелектричні приймачі випромінювання бувають трьох типів: вентилі; фотодіоди; фоторезистори.

У вентиліях в момент потрапляння на них ІЧ-випромінювання роль внутрішнього фотоефекту зводиться до зміни опору запірного шару р-п-переходу, і як результат, в замкнутому колі з'являється фотострум.

У фотодіодах внутрішній фотоефект пов'язаний з генерацією носіїв, що призводить до виникнення е.р.с. на контактах р-п-переходу.

Дія фоторезисторів базується на явищі фотопровідності.

Теплові приймачі випромінювання відносяться до неселективних приймачів, тобто мають практично постійну спектральну чутливість у всьому ІЧ-діапазоні. Вони не потребують охолодження, що є їхньою перевагою. Розрізняють термоелектричні та піроелектричні теплові приймачі випромінювання.

В основі термоелектричних приймачів покладено ефект Зеебека, який полягає в генерації струму в місці нагрітого спаю різнорідних матеріалів. Такі ПВ мають невелику чутливість, є дуже інерційними, проте, мають низьку вартість.

Термоелектричні приймачі широко використовуються в радіаційних пірометрах та приладах, що вимірюють величину теплового потоку [2].

Піроелектричні приймачі базуються на зміні ємності сегнетоелектрика через його деформацію при нагріванні падаючим ІЧ-випромінюванням. Такі приймачі є швидкодіючими та мають високу чутливість. Їх часто використовують в середньому ІЧ-діапазоні.

Болометри – принцип дії заснований на зміні електричного опору чутливого шару в умовах його нагріву падаючими ІЧ-променями. Цей шар може бути металевим або напівпровідниковим. Болометри є неселективними приймачами та мають широку спектральну характеристику. Недоліком таких ПВ є низька швидкодія.

На рис. 2.3 приведено класифікацію за принципом дії приймачів випромінювання, що використовують в безконтактних засобах вимірювання температури.

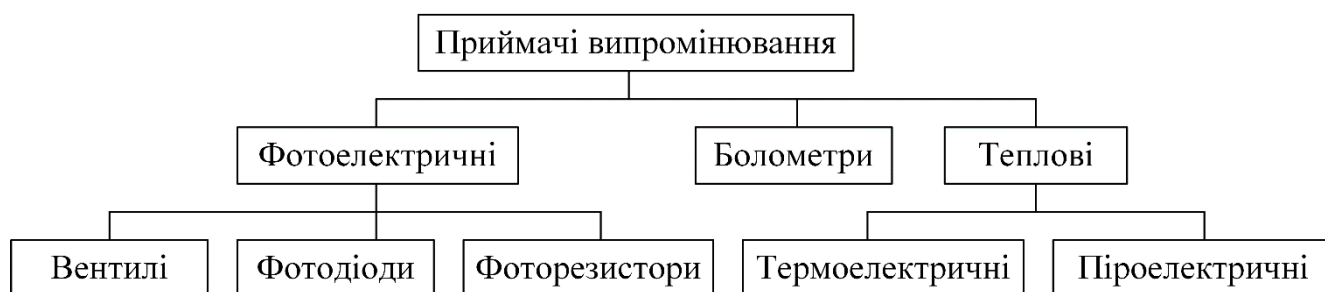


Рис. 2.3. Класифікація приймачів випромінювання

Як уже зазначалось, деякі фотоелектричні приймачі випромінювання потребують охолодження до температури, меншої за температуру навколишнього середовища. Необхідність зменшення температури фотоелектричних чутливих елементів обумовлена двома факторами:

1. В умовах коли область спектральної чутливості приймача відповідає максимуму випромінювання ОК та фону оточуючого середовища і їх температури близькі за значенням, з метою, щоб приймач не випромінював сам на себе, його необхідно охолоджувати до температури, меншої за температуру фону.

2. Зниження робочої температури призводить до зменшення радіаційного шуму за рахунок зменшення впливу фону.

Найбільш поширені способи охолодження приймачів випромінювання

1. Охолодження за допомогою рідини, яка кипить при низьких температурах. В системах ТНК використовують рідкий азот, як охолоджуючий елемент, який кипить при температурі 77,3 °К (-196 °С).

2. Компресорний спосіб Джоуля-Томсона, в основі якого міститься ефект швидкого розширення газу, що призводить до зниження температури в зоні збільшення діаметру газопроводу.

3. Термоелектричний спосіб на основі ефекту Пельтьє. Цей ефект є зворотнім ефекту Зеебека і полягає в зменшенні температури у зоні контакту двох різнорідних металів за умови проходження через цей контакт електричного струму.

4. Охолодження за допомогою твердих холодоагентів, наприклад, вуглекислоти.

Запитання для перевірки

1. Приведіть класифікацію контактних засобів вимірювання.
2. Поясніть принцип роботи термопари. До якого типу термометрів належить термопара?
3. Що впливає на точність визначення температури в широкому діапазоні за умови використання термопари?
4. Поясніть принцип роботи термометрів опору.
5. Які види термоіндикаторів існують? Які особливості їх застосування?
6. Які термоіндикатори багаторазового використання ви знаєте?
7. Що таке термолюмінофори? Поясніть принцип їх дії.
8. Приведіть класифікацію приймачів випромінювання та воясніть особливості їх використання.
9. Чому приймачам випромінювання необхідне охолодження? Чи існують ПВ без охолодження?
10. В яких пристроях використовуються фотоелектричні приймачі випромінювання?

3. ПІРОМЕТРИ

Пірометри використовують для безконтактного вимірювання температури. Їх дія базується на реєстрації теплового випромінювання нагрітих об'єктів. За принципом дії розрізняються яскравісні, колірні та радіаційні пірометри.

3.1. Яскравісні пірометри

Яскравісні пірометри (візуальні пірометри) застосовуються для вимірювання яскравісних температур, це температури понад 600 °С.

Принцип дії пірометра ґрунтується на залежності спектральної яскравості об'єкта від температури. При вимірюванні температури яскравісним пірометром спостерігається не енергетична, а видима людським оком яскравість, яка прямо пропорційна енергетичній яскравості.

Для нагрітого тіла з коефіцієнтом випромінювання ε_λ видима яскравість є меншою ніж для АЧТ при тій же температурі. Співвідношення між яскравісною і дійсною температурами має вигляд:

$$\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_d} = \frac{1}{C_2} \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda},$$

де T_y – яскравісна температура, T_d – дійсна температура, ε_λ – коефіцієнт теплового випромінювання, C_2 – друга постійна випромінювання, що дорівнює 2897,8 мкм·К. Яскравісна температура завжди є нижчою від дійсної.

Структурна схема яскравісного пірометра приведена на рис. 3.1.

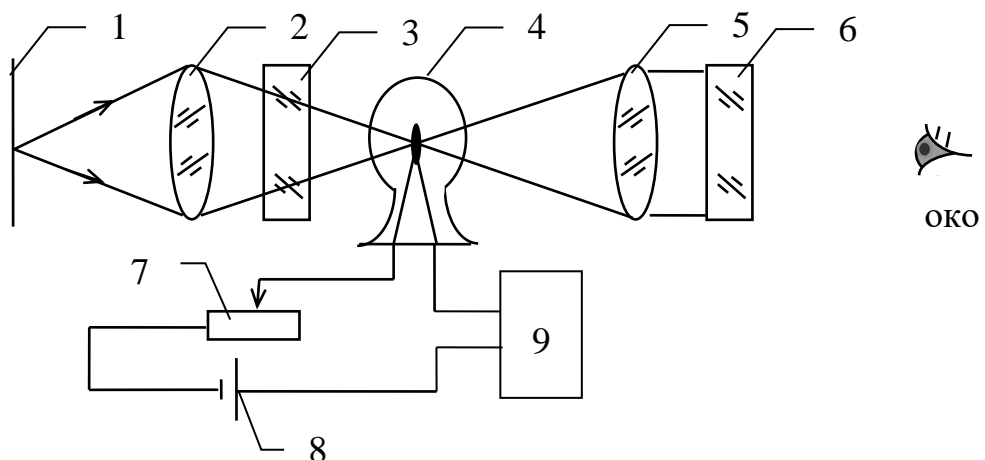


Рис. 3.1. Структурна схема яскравісного пірометра:
1 – об'єкт контролю; 2 – об'єктив; 3 – фільтр; 4 – пірометрична лампа; 5 – окуляр;
6 – червоний фільтр; 7 – реостат; 8 – джерело струму; 9 – індикатор

Принцип дії яскравісного пірометра

Випромінювання від нагрітого ОК фокусується об'єктивом в площині пірометричної лампи 4, рис. 3.1. У цій площині розташована нитка розжарювання лампи, за якою спостерігає око людини через червоний фільтр 6 та окуляр 5. Спостерігач бачить одночасно ОК і нитку лампи на фоні цього об'єкту. За допомогою реостату спостерігач змінює яскравість нитки розжарювання до моменту її зникнення на фоні об'єкту. Потім визначають відповідний цьому моменту струм і по шкалі градування приладу визначають температуру об'єкта.

Фільтр 6 використовується в процесі вимірювання випромінювання в заданому вузькому діапазоні. Фільтр 3 виконує функцію захисту очей спостерігача в процесі вимірюванні температури об'єктів понад 1500 °С. Ослаблення випромінювання поглинаючим фільтром 3 можна визначити за наступною формулою:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda_{\text{еф}}}{C_2} \cdot \ln \frac{1}{\tau} = A,$$

де A – піроелектричне ослаблення поглинаючого фільтра; T_1 та T_2 – яскравісні температури нитки лампи та об'єкта, відповідно; $\lambda_{\text{еф}}$ – ефективна довжина хвилі; τ – коефіцієнт пропускання фільтра; C_2 – друга постійна теплового випромінювання.

На рис. 3.2 показано загальний вигляд яскравісного пірометра, що серійно випускається американською компанією Spectrodynе, Inc.



Рис. 3.2. Яскравісний пірометр Spectrodynе DFP 2000

На фото (рис. 3.2) представлена модель DFP 2000 [17], яка передбачає вимірювання температури у чотирьох діапазонах: 760-1240, 1075-1760, 1500-2850, 1900-4200 °С. Похибка вимірювання у цих діапазонах складає: 0,25 %, 0,3 %, 0,4 %, 0,4 % °С, відповідно. Дискретність вимірювання 1 °С. Мінімальний розмір об'єкта контролю 1,22 мм.

Прикладом ще одного пірометра для вимірювання яскравісних температур є промисловий портативний пірометр PYRO Optical 86F від компанії Pyrometer Instrument Company, Inc. (рис. 3.3) [18].



Рис. 3.3. Яскравісний пірометр PYRO Optical 86F

Пірометр PYRO Optical 86F вимірює температуру у трьох діапазонах: 760-1200, 1000-1900, 1200-2000 °С. Похибка вимірювання у цих діапазонах складає 0,5 % °С. Мінімальний розмір об'єкта контролю 1,39 мм. До особливостей конструкції можна віднести можливість установки додаткових лінз для збільшення зображення об'єкта та можливість встановлення захисного окуляра.

3.2. Колірні пірометри

Із законів Планка і Вина відомо, що кожному значенню температури об'єкта відповідає певний розподіл енергії по спектру (рис. 3.4). Відповідно, аналізуючи характер розподілу енергії в спектрі випромінювання існує можливість визначити температуру об'єкта. Температура, що визначається таким чином, називається колірною температурою.

Колірна пірометрія ґрунтується виключно на якісному характері розподілу енергії випромінювання по спектру. Колірна температура визначається шляхом порівняння випромінювання у двох спектральних діапазонах.

В процесі вимірювання температури АЧТ показання колірного пірометра будуть відповідати дійсній температурі такого об'єкта. Проте у реальних тіл

коефіцієнт випромінювання для λ_1 та λ_2 може бути різним, через що показання колірного пірометра в процесі вимірювання температури сірих тіл можуть відрізнятися від дійсної температури. Ця температура називається *колірною температурою тіла*.

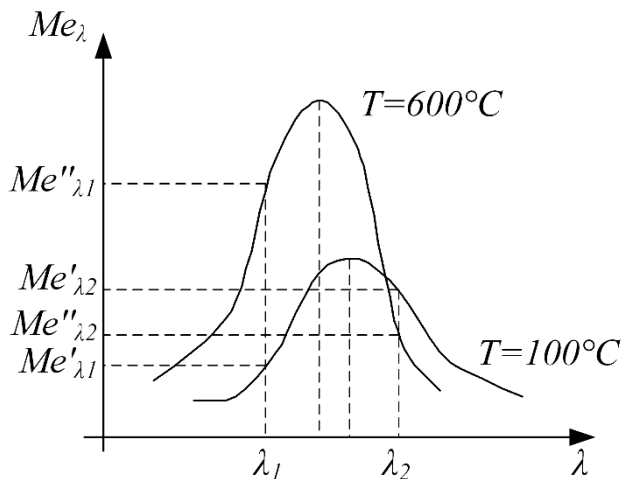


Рис. 3.4. Визначення колірної температури

Залежність між колірною температурою і дійсною виражається формулою:

$$\frac{1}{T_{\theta}} - \frac{1}{T_{\kappa}} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}, \quad (3.1)$$

де ε_{λ_1} , ε_{λ_2} – коефіцієнти теплового випромінювання для довжин хвиль λ_1 та λ_2 ; C_2 – друга постійна теплового випромінювання; T_{θ} – дійсна температура; T_{κ} – колірна температура.

З формули (3.1) видно, що якщо $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$, то права частина рівності дорівнює 0, тобто колірна температура рівна дійсній.

Принцип дії колірного пірометра ґрунтується на порівнянні інтенсивності випромінювання в двох спектральних діапазонах. Логарифм їх відношення обернено пропорційний колірній температурі:

$$\ln \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = \frac{1}{T_{\kappa}} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \cdot C_2 + 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

де L_{λ} – інтенсивність випромінювання об'єкта для λ_1 та λ_2 .

Схема, яка реалізує вимірювання колірної температури, приведена на рис. 3.5. Оптична схема колірного пірометра містить об'єктів та два колірні фільтри, через які за допомогою модулятора 3 потік випромінювання від об'єкта 1 поперемінно направляється на приймач теплового випромінювання 6. Електронна схема 7

реалізує обробку сигналу та його математичне перетворення. Результати вимірювання демонструються на індикаторі або виводяться на пристрій реєстрації 8.

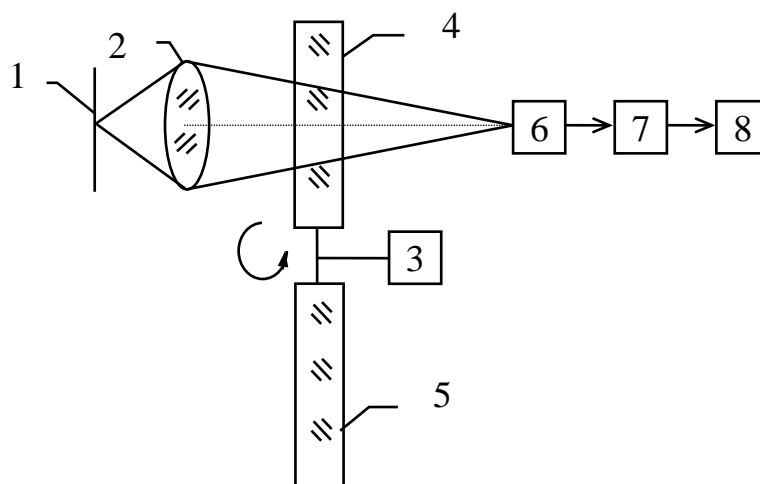


Рис. 3.5. Структурна схема колірної пірометра: 1 – об’єкт контролю; 2 – об’єктив; 3 – модулятор; 4,5 – селективні фільтри; 6 – приймач випромінювання; 7 – електронна схема; 8 – індикатор або реєстратор

До переваг колірної пірометрії відносять наступне:

1. Колірна температура багатьох твердих тіл і рідин значно менше відрізняється від дійсної температури в порівнянні з яскравісною і радіаційною температурами.

2. Поправка переходу від колірної до дійсної температури визначається з більшою точністю.

3. Незалежність показань пірометра від розмірів ОК і відстані до нього.

Діапазон вимірюваних температур, що реалізує колірний пірометр, складає $(1400 \div 2800)^\circ\text{C}$.

3.3. Радіаційні пірометри та радіометри

Принцип радіаційної пірометрії ґрунтується на використанні закону Стефана-Больцмана для сірих тіл:

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4.$$

Радіаційний пірометр вимірює температуру ОК враховуючи його повне випромінювання, тому їх ще називають пірометрами повного випромінювання.

Радіаційна температура не чорного тіла T_p , що має температуру T і коефіцієнт випромінювальної здатності ε , чисельно дорівнює радіаційній температурі чорного тіла, за якої енергетична світимість АЧТ дорівнює енергетичній світимості сірого.

$$\sigma \cdot T_p^4 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4,$$

звідки:

$$T_{\partial} = T_p \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}},$$

де T_{∂} – дійсна температура; T_p – радіаційна температура.

Оскільки для не чорного тіла $\varepsilon < 1$, а $\sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} > 1$, то T_p завжди менше T_{∂} . Різниця $T_{\partial} - T_p$ є систематичною похибкою і збільшується з підвищенням температури. Радіаційні пірометри використовують для вимірювання температур, які відрізняються від температури фону на 20-100 °С.

Схема радіаційного пірометра представлена на рис. 3.6. Оптична система пірометра складається зі сферичного дзеркала 2 та двох поворотних дзеркал 4. Теплове випромінювання одночасно потрапляє на сферичне і поворотні дзеркала. Частина випромінювання фокусується дзеркалом 2 на приймачі випромінювання 3, а частина направляється дзеркалами 4 в оптичний приціл 5, який забезпечує точне наведення пірометра на ОК.

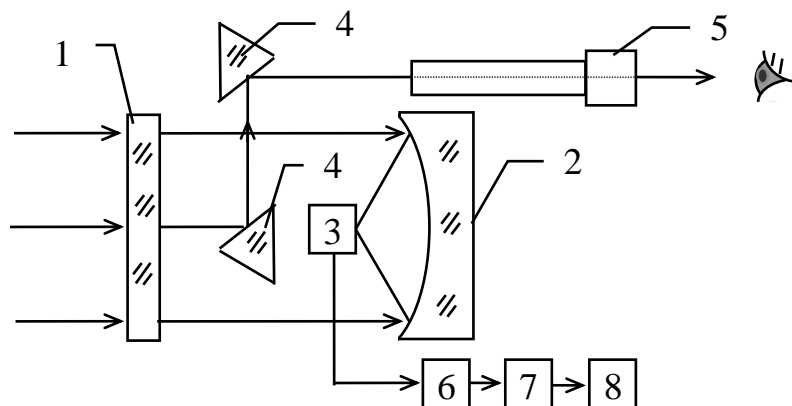


Рис. 3.6. Функціональна схема радіаційного пірометра: 1 – вхідне вікно (скло); 2 – сферичне дзеркало; 3 – приймач випромінювання; 4 – поворотні дзеркала; 5 – оптичний приціл; 6 – передпідсилювач; 7 – схема обробки сигналу; 8 – реєстратор

Вхідний отвір оптичної системи захищений склом 1, яке є прозорим для ІЧ-випромінювання. Приймач 3 перетворює ІЧ-випромінювання в електричний сигнал, що підсилюється в блоці 6 та обробляється схемою 7. Після всіх перетворень результат вимірювання відображається на дисплеї реєстратора 8. В якості приймача випромінювання в радіаційних пірометрах використовують, як правило, термоелектричні болометри [19].

Радіаційні пірометри знайшли широке застосування для контролю стану мереж електропостачання, контролю режимів роботи електротехнічних виробів та різноманітних низько температурних технологічних процесів.

До основних характеристик пірометрів відносяться:

1. Діапазон вимірюваних температур.

2. Температурна чутливість.
3. Кутова роздільна здатність.
4. Конструктивні особливості: наявність оптичного прицілу; тип фотоприймача; наявність системи охолодження; габарити пірометра.

На рис. 3.7 приведено радіаційний пірометр PyroCube XS компанії Caltech Electronics Limited, Великобританія [20] та приклад його використання для контролю режимів роботи радіоелементів.

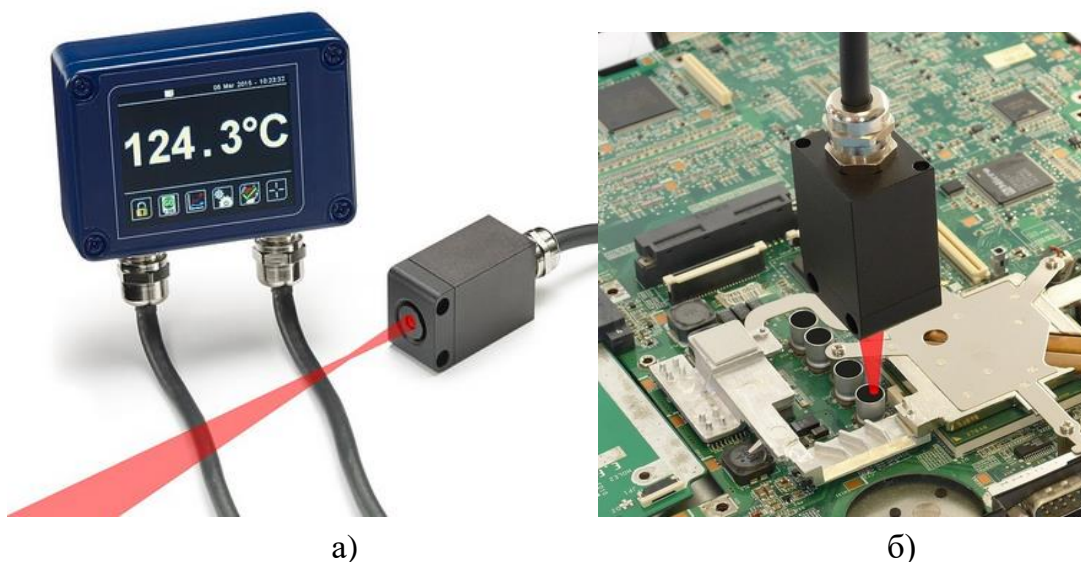


Рис. 3.7. Радіаційний пірометр PyroCube XS (а), контроль теплового режиму елементів друкованих плат (б)

Прилад складається з двох окремих блоків – оптичного і блоку індикації результату вимірювання. Пірометр має температурний діапазон від 50 до 500 °С, при чому похибка вимірювання складає 1 %. Завдяки щільно сфокусованій оптиці даним приладом можна вимірювати температури в невеликих ділянках (до 0,7 мм). Час відгуку на зміну температури складає до 10 мс, що дає можливість вимірювати температури малих рухомих об'єктів.

На рис. 3.8 представлена багатоканальна система для вимірювання температури PyroMiniBus тієї ж компанії. Система має шість окремих інфрачервоних перетворювачів, які під'єднані до одного дисплею. Така система використовується для диспетчерського управління та одночасного моніторингу теплових режимів роботи декількох об'єктів. Дисплей може працювати в режимі цифрової ідикації результатів вимірювання всіх каналів (рис. 3.9а) або демонструвати зміни температури окремих об'єктів в часі (рис. 3.9б).

Як видно з рис. 3.9, система PyroMiniBus також має функцію сповіщення оператора про вихід температурних параметрів об'єкта за межі встановлених, що прийнято за норму.



Рис. 3.8. Багатоканальна система PyroMiniBus для вимірювання температури

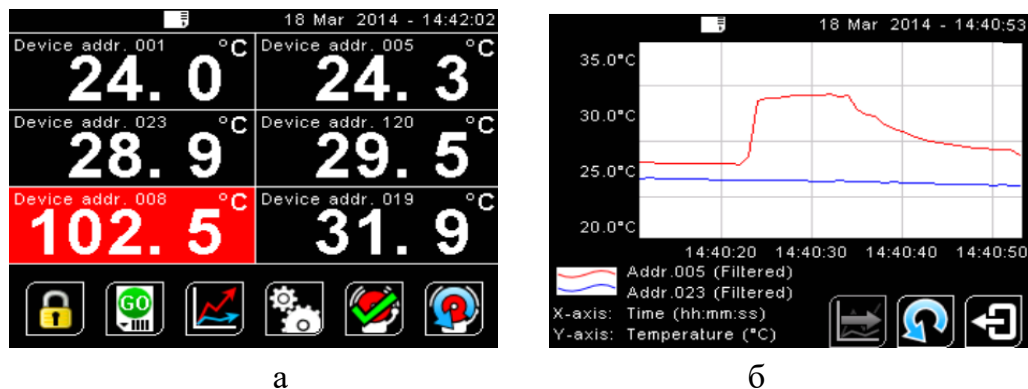


Рис. 3.9. Екран дисплею системи PyroMiniBus: режим цифрової індикації (а), режим моніторингу у реальному часі (б)

Радіометри

Радіометр – це прилад для визначення та вимірювання променистого потоку або енергетичної яскравості об'єкта випромінювання. Радіометр відноситься до безконтактних засобів вимірювання.

Радіометри можна класифікувати за кількома ознаками: наявність скануючого вузла, модулюючої системи, джерела еталонного випромінювання, розмірами, віддаленості від об'єкта. Схематично класифікація радіометрів за вказаними вище ознаками представлена на рис. 3.10.

Принцип дії радіометра аналогічний дії радіаційного пірметра, через що в деякій літературі їх навіть об'єднують в один клас. В даному підручнику радіометри розглядаються як окремий клас приладів, через їх широке застосування в ТНК. На рис. 3.11. показана узагальнена структурна схема радіометра, яка включає всі теоретично можливі складові такого приладу, але в реальних приладах деякі елементи можуть бути відсутні.

Відповідно до узагальненої схеми радіометра (рис. 3.11) до його складу можуть входити наступні вузли. Оптична система 1, функцією якої є фокусування теплового випромінювання на ПВ 4. Оптична модулююча система 3 виконує

функцію переривання променистого потоку за певним законом. Це забезпечує можливість виділення випромінювання об'єкта окремо від випромінювання фону.

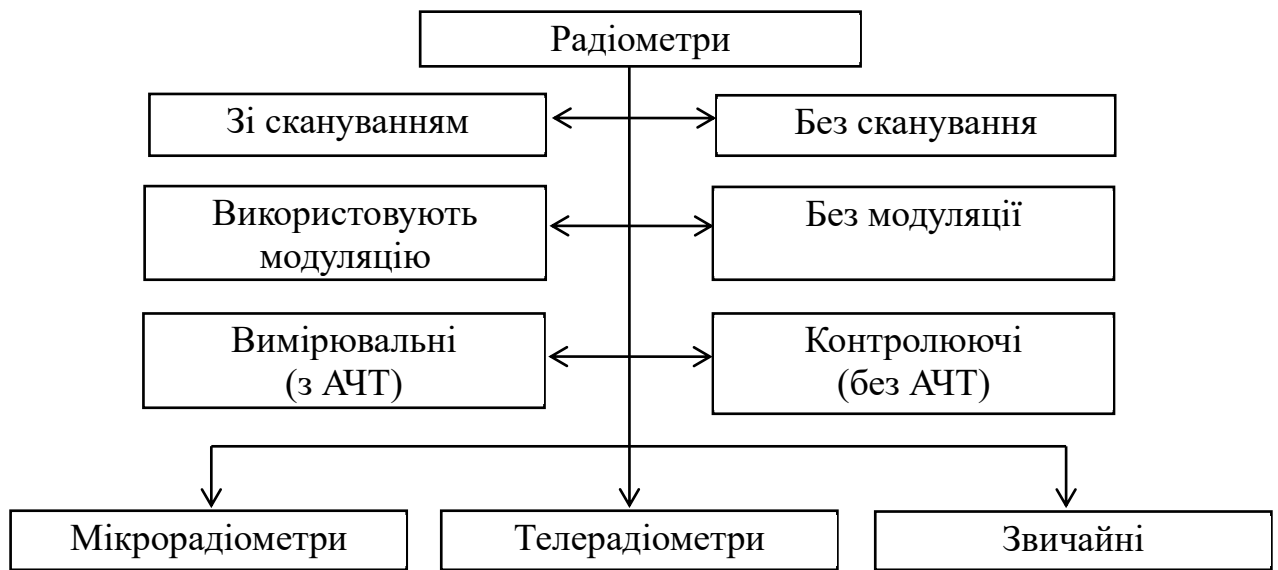


Рис. 3.10. Класифікація радіометрів

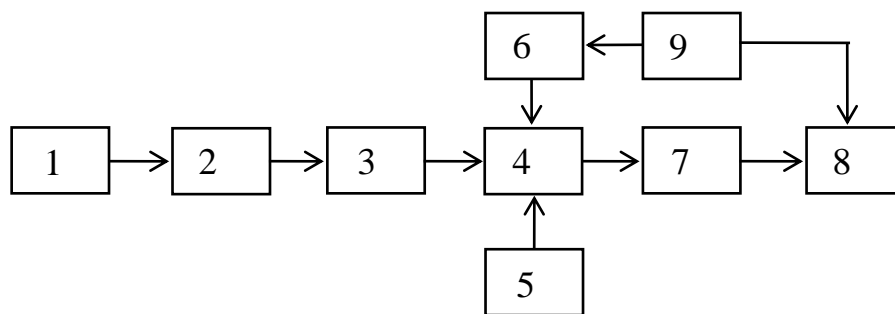


Рис. 3.11. Узагальнена структурна схема радіометра: 1 – оптична система; 2 – скануючий пристрій; 3 – модулююча система; 4 – приймач випромінювання; 5 – модель АЧТ; 6 – пристрій охолодження; 7 – схема обробки сигналу; 8 – індикатор; 9 – блок живлення

Головним елементом приладу є ПВ, функцією якого є перетворення ІЧ-випромінювання в електричний сигнал. Схема обробки сигналу 7 служить для його посилення та виділення інформативної складової.

Індикатор 8 надає результат вимірювання користувачеві, наприклад на екрані приладу. Живлення всіх елементів схеми приладу забезпечує блок живлення 9.

Зазначені вище елементи є обов'язковими для будь якого радіометра. Крім цих елементів радіометр може містити скануючий пристрій 2 для розгортки зображення, модель АЧТ 5 в якості джерела еталонного випромінювання та охолоджувальний пристрій 6, якщо ПВ передбачає охолодження.

Запитання для перевірки

1. Що таке безконтактні засоби вимірювання температури?
2. Поясніть принцип дії яскравісних пірометрів, їх призначення.
3. Наведіть переваги та недоліки яскравісних пірометрів.
4. Поясніть принцип дії колірних пірометрів, їх призначення.
5. Які основні переваги та недоліки колірних пірометрів.
6. Поясніть принцип дії радіаційних пірометрів, їх призначення.
7. Які основні переваги та недоліки радіаційних пірометрів?

4. ОСНОВИ ТЕПЛОБАЧЕННЯ

4.1. Тепловізори з оптико-механічним скануванням

Тепловізор – це пристрій, який призначений для спостереження за нагрітими об'єктами з використанням їх власного випромінювання. Тепловізор перетворює невидиме інфрачервоне випромінювання в електричний сигнал, який після підсилення та обробки представляється користувачу як видиме зображення об'єкта.

В залежності від системи сканування тепловізори поділяють на тепловізори з оптико-механічним скануванням та з електронним скануванням.

З метою отримання видимого зображення в тепловізорі з оптико-механічним скануванням здійснюється поділ об'єкта на певне число елементарних ділянок. Кожна така ділянка називається елементом розкладання, тобто, це найменший елемент, який може відтворити дана система.

Аналіз теплового випромінювання елементарних ділянок послідовно в часі виконує ПВ. На виході ПВ, послідовно в часі формуються сигнали, які несуть інформацію про ОК. Сигнали з приймача передаються по одному каналу в відеоконтрольний пристрій (ВКП). ВКП перетворює ці сигнали в видиме зображення. В якості ВКП використовують кінескоп (електронно-променева трубка). Спрощена структурна схема тепловізора показана на рис. 4.1.

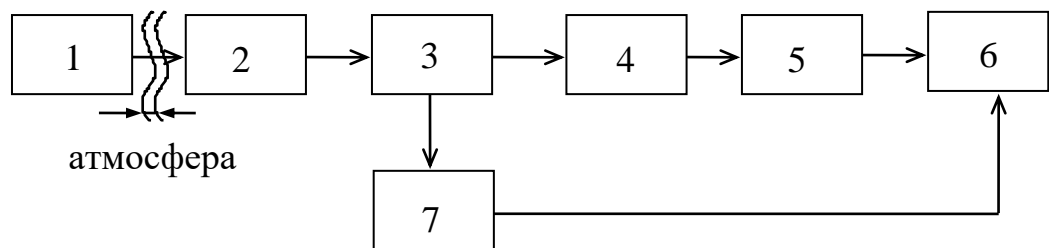


Рис. 4.1. Спрощена структурна схема тепловізора: 1 – об'єкт контролю, 2 – об'єктив (оптична система), 3 – система сканування, 4 – приймач випромінювання, 5 – підсилювач-перетворювач, 6 – відеоконтрольний пристрій, 7 – пристрій синхронізування

Принцип дії тепловізора з оптико-механічним скануванням полягає в наступному. Теплове випромінювання від об'єкта 1, пройшовши через шар атмосфери, потрапляє в об'єктив 2. Оптична система фокусує це випромінювання на чутливу ділянку приймача випромінювання 4. Пристрій сканування 3 здійснює розгортку об'єкта, тобто послідовно спрямовує на ПВ зображення різних елементарних ділянок ОК. Після підсилення та перетворення пристроєм 5, відеосигнал надходить на ВКП 6, який формує видиме зображення. Враховуючи, що

в кожен момент часу на екрані ВКП відтворюється тільки один елемент зображення, закон руху електронного променя кінескопа повинен бути ідентичним закону розгортки. Це реалізується за допомогою пристрою синхронізації 7. Однак структурні схеми сучасних реальних тепловізорів значно складніші.

Одним з головних елементів тепловізора, що визначає його температурну чутливість і максимальну дальність дії, є ПВ. У тепловізорах використовується два види приймачів: одноелементні та багатоелементні. Як правило, в якості ПВ застосовують фоторезистори.

Найбільш поширеними приймачами є плівкові (сульфід свинцю PbS, селенід свинцю PbSe) та монокристалічні (антимонід індію InSb, з'єднання елементів індію In та сурми Sb). Антимонід індію широко використовується в інфрачервоних головках ракет для самонаведення на цілі, які виступають джерелом ІЧ-випромінювання. До монокристалічних приймачів також відноситься сплав телуриду кадмію (CdTe) та телуриду ртуті (HgTe) – телуриду кадмію і ртуті (HgCdTe). Телурид кадмію і ртуті є напівпровідником зі змінюваною забороненою зоною. Регулюючи кількість кадмію в сплаві, можна отримати ПВ, які будуть охоплювати інфрачервоний діапазон від ближньої області до наддалекої.

4.1.1. Основні характеристики тепловізорів

Серед основних характеристик тепловізорів виділяють поле зору, миттєве поле зору, кутову роздільну здатність, поріг температурної чутливості, дальність виявлення, оптичну передавальну функція. Далі надано короткий опис перелічених характеристик.

Поле зору – обмежена по горизонталі та вертикалі область простору, яка потрапляє в кадр (рис. 4.2).

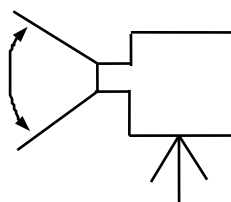


Рис. 4.2. Поле зору тепловізора

Миттєве поле зору – плоскі кути по вертикалі і горизонталі, що визначаються фокусною відстанню об'єктива і лінійними розмірами чутливої ділянки ПВ (рис. 4.3).

$$\gamma_{\text{мит}} = \arctg \frac{a}{f_{\text{об}}}, \quad \gamma_{\text{мит}} = \arctg \frac{b}{f_{\text{об}}},$$

де $f_{\text{об}}$ – фокусна відстань об'єктива.

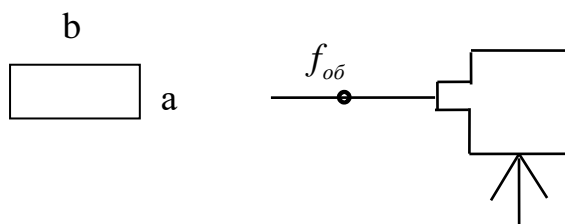


Рис. 4.3. Чутлива ділянка приймача випромінювання і фокусна відстань об'єктива

Кутова роздільна здатність – це граничний (мінімальний) кут між двома точковими випромінювачами, що розташовані на фоні з постійною температурою (рис. 4.4). Якщо зменшити кут на невелике значення, то ці два випромінювача стає неможливо розрізнити, вони ніби зливаються в одну точку.

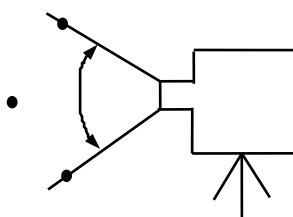


Рис. 4.4. Кутова роздільна здатність

Поріг температурної чутливості – це мінімальна різниця температур об'єкта (t_1) та фону (t_2), що викликає вихідний сигнал ($U_{вих}$), пікове значення якого дорівнює середньоквадратичному значенню шуму ($\bar{U}_{ш}^2$) (рис. 4.5). Математично умови виникнення вихідного сигналу можна записати як:

$$t_1 - t_2 = t_{\min},$$

$$U_{вих} = \bar{U}_{ш}^2.$$



Рис. 4.5. Визначення порогу температурної чутливості

Дальність виявлення – максимальна відстань між точковим об'єктом спостереження і тепловізором, при якому вихідний сигнал в m -разів перевищує середньоквадратичне значення шуму.

Оптична передавальна функція – це міра здатності тепловізора відтворювати просторові частоти, що містяться в зображуваній картині. Мається на увазі здатність правильно передавати співвідношення розмірів та кутів елементів об'єкту, тобто квадрат повинен бути на зображенні квадратом, а не прямокутником або ромбом, прямий кут повинен бути на зображенні прямим.

4.1.2. Оптичні системи тепловізорів

Поряд з приймачем ІЧ-випромінювання найважливішим елементом апаратури ТНК є оптична система (ОС). Функцією ОС є фокусування випромінювання, що надходить від ОК на чутливий елемент ПВ.

До основних параметрів ОС відносять: діаметр ОС (діаметр вхідного вікна об'єктива, D_o), фокусна відстань (F); роздільна здатність; коефіцієнт пропускання; кутове поле та величина аберацій. В якості ОС може бути використаний об'єктив або світловод.

Залежно від розмірів ОК і типу фотоприймача, в дефектоскопії використовуються телескопічні та мікроскопічні об'єктиви. За своєю структурою об'єктиви можуть бути: лінзовими; дзеркальними та комбінованими (дзеркально-лінзовими). Проте в певних задачах функцію ОС можуть виконувати світловоди дзеркального або волоконного типу (рис. 4.6).

Дзеркальний світловод являє собою трубку з дзеркальним покриттям на внутрішній поверхні.

Волоконні світловоди – це тонкі нитки з прозорого в ІЧ-діапазоні матеріалу з показником заломлення, що забезпечує повне внутрішнє відбиття.



Рис. 4.6. Класифікація оптичних систем

Лінзові об'єктиви використовуються у випадках, коли потрібна висока геометрична роздільна здатність та допустимі втрати через поглинання.

Дзеркальні об'єктиви є кращим варіантом у випадках, коли основною вимогою є висока чутливість в поєднанні з простотою виготовлення.

Комбіновані об'єктиви застосовуються у випадках, коли до якості зображення пред'являються підвищені вимоги.

Розглянемо закони формування зображення на прикладі плоскої лінзи (рис. 4.7).

Теплові промені, які падають на лінзу паралельно її оптичній осі, збираються в точці фокусу F' . Зображення об'єкта формується в площині, що називається фокальною і розташована за фокусом F' . Позначимо радіуси сферичних поверхонь лінзи як R_1 та R_2 , та запишемо співвідношення, відоме з геометричної оптики [21]:

$$(n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{F},$$

де n – показник заломлення лінзи.

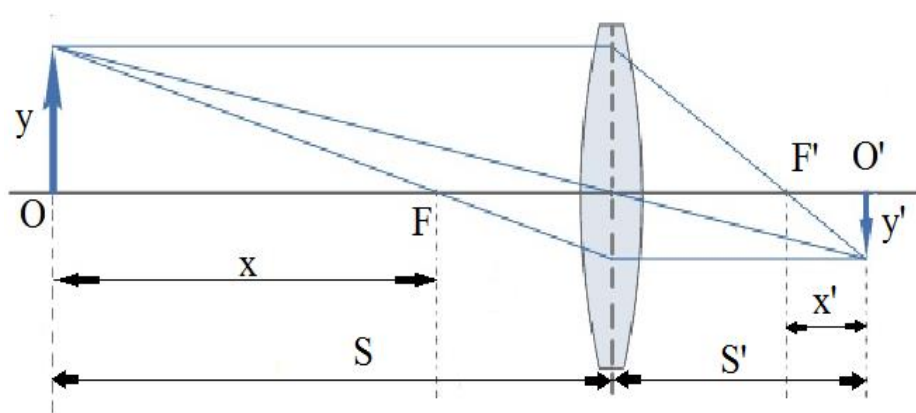


Рис. 4.7. Формування зображення плоскою лінзою

Якщо простір об'єкта і простір зображення в оптичному сенсі є однаковими, то справедлива формула Ньютона [21]:

$$x \cdot x' = f^2,$$

де x – відстань між об'єктом і першою фокальною точкою; x' – відстань між зображенням і другою фокальною точкою.

Розміри об'єкта y і зображення y' в загальному випадку пов'язані співвідношенням:

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{n \cdot S'}{n' \cdot S}.$$

При $m > 0$ зображення пряме, при $m < 0$ – перевернуте.

Ефективність збору енергії випромінювання залежить від світлосили об'єктива:

$$B = \frac{D_o}{f},$$

де D_o – діаметр вхідного вікна оптичної системи.

Величина $A = \frac{D_o}{2f}$ називається числовою апертурою, яка є характеристикою оптичного приладу. Вона описує його здатність збирати світло і протистояти дифракційному розмиттю деталей зображення. Від числової апертури залежить роздільна здатність об'єктива. Максимальне значення числової апертури $A=1$, що відповідає куту, рівному π . Цей кут знаходиться при вершині конуса світлових променів, що сходяться в задньому фокусі.

Глибина різко зображуваного простору – це відстань між передньою і задньою межами чітко зображеного простору, виміряна вздовж оптичної осі [22], в межах якої об'єкти спостереження на зображенні (знімку) відтворюються достатньо різко. Наприклад, при розгляданні зображення з відстані 25 см людське око сприймає його як абсолютно різке за умови, що кружок розсіювання менше 0,1 мм [23]. Глибина різко зображуваного простору є однією з характеристик об'єктиву і визначається співвідношенням [21]:

$$d = \frac{4 \cdot \lambda}{\left(\frac{D_o}{f}\right)^2},$$

де λ – робоча довжина хвилі.

Фізична межа роздільної здатності по миттєвому куту зору характеризується кутовою роздільною здатністю:

$$\delta_1 = 0,244 \cdot \frac{\lambda}{D_o},$$

де одиниці виміру δ_1 – мілірадіани, λ – мкм, D_o – см.

Два точкових джерела будуть відрізнятися одне від одного, якщо кутова відстань між ними відповідає критерію Релея [21]:

$$\delta_2 = 0,122 \cdot \frac{\lambda}{D_o}.$$

У реальних ОС якість зображення може погіршуватися за рахунок аберацій – спотворення зображення. Аберації виникають через використання широких пучків світла або променів (наприклад, теплових), що падають на лінзу під кутом. Аберації призводять до спотворення форми об'єкта, зміни відстані і кутів між елементами зображення. В оптичній системі може виникати п'ять типів аберацій Зейделя, для усунення яких розроблено безліч методик компенсації їх впливу на якість зображення [21, 24]. В даному підручнику розглянуто сферичну аберацію та коми, так як вони грають основну роль в дзеркальних ПЧ-об'єктивах.

Сферична аберация спотворює зображення точки, в результаті чого замість точки отримуємо маленьке коло розсіювання [24, 25].

Кома призводить до того, що точка виглядає, як нерівномірно освітлена пляма, що нагадує комету.

Характеристикою сферичної аберації є діаметр кола розсіювання. Її усувають введенням коригувальних лінз та параболічних дзеркал. Характеристикою коми є тілесний кут. Такий вид аберації виправляють підбором лінз.

Розглянемо типові дзеркальні системи, що працюють в ІЧ-області випромінювання (рис. 4.8). На рис. 4.8а представлена найпростіша система об'єктиву з одним дзеркалом без заломлення променів. Це дзеркало виконує функцію лінзи та фокусує промені на ділянку приймача. В таких системах використовують сферичне або параболічне дзеркало.

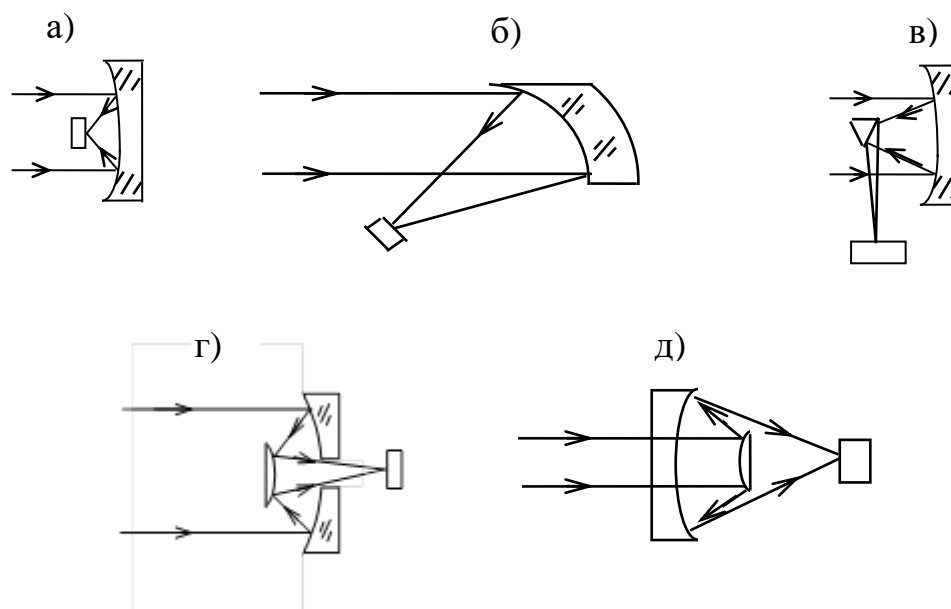


Рис. 4.8. Конструкції дзеркальних об'єктивів

На рис. 4.8б показана система Гершеля [26]. Як дзеркало використовується позацентрова частина параболоїда (частина, що знаходиться поза центром). У такій системі приймач не екранує потік випромінювання від ОК.

Також поширеними є системи з заломленням променів – Ньютона (рис. 4.8в) та Кассегрена (рис. 4.8г), де використовується первинне сферичне дзеркало або параболічне, а вторинне – параболічне або плоске. Іноді використовують також систему Шварцшільда (рис. 4.8д), у якій хід променів обернений порівняно з системою Кассегрена [27].

Лінзові оптичні системи, як правило, виготовляють з германію (Ge), кремнію (Si) і селеніду цинку (ZnSe), рідше з безкисневого скла та скла з теллуриду кадмія (CdTe). Зазначені матеріали є прозорими для інфрачервоного випромінювання. Звичайне скло не пропускає випромінювання у ІЧ-діапазоні.

Конструкції лінзових оптичних систем показані на рис. 4.9. На рис. 4.9а представлено одноелементний об'єктив на основі збирального меніску. Двохелементний об'єктив представлений на рис. 4.9б, він складається з двоопуклої збиральної лінзи та двоввігнутої лінзи, яка збирає випромінювання у точці фокуса.

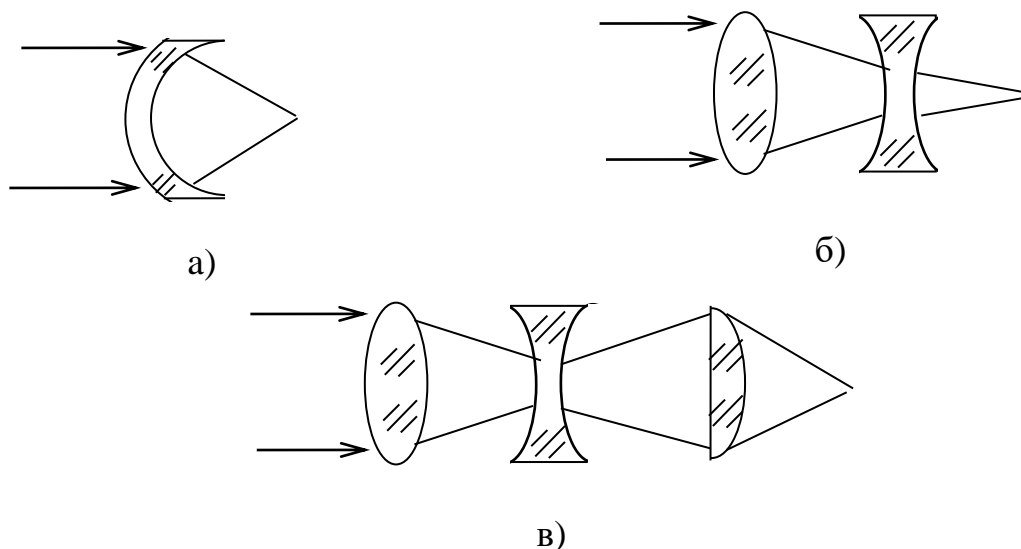


Рис. 4.9. Конструкції лінзових оптичних систем

Трьохелементна лінзова оптична система, що представлена на рис. 4.9в, у своєму складі містить двоопуклу збиральну лінзу, яка фокусує випромінювання на двоввігнутій розсіювальній лінзі. Після цієї лінзи розсіяні промені потрапляють на плоско-опуклу лінзу, що збирає їх в точці фокуса. Двоввігнута лінза може бути як збиральною, так і розсіювальною. Властивості такої лінзи будуть залежати від розташування центрів сферичних поверхонь та співвідношення радіусів цих поверхонь.

4.1.3. Системи сканування

В оптико-механічних тепловізорах сканування відбувається шляхом зміни напрямку оптичної осі приладу. Різновидів траєкторій сканування відомо досить багато, але широковідомі наступні: спіральна, розеткова, циклоїдальна, прямокутна [28].

У тепловізорах використовують, як правило, телевізійну розгортку. При телевізійній розгортці оптична вісь переміщується з постійною швидкістю по двох взаємно перпендикулярним напрямкам. Рух по горизонталі утворює рядкову розгортку, лінії що проводяться при цьому називаються рядками. Рух оптичної осі по вертикалі створює кадрову розгортку, і в результаті всі рядки розташовуються один під іншим. За один період кадрової розгортки відбувається передача нерухомого зображення, яке називається кадром.

Нижче розглянуто системи сканування, що найбільш часто використовуються в тепловізорах.

Сканування коливальним плоским дзеркалом

Така система може бути використана для сканування плоского теплового поля прямокутної форми з використанням одно елементного ПВ.

Плоске дзеркало здійснює коливальний рух відносно двох взаємно перпендикулярних осей. Електромеханічний привід приводить дзеркало в коливальний рух. У процесі сканування миттєве поле зору приладу переміщується в площині об'єкта контролю, утворюючи телевізійний растр. Дзеркало розміщують до об'єктива в паралельному пучку променів або в пучку променів, що сходяться (рис. 4.10).

Перший варіант схеми на рис. 4.10 (без елемента 3') дозволяє досягти більш якісного зображення об'єкта, але при цьому зростають габарити дзеркала 2. У другому випадку (з використанням об'єктива 3'), за умови розташуванні дзеркала 2 за об'єктивом 3', габарити дзеркала можна зменшити, але в цьому випадку, при повороті дзеркала 2 поверхня вийде не плоскою, а сферичною, та збільшиться пляма оптичної аберації.

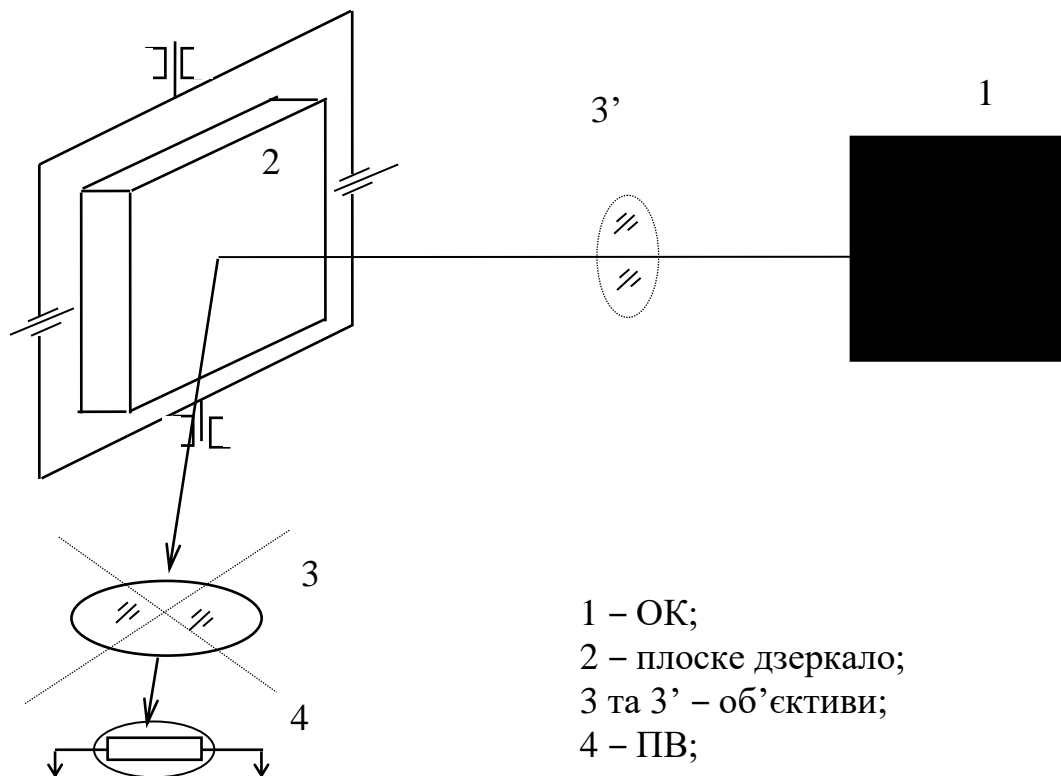


Рис. 4.10. Система сканування плоским дзеркалом

Розглянута система сканування з одним дзеркалом (рис. 4.10) має два ступені свободи. Разом з тим, у вимірювальних засобах можна зустріти сканер, який використовує два дзеркала. Кожне з дзеркал здійснює коливальний рух відносно взаємно перпендикулярних осей, утворюючи телевізійний растр. На рис. 4.11 показана конструкція такої системи сканування з багатоелементним ПВ.

У системі на рис. 4.11 дзеркало робить один коливальний рух відносно осі Y . В цьому випадку фокусування випромінювання здійснюється дзеркальним об'єктивом 3. Розгортку по горизонталі забезпечує коливальне дзеркало 4. Кадрову розгортку забезпечує багатоелементний ПВ 2.

Загальний недолік систем сканування з використанням коливальних дзеркал – це обмеження частоти розгортки за рахунок ударів дзеркала в крайніх положеннях.

Поряд з одним дзеркалом в системах сканування може використовуватися система дзеркал, дзеркальні призми, барабани та піраміди.

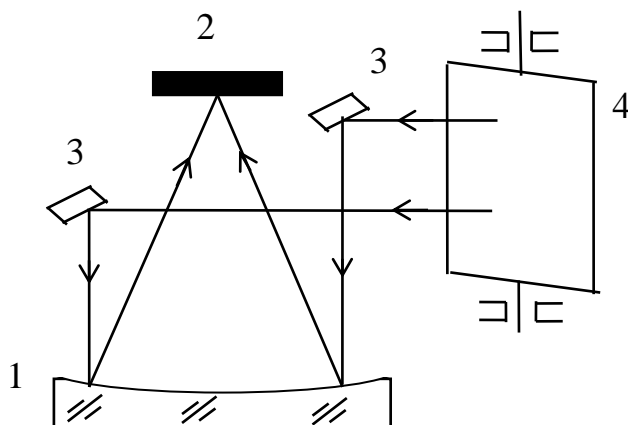


Рис. 4.11. Система сканування з багатоелементним приймачем випромінювання:
1 – об'єктив; 2 – багатоелементний ПВ; 3 – відбивні дзеркала; 4 – плоске коливальне дзеркало

В авіаційних тепловізійних системах, які використовуються для картографування місцевості, застосовують системи сканування з обертовим дзеркальним барабаном (рис. 4.12).

При обертанні барабана 1 з частотою n , послідовно проглядаються ділянки земної поверхні 2, ширина l яких визначається миттєвим кутом зору цієї системи. Довжина цих ділянок визначається кутом зору. Переміщення з одного рядка на інший відбувається завдяки руху апарату, що летить зі швидкістю V . Для того, щоб на виході ПВ 3 отримати інформацію про кожен об'єкт, розташований в полі зору, необхідно, щоб об'єкт знаходився в межах миттєвого поля зору протягом часу, який має перевищувати постійну приймача τ , тобто:

$$\Delta t \geq k \cdot \tau,$$

де k – коефіцієнт запаса, зазвичай $k = 2$. Час Δt визначається частотою обертання барабана n і кутом зору γ . Тому, гранично допустима частота обертання барабана визначається з формули:

$$n_{\text{гр}} \leq \frac{60 \cdot \gamma}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot \tau}$$

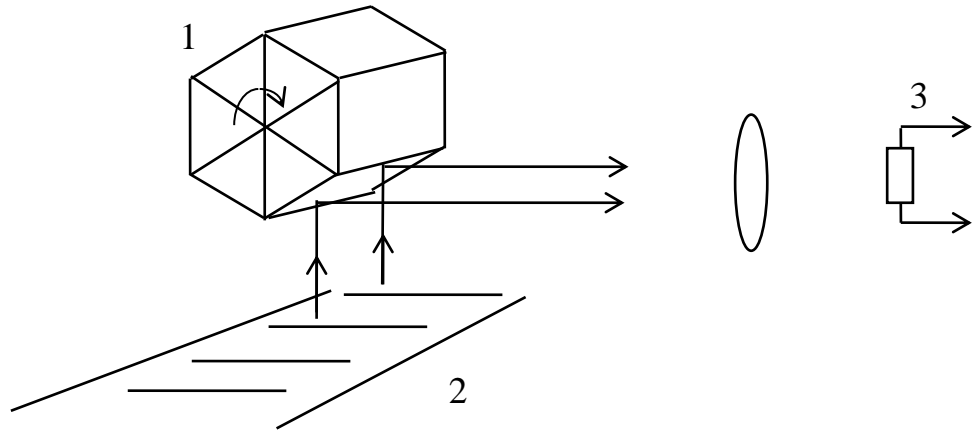


Рис. 4.12 . Авіаційна система сканування для картографування місцевості

Лінійна ширина l ділянки місцевості, яку можна оглянути за один оберт барабана рівна:

$$l = H \cdot N \cdot \gamma_{\text{мит}} \cdot \frac{n}{60},$$

де H – висота польоту; N – кількість дзеркальних граней барабана; $\gamma_{\text{мит}}$ – миттєвий кут зору.

Через те, що система огляду повинна працювати без пропусків поверхні, суміжні ділянки повинні стикатися або перекриватися, а це виконується за умови:

$$H \cdot N \cdot \gamma_{\text{мит}} \cdot \frac{n_{\text{сп}}}{60} \cdot b \leq V, \quad (4.1)$$

де b – коефіцієнт перекриття.

З формули (4.1) визначається гранично допустима частота обертання барабана:

$$n_{\text{гр}} = \frac{60 \cdot b \cdot V}{H \cdot N \cdot \gamma_{\text{мит}}}. \quad (4.2)$$

З формул (4.1) та (4.2) видно, що існує як верхня, так і нижня допустима межа частоти обертання дзеркального барабана. Для зменшення швидкості обертання барабана збільшують число його граней. Максимальне число граней визначається за формулою:

$$N_{\text{max}} = \frac{2 \cdot \pi}{0,5 \cdot (\gamma + \Delta\gamma)},$$

де $\Delta\gamma$ – додатковий кут, який враховує запас часу на проглядання одного рядка.

4.2. Оптичні системи промислових тепловізорів з оптико-механічним скануванням

Тепловізори з оптико-механічним скануванням широко застосовуються як в промисловості для контролю теплових режимів об'єктів, так і в медицині для діагностування широкого спектру захворювань. В данному розділі розглянуто

конструкції оптичних систем і систем сканування серійно випускаємих тепловізорів ТВ-03 і «Радуга», а також функціональну схему одного з перших тепловізорів «Янтар». Особливу увагу приділено оригінальності інженерних рішень щодо реалізації принципу сканування об'єкту. Конструкції розглянутих тепловізорів мають власні особливі рішення, які дозволяють вирішувати однакову задачу – розкладання зображення об'єкту на елементарні площадки.

4.2.1. Оптична схема тепловізора «ТВ-03»

Тепловізор «ТВ-03» це прилад, який довгий час використовувався для контролю стану промислових об'єктів, наприклад, контроль стану ізоляторів високовольтних електромереж. Оптична схема та система сканування тепловізора показана на рис. 4.13.

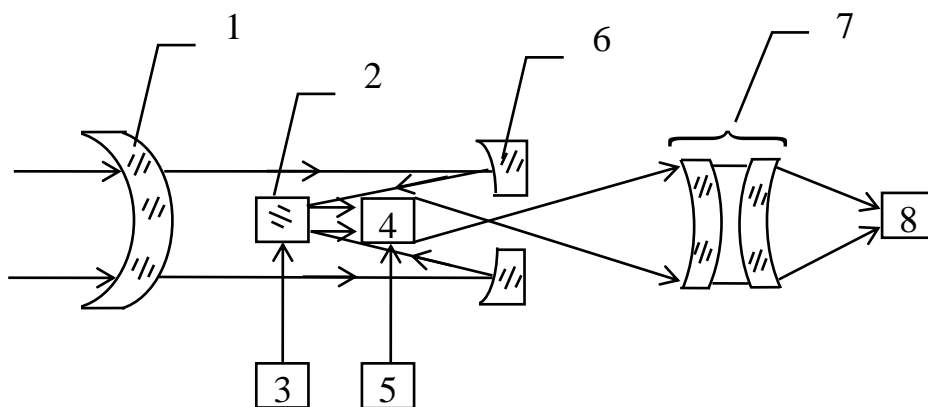


Рис. 4.13. Оптична схема та система сканування тепловізора «ТВ-03»: 1 – змінна лінза; 2 – плоске дзеркало; 4 та 8 – гранна призма; 3 та 5 – електродвигуни; 6 – параболічне дзеркало; 7 – лінзовий конденсор; 8 – приймач випромінювання

Оптична схема тепловізора побудована на основі дзеркально-лінзового об'єктива, до складу якого входять: змінна лінза 1, плоске дзеркало 2, 8-гранна призма 4, параболічне дзеркало 6 і лінзовий конденсор 7.

Сканування по кадру забезпечує плоске дзеркало 2. Воно здійснює коливальні рухи за допомогою двигуна 3 через редуктор і кулачок. Частота коливання дзеркала дорівнює 16 Гц.

Сканування по рядках забезпечує 8-гранна призма 4. Ця призма обертається з частотою 200 об/сек. Це забезпечує частоту рядків 1600 Гц, а в кадрі виходить 100 рядків. Призма обертається за допомогою двигуна 5. Плоске дзеркало забезпечує поле зору $4,5 \times 4,5^\circ$.

Випромінювання від об'єкту проходить через призму та фокусується за допомогою лінзового конденсора 7 на ПВ 8. Для зміни таких важливих параметрів як кут зору і мінімальна робоча відстань в тепловізорі передбачені дві змінні лінзи 1:

одна з них позитивна, а інша негативна. Принцип визначення типу лінзи показано на рис. 4.14.

З позитивною лінзою тепловізор має властивість мікроскопа та збільшує зображення в 1,3 рази. Мінімальна робоча відстань між об'єктивом і об'єктом 170 мм, лінійна роздільна здатність 0,3 мм. З негативною лінзою тепловізор працює як телескоп. Лінійна роздільна здатність в такому випадку буде 1÷1,5 мм, робоча відстань 0,8 м.

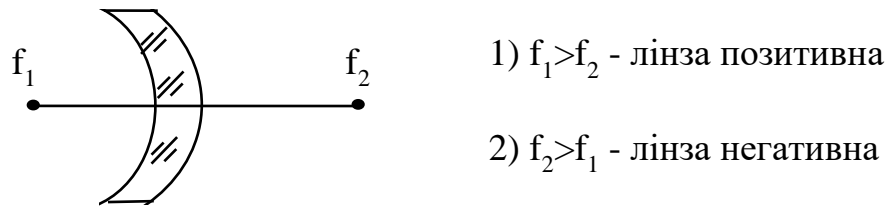


Рис. 4.14. Принцип визначення типу лінзи

Для даного тепловізора: фокусна відстань для позитивної лінзи $f_1 = 175$ мм і $f_2 = 133$ мм. Для негативної – $f_1 = 250$ мм і $f_2 = 332$ мм.

4.2.2. Оптична схема тепловізора «Радуга»

Основна сфера застосування тепловізора «Радуга» в медицині для діагностики захворювань в тілі людини. Принцип розгортки зображення об'єкту тепловізора показано на рис. 4.15.

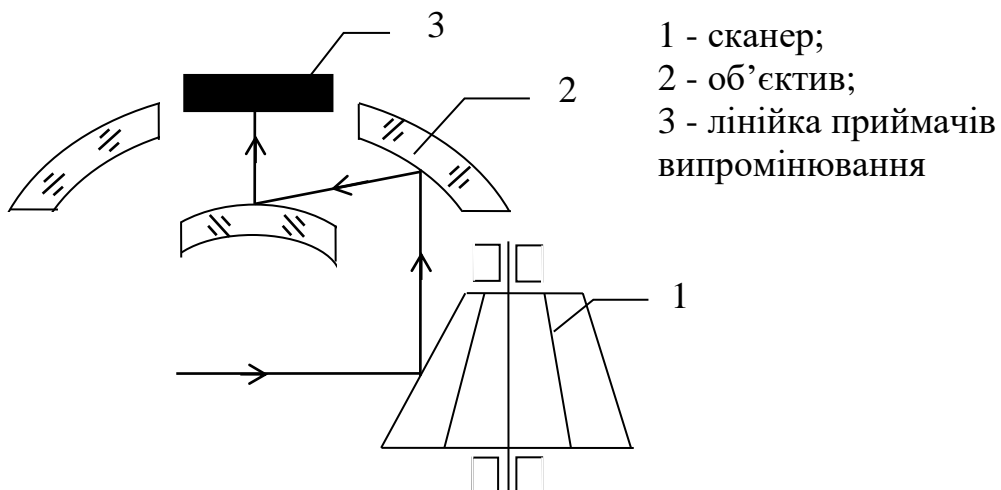


Рис. 4.15. Оптична схема та пристрій сканування тепловізора «Радуга»

Пристрій сканування тепловізора «Радуга» виконаний у формі дзеркального барабану, який має 12 граней, причому кожна з граней має різний кут нахилу. В якості об'єктива використано дзеркальний об'єктив типу Кассегрена.

Приймач випромінювання тепловізора має 11 елементів, тобто фактично складається з 11 приймачів, які підключаються до 11-канального блоку підсилювачів.

Формування зображення теплового поля забезпечується обертанням барабана з частотою 25 об/сек, і наступним зняттям інформації з 11 елементів приймача випромінювання, на які об'єктив фокусує зображення об'єкта.

При обертанні барабана кожна грань забезпечує розгортку зображення по горизонталі. Вертикальна розгортка забезпечується послідовним зняттям інформації з 11 елементів приймача і одночасним записом її на цифровий носій. На екрані кінескопа формується кадр, що складається з 12 підкадрів. Кожна грань формує 11 рядків (по числу елементів ПВ), таким чином, утворюється кадр з 132 рядків ($12 \times 11 = 132$).

4.2.3. Функціональна схема тепловізора «Янтар»

Тепловізор «Янтар» є одним з перших швидкодіючих тепловізорів. Для розгортки зображення в його конструкції використовувався диск Ніпкова, який містив 45 лінз розташовані по спіралі Архімеда (рис. 4.16).

Диск було запропоновано німецьким техніком та винахідником Паулем Ніпковим. Винайдений ним диск, який отримав назву диск Ніпкова, став підґрунтям появи механічного телебачення в 1920-х роках. Ніпков винайшов свій диск в 1883 році, в той час коли був студентом.

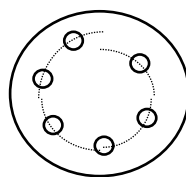


Рис. 4.16. Схема диска Ніпкова

Функціональну схему тепловізора «Янтар» приведено на рис. 4.17. В ньому розгортка зображення за допомогою диска Ніпкова відбувається наступним чином.

При обертанні диска лінза рухається по дузі великого радіусу. В певний момент часу в отворі діафрагми 2 знаходиться тільки одна лінза 3. Кожна лінза, в межах діафрагми, прокреслює один рядок. Таким чином, за один оберт диска прокреслюються 45 рядків, при цьому кожен з рядків розташований один під одним, що формує один кадр.

У тепловізорі використовується 2-х елементний ПВ, що дає можливість подвоїти кількість рядків в кадрі, тобто $45 \times 2 = 90$.

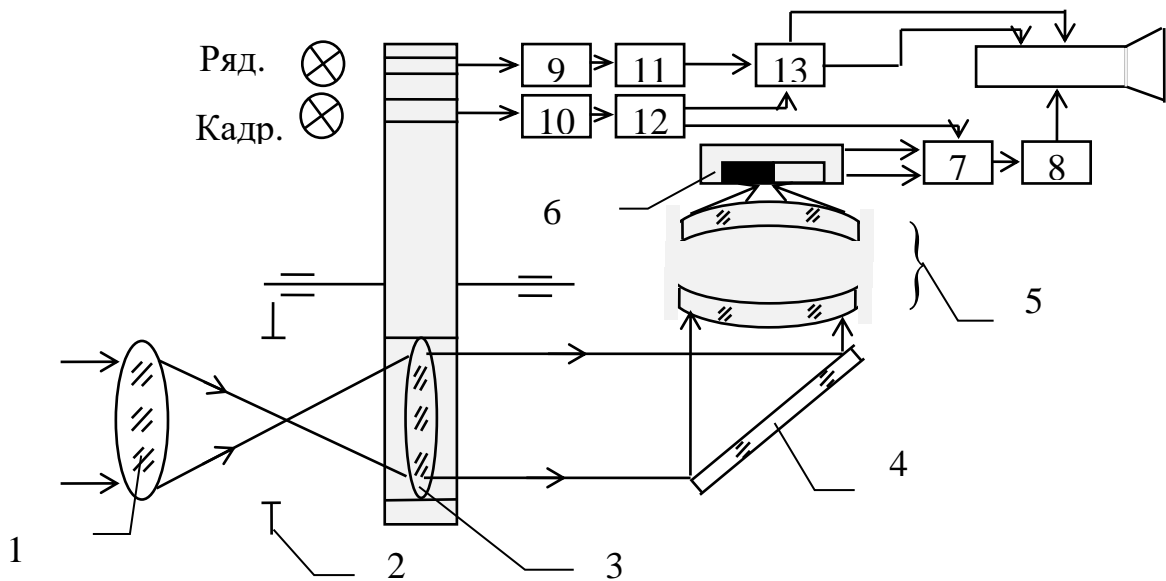


Рис. 4.17. Функціональна схема тепловізора «Янтар»: 1 – об’єктив; 2 – діафрагма; 3 – лінза (одна з 45 лінз); 4 – дзеркало; 5 – лінзовий конденсор; 6 – двоелементний приймач випромінювання з підсилювачем; 7 – перемикач; 8 – відео підсилювач; 9, 10 – датчики строкових і кадрових синхроімпульсів; 11, 12 – блоки строкової й кадрової синхронізації; 13 – блок розгортки електронно-променевої трубки; 14 – електронно-променева трубка

На початку роботи приладу перемикач 7 налаштовує підключення першого елемента ПВ до відео підсилювача 8. Диск обертається з частотою 25 Гц. За один оберт диска отримуємо 45 рядків.

Синхронізація каналу розгортки кінескопа з обертанням диска сканування забезпечується з допомогою 2 каналів. Синхронізацію по рядках забезпечують в диску 45 отворів, та 1 отвір виділено для кадрової синхронізації.

Потік світла від ламп проходить по чергово крізь кожний отвір в обертовому диску та потрапляє на фотодіоди 9 і 10, що відповідають за формування 45 електричних імпульсів синхронізації по рядках і один по кадру. Після одного повного оберту диска кадровий синхроімпульс надходить до перемикача 7, який підключає другий елемент ПВ до пристрою 8.

В результаті другого обороту диска прокреслюють ще 45 рядків, які розташовані через один з отриманими в процесі попереднього оберту.

Таким чином, сканування одного кадру зображення відбувається за два оберти диска, при цьому прокреслюються 90 рядків. На екрані кінескопа з’являється спочатку перші 45 рядків, а через 1/25 сек наступні 45 рядків. Для людського ока такий процес є непомітним. Частота підкадрів 25 Гц, частота кадру 12,5 Гц.

4.3. Тепловізори з електронним скануванням

Тепловізори з електронним скануванням відносяться до тепловізорів другого покоління. Основним елементом цих приладів є телевізійна (TV) передавальна трубка, чутлива до ІЧ-випромінювання. В даному розділі розглянуто принципи будови та особливості застосування передавальної телевізійної трубки з накопиченням, а також представлена узагальнена блок-схема тепловізора.

Передавальна телевізійна трубка з накопиченням

Передавальну телевізійну трубку з накопиченням називають відіконом. Схематично конструкція цього елемента показана на рис. 4.18.

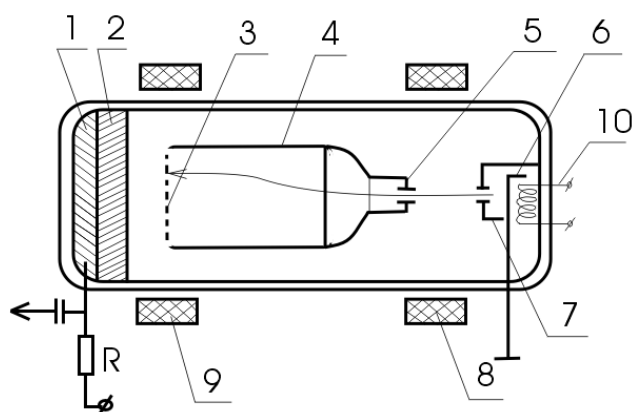


Рис. 4.18. Конструкція відікону: 1 – сигнальна пластина; 2 – мішень; 3 – сітка; 4 – фокусуєчий електрод; 5 – анод; 6 – катод; 7 – керуючий електрод; 8 – коригуюча котушка; 9 – фокусуєча котушка

Елементи конструкції відікону зібрані у скляному балоні, на внутрішню поверхню якого нанесена прозора металева плівка – сигнальна пластина 1. На цю пластину нанесений тонкий шар термочутливого напівпровідника, що виконує функцію мішені 2 відікона, яка є основним елементом. Мішень перетворює теплове випромінювання в електричний сигнал. Іншим основним елементом відікона є електронний прожектор, який створює промінь для комутації. Прожектор містить анод 5, катод 6 та керуючий електрод 7. Фокусування променя здійснюється електродом 4, котушкою фокусування 9 та котушкою коригування 8. Сітка 3 забезпечує нормальне падіння електронів по всій поверхні мішені. На рис. 4.18 не показана система котушок, які забезпечують відхилення електронного променя по вертикалі і горизонталі. Загальний вигляд відікону показано на рис. 4.19.



Рис. 4.19. Відікон

Робота відікона

Зображення, яке необхідно передати, проектується об'єктивом через прозору сигнальну пластину 1 (рис. 4.18) на термочутливий шар напівпровідникової мішені 2. В результаті, слабо освітлені ділянки мішені мають великий електричний опір, а добре освітлені ділянки – малий. Таким чином, розподіл електричних опорів ділянок мішені відповідає розподілу температури на поверхні об'єкту.

Зворотний бік мішені комутується електронним променем. Електронне сканування здійснюється періодичним переміщенням променя по поверхні мішені. Після комутації мішені отримуємо на її поверхні рельєф з різних потенціалів, що відповідають енергетичній яскравості об'єкта. Цей потенціальний рельєф зчитується тим же електронним променем, перетворюючи потенціал елементарної ділянки мішені в електричний імпульс. Сукупність цих імпульсів утворює відеосигнал, який знімається з опору навантаження R_n .

У телевізійних передавальних трубках найбільш поширеним типом розгортки є розгортка по рядках. При використанні такої розгортки з прямокутним кадром, розгортка всієї площини мішені відікона утворюється при переміщенні електронного променя по двом взаємно перпендикулярним напрямкам, як показано на рис. 4.20.

Проведені променем паралельні лінії уздовж осі x називаються рядками. При переміщенні променя по осі y рядки розташовуються один під одним і утворюють телевізійний растр.

Рух променя від початку рядка до його кінця називається прямим ходом променя. Для розгортки наступного рядка необхідний зворотний хід променя (він

показаний пунктиром). З кінця останнього рядка відбувається зворотний хід променя. Це забезпечує покадрова розгортка.

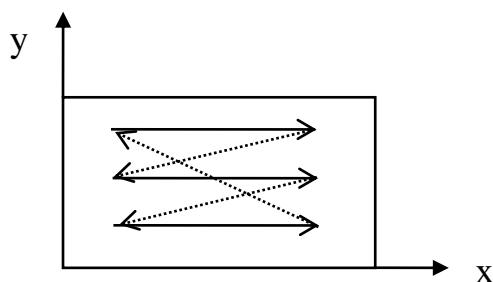


Рис. 4.20. Схема побудови телевізійного растру

Для того, щоб не було помітно зворотній хід променя, під час його руху в відеосигнал вводять рядкові і кадрові імпульси прямокутної форми з метою компенсації цього зворотного ходу. Тривалість таких імпульсів компенсації дорівнює часу проходження зворотного ходу променю.

Основним недоліком відіконів є низька чутливість. З метою її підвищення використовують охолоджувані мішені, які охолоджуються з використанням рідкого азоту. В основному, такі відікони використовуються для спостереження сильно нагрітих об'єктів.

Існує інша група телевізійних передавальних трубок, де в якості чутливого елемента використовується піроелектрична мішень. Вони називаються піріконами. Пірікони чутливі до ІЧ-випромінювання в діапазоні від 8 до 14 мкм. Їх застосовують для спостереження за слабо нагрітими об'єктами.

Піроелектрична мішень має властивість змінювати свою електричну поляризацію під впливом теплового випромінювання. Принцип дії пірікона аналогічний дії відікона. Проте мішень пірікона більш чутлива до температурних ефектів, тому вона не вимагає охолодження. Це головна перевага пірікона. Існують також різновиди відіконів – плюмбікони, кремнікони і т. ін.

Спрощена структурна схема тепловізора з електронним скануванням показана на рис. 4.21.

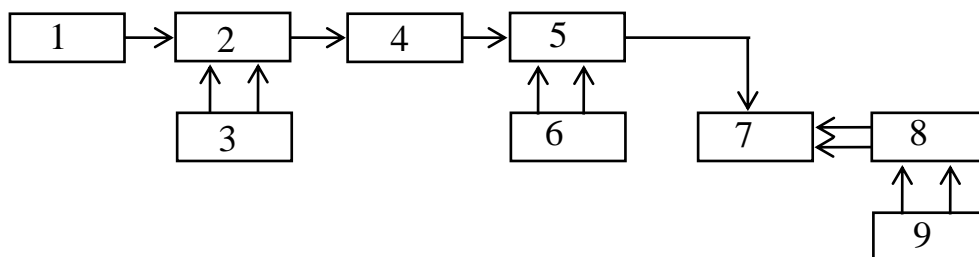


Рис. 4.21. Структурна схема тепловізора з електронним скануванням

До складу схеми на рис. 4.21. входять наступні блоки: 1 – оптична система; 2 – блок передавальної TV трубки; 3 – блок кадрової та рядкової розгорток, який виробляє змінну напругу, що подається до системи фокусування та системи, що відповідає за відхилення електронного променя по двом взаємно перпендикулярним напрямкам; 4 – попередній підсилювач відеосигналу; 5 – відеотракт, що містить відеопідсилювач (на виході тракту отримуємо повний TV сигнал, співвідношення сигнал-шум дорівнює 30); 6 – синхрогенератор, який виробляє кадрові і рядкові імпульси для компенсації зворотного ходу променя приймальної і передавальної трубок; 7 – блок приймальної TV трубки, що складається з трубки та системи фокусування і відхилення (СФВ); 8 – блок кадрової і рядкової розгорток, який формує змінну напругу, що подається на системи фокусування та відхилення для зміщення електронного променя по двом взаємно перпендикулярним напрямкам (приймальної трубки); 9 – блок синхронізації, який виділяє з повного TV сигналу синхроімпульси, які надходять на блок розгортки приймальної TV трубки.

Основний недолік відіконів (а також їх різновидів: плюмбіконів, кремніконів і т. д.) пов'язаний з необхідністю використовувати високовольтні вакуумні системи. Це обумовлює низькі довговічність і надійність пристроїв, значні габаритні та масу, невисоку механічну міцність та інші недоліки, властиві усім вакуумним приладам.

4.4. Прилади з зарядовим зв'язком

Даний параграф присвячено приладу із зарядним зв'язком (ПЗЗ), який відносять до класу твердотільних напівпровідникових приймачів. ПЗЗ являє собою ряд простих МДН-структур (метал-діелектрик-напівпровідник). Такі прилади знайшли широке використання у сучасних оптико-електронних та тепловізійних пристроях.

4.4.1. Принцип дії приладів з зарядовим зв'язком

Конструкція ПЗЗ сформована на спільній напівпровідниковій підкладці таким чином, що смужки металевих електродів утворюють лінійну або матричну регулярну систему, в якій відстані між сусідніми електродами досить малі (рис. 4.22).

Принцип дії ПЗЗ полягає в наступному. Якщо до будь-якого металевого електроду матриці докласти від'ємну напругу, то під дією електричного поля, що при цьому виникає, електрони, які є основними носіями в підкладці, переміщуються від поверхні вглиб напівпровідника. В цей момент поверхні

утворюється збіднена область, яка на енергетичній діаграмі представляється потенціальною ямою для неосновних носіїв – дірок. Дірки, що потрапляють в цю область притягуються до межі поділу діелектрик-напівпровідник і локалізуються в вузькому поверхневому шарі. Якщо тепер до сусіднього електроду докласти від’ємну напругу більшої амплітуди, то утворюється більш глибока потенціальна яма і дірки переміщуються до неї. Прикладаючи до різних електродів ПЗЗ необхідні керуючі напруги, можна забезпечити як зберігання зарядів в тих чи інших приповерхневих областях, так і спрямоване переміщення зарядів уздовж поверхні від структури до структури [29, 30].

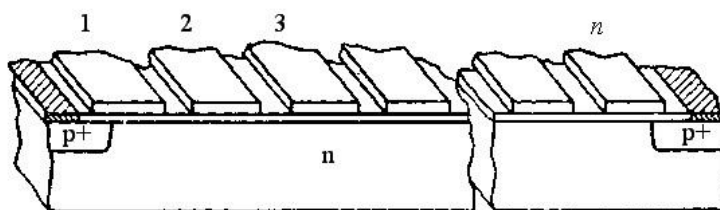


Рис. 4.22. Структура ПЗЗ

Запис інформації відбувається шляхом введення зарядового пакету, тобто необхідної кількості дірок, що здійснюється p-n-переходом, розташованим поблизу крайнього ПЗЗ елемента (електрод 1 на рис. 4.22). Зчитування – шляхом виведення заряду з системи, що здійснюється за допомогою p-n-переходу, розташованого поблизу n-го електроду на рис. 4.22.

Таким чином, ПЗЗ являє собою пристрій, в якому зовнішня інформація (електричні або світлові сигнали) перетворюється в зарядові пакети рухомих носіїв і певним чином розміщуються в приповерхневих областях, а обробка інформації здійснюється керованим переміщенням цих пакетів вздовж поверхні.

Зрозуміло, що заряд, введений в МДН-структуру, не може зберігатися в ній необмежено довго. Процес термогенерації електронно-діркових пар в об’ємі напівпровідника і на межі поділу діелектрик-напівпровідник призводить до накопичення в потенціальних ямах паразитних зарядів, що спотворює зарядову інформацію та з часом відбувається її повне «стирання». Цей може відбуватись за сотню мілісекунд або навіть декілька десятків секунд, проте цей час має кінцеве значення та визначає існування нижньої граничної частоти. Таким чином, робота приладу ґрунтується на нестационарному стані МДН-структури, а ПЗЗ є пристій з елементами динамічного типу.

Фізичні основи роботи ПЗЗ

З метою розуміння роботи ПЗЗ, розглянемо динаміку переміщення зарядових пакетів на прикладі трьохтактного зсувного регістру (рис. 4.23) [29].

У цій схемі кожен третій електрод підключається до відповідної шини тактових імпульсів. У початковому стані (рис. 4.23, а) під напругою зберігання $U_{зб} = -U_2$ знаходяться електроди 1, 4 та 7, всі інші – під напругою $-U_1$ ($U_1 < U_2$); підкладка заземлена. Значення напруги $-U_1$ вибирається трохи більшим за значення порогової напруги U_0 . Величина U_0 для МДН-структури визначається як мінімальна напруга на затворі. За такого значення напруги настає інверсія на поверхні напівпровідника, тобто вся поверхня напівпровідника стає збідненою і на поверхневих рівнях зникають електрони.

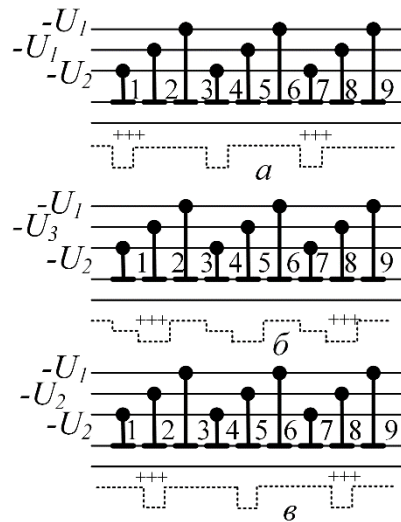


Рис. 4.23. Схема трьохтактного зсувного регістру на ПЗЗ:
а – зберігання інформації в елементах 1, 4 та 7; б – передача інформації;
в – зберігання інформації в елементах 2, 5 та 8

Перший такт. Припустимо, що на першому такті роботи ПЗЗ, під електродами 1, 4 та 7 утворилися потенційні ями. Зарядові пакети присутні тільки під 1 та 7 електродами, а під 4-м їх немає.

Другий такт. На другому такті до електродів 2, 5 та 8 прикладається напруга запису $U_{зан} = -U_3$ ($U_3 > U_2$) і заряди перетікають від 1-го елемента ПЗЗ до 2-го і від 7-го до 8-го (рис. 4.23, б).

Передача заряду від елемента до елемента здійснюється прикладанням до сусіднього електроду більшої (за амплітудою) напруги ніж напруга запису $U_{зан}$ (рис. 4.24). У зазорі між електродами виникає поле, під дією якого дірки переміщуються в більш глибоку потенціальну яму. Очевидно, що напруга запису

$U_{зан}$ повинна перевищувати напругу зберігання $U_{зб}$, і чим більша відстань між електродами, тим більша повинна бути різниця між цими напругами.

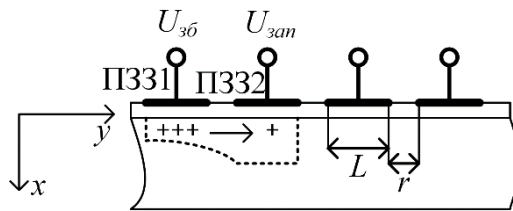


Рис. 4.24. Схема передачі заряду в ПЗЗ: L – довжина електродів ПЗЗ, r – довжина зазору між електродами

Після того, як приклали до елемента 2 потенціал запису $U_{зан} > U_{зб}$, в зазорі між елементами встановлюється тянуче поле, причому як правило напруженість його настільки висока, що дірки, які знаходяться поблизу лівої межі елемента 1, практично миттєво переміщуються до елемента 2. Концентрація дірок поблизу правої межі елемента 2 дуже швидко спадає до нуля (тобто поле зазору діє аналогічно полю зворотного зміщеного колекторного рп-переходу в транзисторі). Різка зміна рівномірності розподілу дірок в елементі 1 викликає їх інтенсивний дрейф і дифузійний розподіл всередині потенційної ями зліва на право [29].

Третій такт. На третьому такті на електродах встановлюються напруги відповідно до рис. 4.23 в, та починається фаза зберігання зарядової інформації в елементах 2, 5 та 8.

Таким чином, для ПЗЗ характерні два режими роботи: зберігання та передача зарядових пакетів. У режимі зберігання ПЗЗ працює як МДН-ємність.

До числа найважливіших функціональних особливостей ПЗЗ відносять наступне:

- можливість зберігання зарядової інформації;
- можливість спрямованої передачі зарядів вздовж поверхні напівпровідникового кристала;
- можливість перетворення світлового потоку в електричний заряд і подальшого його зчитування (сканування).

Особливості споживання електроенергії:

- низька потужність споживання (5-10 мкВт/біт в режимі передачі інформації);
- практично повна відсутність витрат енергії в режимі зберігання;
- простота конфігурації і регулярність системи елементів в ПЗЗ забезпечує високу швидкодію цих приладів, а граничні тактові частоти містяться в гігагерцевому діапазоні.

Основні конструктивно-технологічні особливості ПЗЗ:

- технологічна якість і простота, тобто мале число фотолітографічних і термодифузійних процесів при виготовленні приладу, що забезпечує якість багатoeлементних пристроїв з великим числом елементів, наприклад понад 100;
- високий ступінь інтеграції, який перевищує сотні елементів на одному кристалі і висока щільність упаковки - більше 100 біт/см²;
- мала кількість зовнішніх виводів, що є важливим при побудові високонадійних систем.

Сфери застосування ПЗЗ дуже різноманітні. В цифровій техніці ПЗЗ використовуються як зсувні регістри, оперативні щипам'ятовуючі пристрої (так звані ОЗУ), логічні схеми тощо. Для аналогових сигналів ПЗЗ використовують як лінії затримки, які за технічними характеристиками значно перевершують свої акустичні і магнітні аналоги.

4.2.2. Прилади з зарядовим зв'язком у оптоелектроніці

В оптоелектронній техніці ПЗЗ використовуються в якості фотоприймачів для формування і перетворення зображень об'єктів. Якщо на багатoeлементний або матричний ПЗЗ направити світловий потік, що містить зображення, то в об'ємі напівпровідника відбудеться фотогенерація електронно-діркових пар. Носії зарядів потрапляючи в збіднену область ПЗЗ розділяються і дірки накопичуються в потенціальних ямах. При цьому величина накопичуваного заряду пропорційна локальній освітленості об'єкта. Через деякий час, який необхідний для сприйняття зображення (близько декількох мілісекунд), в матриці зафіксується картина зарядових пакетів, що відповідає розподілу освітленості об'єкта. Процес підключення тактових імпульсів дозволить перемістити зарядові пакети до вихідного пристрою зчитування, який сформує відповідні їм електричні сигнали. В результаті на виході отримується послідовність імпульсів з різною амплітудою, огинаюча яких формує відеосигнал. Тобто ПЗЗ являють собою безвакуумні напівпровідникові формувачі відеосигналів. Притаманне їм самосканування дозволяє позбутися габаритних та ненадійних високовольтних вакуумних трубок зі скануванням електронним променем [29].

ПЗЗ є унікальними аналогами електронно-променевої трубки. В порівнянні з вакуумними приладами, ПЗЗ мають наступні переваги:

- зменшення маси, габаритних розмірів, споживаної потужності;
- підвищення надійності та якості формування відеосигналів.

Зазначені переваги обумовлені самоскануванням – передачею зарядових пакетів на вихід формувача сигналів зображення (ФСЗ), яка здійснюється за

допомогою самих ПЗЗ-елементів. Поєднання функцій фоточутливих і скануючих елементів в одному приладі дозволяє вважати ПЗЗ найбільш перспективними для створення повністю твердотільних ФСЗ. Додаткова перевага фотоприймачів на основі ПЗЗ полягає в можливості використання різноманітних напівпровідникових матеріалів, що дозволяє працювати в широкій області електромагнітного спектру, включаючи і ІЧ-область.

Перші ПЗЗ з'явилися у 1969 році в результаті досліджень в області фізики та технології МДН-приладів. Проте широкого застосування вони не знайшли через багато невирішених проблем з їх використанням, але в першу чергу технологічні особливості, які не дозволяли отримувати якісні бездефектні ПЗЗ досить великої інформаційної ємності. Найважливішою технологічною проблемою створення великих ПЗЗ з одношаровою металізацією була проблема отримання вузьких (2–3 мкм) зазорів між електродами. Поширеним технологічним браком в таких структурах були замикання між електродами. Окремою проблемою була й наявність проколів у діелектричних плівках що знаходились між металом і напівпровідником.

З розвитком нанотехнологій багато зазначених проблем вдалося вирішити. Сьогодні одним з найважливіших напрямів розвитку оптоелектроніки є створення телевізійних систем на базі інтегральних мікросхем, починаючи від передавальної системи і закінчуючи екраном.

Розглянемо телевізійну передавальну систему (рис. 4.25), основою якої є формувач сигналів, що перетворює зображення у відповідну йому послідовність електричних імпульсів.

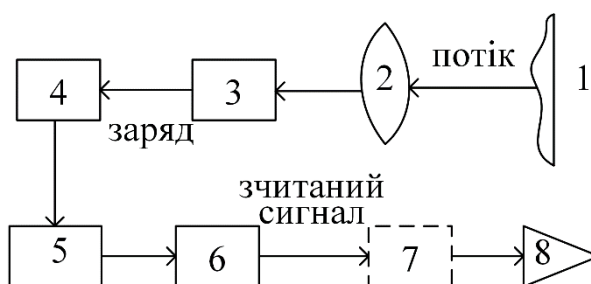


Рис. 4.25. Структурна схема телевізійної передавальної системи: 1 – об'єкт; 2 – лінза; 3 – формувач сигналів зображень; 4 – підсилювач; 5 – блок зберігання сигналу; 6 – блок зчитування сигналу; 7 – пристрій для формування відеосигналу; 8 – відеопідсилювач

ПЗЗ-елементи в пристрої формування сигналів зображень працюють в трьох режимах: сприйняття (інтегрування) зображення, тобто перетворення світлового потоку в зарядові пакети; зберігання зарядових пакетів і передача (сканування) зарядових пакетів на вихід пристрою. У режимі сприйняття зображень світловий потік від об'єкта падає на поверхню ФСЗ і викликає генерацію електронно-діркових

пар в напівпровідниковій підкладці. В ділянках кристала, що відповідають потенціальним ямам ПЗЗ, носії розподіляються і, як результат, в ФСЗ накопичується «картина» зарядових пакетів, відповідна образу, що сприймається.

До основних фотоприймальних характеристик ФСЗ відносять: світлочутливість, порогову світлочутливість, область спектральної чутливості, роздільну здатність, час інтегрування, частотно-контрастну характеристику, шум, динамічний діапазон.

Частина цих характеристик, а саме світлочутливість, область спектральної чутливості, час інтегрування, відноситься до одного ПЗЗ-елементу. Інші характеристики залежать від кількості передач зарядових пакетів, від шумів, від виду вихідних пристроїв, тобто від способу організації роботи ФСЗ.

Роздільна здатність R формувача визначається максимальною кількістю ліній, які сприймаються ФСЗ без їх злиття в одне ціле. Очевидно, що в ПЗЗ максимальна роздільна здатність визначається довжиною одного світлочутливого елемента.

Мінімальним значенням елемента $L=3$ мкм і $r=3$ мкм відповідає роздільна здатність $R_{\max} \approx 50$ ліній/мм. Під роздільною здатністю іноді також розуміють загальну кількість елементів зображення, які сприймаються ФСЗ в цілому, наприклад, 500×500 елементів.

Широке застосування отримали два різновиди ФСЗ на ПЗЗ: рядкові (лінійні), що сприймають за один період інтегрування лінію зображення, і матричні (площинні), які весь образ записує відразу. Обидва типи пристроїв мають два режими роботи: сприйняття світлового потоку зображення та послідовна передача зарядових пакетів до виходу.

Існують два підходи в режимах сприйняття і сканування: часове або просторове. При розмежуванні в часі обидва режими ФСЗ (сприйняття і сканування) виконуються з використанням одних і тих самих ПЗЗ-елементів шляхом ускладнення схеми управління. Під час сприйняття світлового потоку на відповідних ПЗЗ (в трьохтактній схемі на кожному третьому електроді) встановлюються потенціали зберігання, що забезпечують накопичення фотогенерованих носіїв. На усіх інших електродах підтримуються нульові потенціали. Після сприйняття оптичної інформації на електроди подається послідовність тактових імпульсів, що забезпечує переміщення зарядових пакетів інформації до виходу пристрою.

При розмежуванні обох функцій в просторі формувач повинен містити дві області: світлочутливу область, яка сприймає світловий потік та перетворює його в картину розподілу зарядів, та захищену від світла область зберігання, до якої після інтегрування передається вся картина розподілу зарядів. У наступному режимі сканування інформація з цієї області передається на вихід.

У першому підході всі елементи використовуються в якості світлочутливих ділянок. Використання всієї площі кристала дозволяє отримати максимальну роздільну здатність. Недоліком цього підходу є складність схем управління, зменшення інтервалу часу, відведеного на інтегрування зображення та вплив засвічення, оскільки за час кадру інформація повинна бути не тільки сприйнята, але і передана до виходу.

У другому підході для отримання тієї ж роздільної здатності потрібно подвійну кількість елементів. Відповідно повинна бути збільшена площа кристалу. До переваг такого підходу, окрім збільшення тривалості інтегрування (вся тривалість кадру), відноситься ще й те, що сканування здійснюється в області, захищеній від світла, з незначним спотворенням інформації. Обидва підходи – часове і просторове розділення знайшли досить значне поширення.

Телевізійні передавальні камери в основному створюють на основі матричних ФСЗ. Використовуються чотири основних способи організації матричних формувачів сигналів зображень на ПЗЗ: кадрова, рядкова, рядково-кадрова і адресна. Ці підходи відрізняються способом зчитування картини зарядових пакетів.

Розглянемо ФСЗ з кадровою організацією, яка складається з трьох секцій (рис. 4.26): фотоприймальної (оптичної), що представляє собою матрицю ПЗЗ необхідного формату; секції зберігання того ж формату, в якій зберігається картина зарядів; секції зчитування, що складається з реєстра зчитування (РЗ) на ПЗЗ і вихідного елемента, що зчитує і перетворює зарядові пакети в відеосигнали.

Картина зарядів, що накопичені в фотоприймальній секції, після закінчення кадру за допомогою відповідної послідовності тактових імпульсів швидко зсувається в секцію зберігання. Таким чином, після сприйняття зображення весь кадр зсувається в секцію зберігання і фотоприймальна секція готова до прийому наступного кадру. Напротязі часу формування наступного кадру, інформація з секції зберігання порядково (рядок за рядком) передається в вихідний РЗ, звідки поелементно передається на вихідний елемент зчитування. Тактова частота зсуву в вихідному реєстрі повинна бути в n разів (де n – кількість елементів в одному рядку) вище тактової частоти в секції зберігання для того, щоб до моменту надходження в реєстр наступного рядка забезпечити передачу на вихід всіх зарядових пакетів попереднього рядка.

Переваги кадрової організації процесу сканування наступні: висока якість зображення, що передається; можливість черезрядкової розгортки; топологічна простота та регулярність кристала.

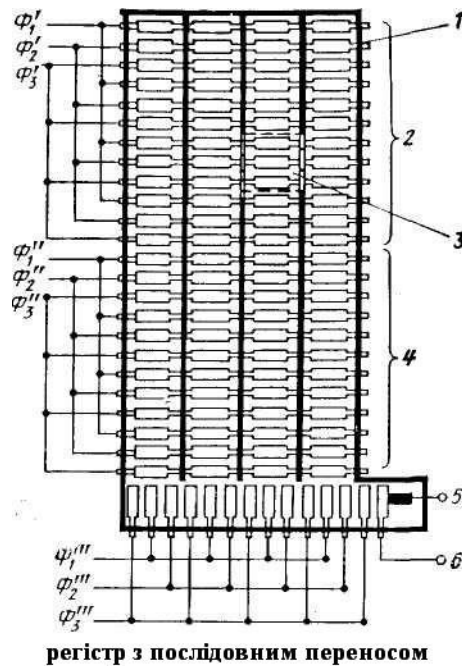


Рис. 4.26. ФСЗ з кадровою організацією роботи: 1 – дифузійна область, що обмежує канал; 2 – оптична секція; 3 – елемент зображення; 4 – секція зберігання; 5 – вихід відеосигналу; 6 – вихідний затвор

Висока якість відеосигналу досягається завдяки тому, що після сприйняття зображення картина зарядів швидко зсувається в захищену від світла секцію зберігання і тому не відбувається додаткового засвічення при скануванні, що викликає спотворення відеосигналу.

Черезрядкова розгортка є прогресивним методом зчитування інформації, що дозволяє вдвічі зменшити частоту проходження відеосигналів при збереженні тієї ж якості зображення.

Третя перевага ФСЗ з кадровою організацією заключається в топологічній простоті кремнієвого кристала. Всі три секції ФСЗ мають регулярну структуру. Електроди створюються у вигляді поперечних смуг металізації, які перетинають весь кристал. Дялінки зберігання зарядів відокремлюються одна від одної поздовжніми дифузійними смугами. Секція зберігання і вихідний РЗ за допомогою додаткової металізації захищені від світла.

Кадрова організація ФСЗ має і певні недоліки. За рахунок додаткової секції зберігання, що містить таку ж кількість елементів, що і світлочутлива секція, загальна кількість елементів збільшується вдвічі. Іншим недоліком даної структури є сильний вплив дефектів ПЗЗ на якість зображення. Якщо в світлочутливій секції (а особливо в секції зберігання) непрацюючий тільки один ПЗЗ-елемент, то на виході буде втрачена інформація від всього стовпчика, так як при скануванні через несправний елемент не зможуть бути передані зарядові пакети усіх елементів стовпця, розташованих вище даного.

Проте, кадрова організація ФСЗ на ПЗЗ набула широкого застосування, та покладена в основу пристроїв з найбільшою роздільною здатністю.

4.4.3. Формування ПЗЗ матрицею кольорового зображення

Описаний вище принцип роботи телевізійних камер передбачає формування чорно-білого зображення. Розглянемо побудову кольорової передавальної телевізійної камери на основі ФСЗ на ПЗЗ. Існує два способи формування кольорового сигналу:

1. Використання одноматричної камери.
2. Використання системи з трьох ПЗЗ матриць з колірнороздільною головкою для отримання RGB компонент кольорового сигналу.

Розглянемо принцип роботи першого способу формування кольорового зображення. Враховуючи, що ПЗЗ матриця має досить широку спектральну характеристику, вона не може визначити колір фотона, що потрапив на поверхню. З метою отримання кольорового зображення перед кожним елементом матриці встановлюється світлофільтр. Для того щоб кожному пікселю відповідав певний колір, над ним розміщується фільтр відповідного кольору, де інші кольори поглинаються цим фільтром. Найбільш поширеною системою розташування масивів кольорових фільтрів є колірна модель Байєра [31]. Ця технологія була винайдена в 70-х компанією Kodak. У цій системі фільтри розташовані в шаховому порядку, кількість зелених фільтрів у два рази більше ніж червоних або синіх. Червоні і сині фільтри розташовані між зеленими.

Таке кількісне співвідношення пояснюється будовою людського ока, яке більш чутливе до зеленого кольору. Шаховий порядок забезпечує однакові за кольором зображення незалежно від того, як розташована камера (вертикально чи горизонтально). При читанні інформації з такого ФСЗ, кольори записуються послідовно по рядках. Перший рядок повинен бути BGBGBG, наступний – GRGRGR і т. д. Така технологія називається послідовною RGB системою [31].

У ПЗЗ камерах поєднання всіх трьох сигналів воєдино відбувається не в ФСЗ, а в пристрої формування відеозображення після того, як сигнал перетворений з аналогового вигляду в цифровий.

Принцип роботи другого способу формування кольорового зображення полягає у наступному. В цьому випадку використовуються три кристала ФСЗ і стандартний колірнороздільний блок, в якому світловий потік зображення розщеплюється на три кольори, що надходять на відповідні кристали ФСЗ. У ФСЗ ці світлові потоки перетворюються в відеосигнали. Завдяки фіксованій конфігурації матриць і тактованого самосканування досягається висока точність

суміщення розгорнутих зображень. Таким чином, унеможливується поява «кольорової бахроми» на відтворюваному зображенні, яка властива кольоровим телевізійним камерам з трьома трубками.

Цей варіант забезпечує найкращу якість зображення та тільки він може бути використаний в вимірювальних системах. До суттєвих недоліків таких камер відноситься їх висока вартість.

4.4.4. ПЗЗ в системах формування інфрачервоних зображень

Існують три області застосування ПЗЗ в системах формування ІЧ-зображень: ущільнення інформації, що знімається з ІЧ-приймача; організація тимчасової затримки та інтегрування інформації; безпосередня реєстрація ІЧ-сигналів за допомогою ПЗЗ, які сформовані на напівпровідниках з вузькою забороненою зоною.

В процесі застосування ПЗЗ з метою ущільнення інформації входи матриці ПЗЗ через ємнісні зв'язки з'єднуються з виходами приймачів ІЧ-випромінювання (рис. 4.27). У кожному ПЗЗ-елементі утворюється зарядовий пакет, пропорційний вихідній напрузі відповідного приймача. Потім картина зарядів сканується і передається на вихід.

В процесі використання ПЗЗ для формування тимчасової затримки і інтегрування сигналів – кожен ПЗЗ-елемент з'єднується з відповідним ІЧ-приймачем. ІЧ-зображення переміщається відносно матриці приймачів з певною швидкістю, при цьому кожен елемент зображення послідовно проходить всі приймачі відповідного стовпця матриці. Перенесення зарядових пакетів вздовж ланцюжка ПЗЗ-елементів здійснюється з такою ж швидкістю. В результаті час інтегрування зображення збільшується в k разів, де k – кількість елементів в стовпці, яка дорівнює кількості рядків в матриці ІЧ-приймачів.

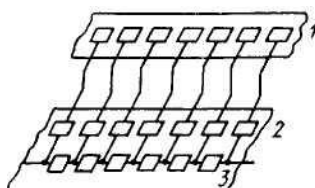


Рис. 4.27. Використання ПЗЗ для ущільнення та передачі інформації, що знімається з ІЧ-приймачів: 1 – лінійка ІЧ-приймачів; 2 – буферні елементи; 3 – ПЗЗ

У варіанті застосування ПЗЗ з метою реєстрації і формування сигналів ІЧ-зображень організація матриці така ж, як в світлочутливих ПЗЗ. Проте існують певні проблеми в застосуванні ІЧ ПЗЗ. Для сприйняття ІЧ-випромінювання необхідні вузькозонні напівпровідники, ширина забороненої зони яких (що визначає положення максимуму поглинання) відповідає вікнам атмосферної прозорості

для ІЧ-випромінювання: 2–2,5; 3,5–4,2; 8–14 мкм. Відповідні матеріали є серед бінарних і потрійних сполук, наприклад InAs, InSb та т. д. Інша проблема пов'язана з високим рівнем фонового випромінювання в ІЧ-області спектра і низькою контрастністю ІЧ-зображень. Це призводить до накопичення в потенціальних ямах ПЗЗ великого паразитного заряду. Низька контрастність накладає жорсткі вимоги на допустиму величину нерівномірності fotocутливості (від елемента до елемента), яка не повинна перевищувати декількох відсотків. Таке обмеження обумовлює жорсткі вимоги до технології, особливо до фотолітографії.

Формувачі ІЧ-сигналів на основі ПЗЗ за їх конструктивними та технологічними характеристиками бувають монолітні та гібридні. Монолітні формувачі містять ІЧ ПЗЗ, в основі яких вузькозонні напівпровідники або леговані широкозонні напівпровідники, що є чутливими до ІЧ-випромінювання, та прилади, що містять на одному кристалі чутливу до ІЧ-випромінювання матрицю на елементах з бар'єром Шоттки (з внутрішньої фотоемісії) і схему зчитування на ПЗЗ.

Гібридні формувачі являють собою комбінацію ІЧ-приймачів різних типів і кремнієвої ПЗЗ матриці, що використовується для передачі інформації та її обробки: підсилення, сумування та обчислення кореляційних функцій. Розрізняють гібридні формувачі з прямою інжекцією та з непрямою інжекцією. У випадку прямої інжекції заряди що фотогенеруються в ІЧ-приймачі, напряду вводяться в ПЗЗ. В умовах непрямої інжекції, між ІЧ-приймачем та ПЗЗ застосовують проміжні елементи (МДН-транзистори або каскади підсилення). В якості ІЧ-приймачів, як правило, використовують фоторезистивні, фотоелектричні або піроелектричні приймачі.

4.4.5. CMOS технологія

Останнім часом все більше популярності набирають мікросхеми з використанням технології CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник (КМОП). Проте, повністю замінити ПЗЗ технології CMOS не в змозі через їх меншу чутливість до прийнятого світла.

Перевагою схеми з використанням технології CMOS є споживання значно меншої енергії в статичних режимах. В таких схемах енергія споживається тільки при перемиканні стану транзисторів. Завдяки цьому такі схеми відрізняються більш високою швидкістю і меншим споживанням енергії, але ускладнюється технологічний процес виготовлення.

Значна кількість сучасних логічних мікросхем та процесорів виконана з використанням схемотехніки CMOS. Технології CMOS знайшли своє застосування також в матрицях фото- та відеокамер.

Принцип роботи CMOS матриць ґрунтується на перетворення заряду в напругу пікселів. Таке рішення підвищує швидкість фотоапарата в процесі зчитування інформації з матриці та дозволяє виконати інтеграцію матриці CMOS з аналого-цифровим перетворювачем або напряму з процесором. В результаті такого конструктивного рішення стають можливими економія споживання енергії за рахунок зменшення ланцюжка дій, та зниження вартості приладу.

До недоліків матриць CMOS можна віднести: низький коефіцієнт заповнення пікселів та низька чутливість; високий рівень шуму, для зміни чого необхідно ускладнювати конструкцію, що впливає на вартість; відносно невисокий динамічний діапазон.

Особливості технологій CMOS та ПЗЗ

Серед особливостей CMOS технології можна виділити наступні: кожен піксель матриці має свій перетворювач заряду в напругу; матриця містить схеми оцифровки, на виході отримуємо цифровий сигнал. В результаті застосування такої технології також присутні деякі недоліки: низька якість зображення через спотворення від перетворювачів в кожному пікселі. При цьому вартість виготовлення матриці за технологією CMOS в декілька разів нижче за ПЗЗ. Загальний вид сучасної ПЗЗ матриці показано рис. 4.28.

Серед особливостей ПЗЗ можна виділити наступні: заряд кожного пікселя проходить через єдиний вихідний вузол, де він перетвориться в напругу, після чого надходить на вихід у вигляді аналогового сигналу.

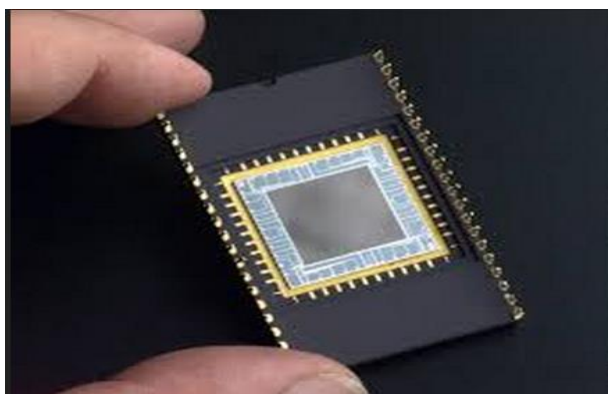


Рис. 4.28. Мікросхема ПЗЗ матриці

Завдяки своїм якостям ПЗЗ технологія має: низький рівень шуму, гарне заповнення пікселів, високу ефективність, високу чутливість. На сьогодні ПЗЗ є

більш привабливою для застосування в цифрових камерах, незважаючи на такі недоліки, як складність системи зчитування сигналу, високу енергозатратність, дороге виробництво.

4.5. Тепловізори третього покоління

Нове покоління тепловізорів ґрунтується на застосуванні фокально-площинних двовимірних багатоелементних матриць фотоприймачів (FPA – Focal Plane Array) без використання оптико-механічних систем розгортки зображення. Основними перевагами цих приладів є: відсутність оптико-механічної розгортки зображення і відповідно малі маса, габарити і енергоспоживання, безшумна робота, високі співвідношення сигнал/шум і якість зображення, широкий динамічний діапазон, можливість зв'язку з сучасними комп'ютерами, відео- і ТВ-апаратурою, цифрова обробка зображення в реальному часі. Загальна структурна схема тепловізійного приладу третього покоління приведена на рис. 4.29.

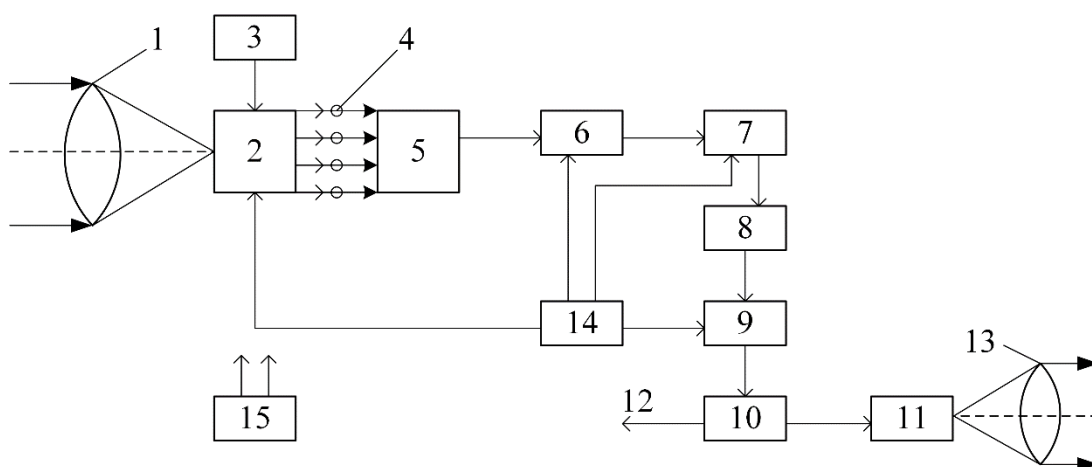


Рис. 4.29. Структурна схема тепловізора третього покоління

До складу приладу на рис. 4.29 входять: 1 – ІЧ-об'єктив, 2 – матриця ІЧ-фотоприймачів, 3 – блок охолодження або термостабілізації матриці, 4 – попередні підсилювачі, 5 – мультиплексор, 6 – аналоговий коректор неоднорідності сигналів, 7 – аналого-цифровий перетворювач, 8 – цифровий коректор неоднорідності сигналів, 9 – коректор непрацюючих елементарних фотоприймачів матриці, 10 – блок формування зображення з мікропроцесорною обробкою відеосигналу, 11 – цифровий вихід для підключення до персонального комп'ютера, 12 – монітор, 13 – окулярна система, 14 – тактовий генератор, 15 – первинне джерело живлення (акумуляторна батарея).

Елементи 3 та 13 відносяться до необов'язкових, їх необхідність залежить від типу приладу. Неоднорідності сигналів елементарних фотоприймачів матриці попередньо коригуються в аналоговій формі, перетворюються в цифрову і

коригуються з використанням даних, отриманих в процесі калібрування. Далі сигнали виправляються (можливо віднімання непрацюючих елементів матриці з їх заповненням) і передаються до блоку формування зображення 10. На його виході інформація представляється або в якості відеосигналу, що направляється до монітору, або в цифровій формі для передачі до персонального комп'ютера. Для глибокого (криогенного) охолодження матриці ($T = 75 - 80$ К) використовується газова холодильна машина, що працює по замкненому циклу Спліт-Стірлінга. Для неглибокого охолодження ($T = 150 - 250$ К) або термостабілізації роботи неохолоджуваної матриці використовується система термоелектричного охолодження [32].

Третє покоління інфрачервоних систем забезпечує використання великої кількості пікселів, високу частоту кадрів, кращу теплова роздільна здатність, багатокольорову функціональність та передбачає вбудовану обробку сигналів для кольорових і некольорових матриць.

В сучасних системах широке застосування знайшли три типи детекторів:

- теллуридкадмія та ртуті (МСТ – mercury-cadmium-telluride) відомий також під аббревіатурою HgCdTe;
- інфрачервоний фотодетектор на квантових ямах – Quantum-Well Infrared Photodetector (QWIP);
- надрешітки з напруженими шарами типу-II (SLS – Strained Layer Superlattice) на основі антимонідів.

На сьогодні теллуридкадмію ртуті є найпоширенішим напівпровідниковим матеріалом для інфрачервоних фотодетекторів. З огляду на властивості цього матеріалу його можливості та область застосування в подальшому будуть тільки розширюватися.

Технологія фотодетекторів на квантових ямах (QWIP-фотодетектора) знаходиться на стадії розвитку. QWIP являє собою ІЧ-фотоприймач, що використовує електронні міжпідзонні переходи в квантових ямах з метою поглинання фотонів. QWIP є однією з найпростіших структур квантово-механічних пристроїв, які можуть фіксувати ІЧ-випромінювання середньої довжини хвилі та довгохвильового випромінювання. На відміну від більшості ІЧ-фотоприймачів, QWIP не залежить від забороненої зони матеріалу детектування, оскільки він ґрунтується на оптичному переході в межах однієї енергетичної зони. Основними елементами QWIP є квантові ями, які розділені бар'єрами.

Квантова яма – тонкий плоский шар напівпровідникового матеріалу (зазвичай товщиною 1–10 нм), всередині якого потенційна енергія електрона нижче, ніж за його межами, таким чином, рух електрона обмежено в одному

вимірі. Іншими словами, квантова яма – це потенціальна яма, яка обмежує рухливість частинок з трьох до двох вимірів, тим самим змушуючи їх рухатися в плоскому шарі. QWIP, як правило, виготовлені з арсеніду галію.

Також в даний час збільшується інтерес до дослідження наногетероструктур на основі надрешіток з напруженими шарами (Strained Layer Superlattice – SLS). Подібні надрешітки широко застосовуються в процесі виготовленні фотоприймачів для середнього ІЧ-діапазону спектра. Застосування цих матеріалів дозволяє порівняно просто, тільки шляхом зміни товщини шарів, змінювати ширину забороненої зони, а отже і довгохвильовий діапазон чутливості фотоприймачів.

Найпоширенішою технологією неохолоджуваних детекторів сьогодні є мікроболометрична матриця на основі оксиду ванадію (VOx). Таких матриць виробляється більше, ніж всіх інших ІЧ-матриць разом узятих і, як очікується, ця тенденція в найближчому майбутньому буде тільки посилюватися, але неохолоджувані мікроболометричні і піроелектричні ІЧ-матриці не мають поки досить високої чутливості.

Найбільш поширені матричні ІЧ-камери мають чутливість близько 0,02 °С і просторову роздільну здатність 0,03...0,05 мм. Одні з кращих зразків уже досягли просторової роздільної здатності 640×512 пікселів при розмірі пікселя до 20×20 мкм і з часовою роздільною здатністю 8000–10000 кадрів за секунду. Найближчим часом очікується поява на ринку камер четвертого покоління з матрицею більше ніж 960×1280 пікселів і амплітудною роздільною здатністю до 0,001 °С.

Запитання для перевірки

1. Дайте визначення основним характеристикам тепловізорів.
2. Які оптичні системи існують? Поясніть їх функції.
3. Поясніть процес формування зображення плоскою лінзою.
4. Числова апертура – від чого залежить та на які характеристики об'єктиву впливає?
5. Назвіть основні характеристики об'єтивів.
6. Поясніть який вплив мають аберації на якість зображення ОС.
7. Які види конструкцій дзеркальних об'єтивів ви знаєте?
8. Поясніть принцип сканування з використанням коливального плоского дзеркала.
9. Поясніть принцип роботи системи сканування з багатоелементним приймачем випромінювання.
10. Опишіть принцип дії тепловізора «Радуга» та приведіть основні його характеристики. Які складові оптичної схеми тепловізора «Радуга» та їх функції?

11. Які особливості мають приймачі випромінювання, що використовуються в тепловізорі «Радуга»?
12. Поясніть процес сканування, що реалізовує тепловізор «ТВ-03».
13. Які особливості мають ПВ, що використовуються в тепловізорі «ТВ-03»?
14. Які типи лінз використовуються в тепловізорі «ТВ-03» і навіщо?
15. Які елементи входять до функціональної схеми тепловізора «Янтар»? Поясніть їх функції.
16. Поясніть процес сканування, що реалізовує тепловізор «Янтар». Які особливості мають ПВ, що використовуються в тепловізорі «Янтар»?
17. Приведіть конструкцію відікону та поясніть принцип дії.
18. Поясніть принцип формування розгортки в телевізійних передавальних трубках.
19. Наведіть переваги та недоліки відіконів.
20. Наведіть складові структурної схеми тепловізора з електронним скануванням та їх функції.
21. Приведіть елементи структури ПЗЗ.
22. Поясніть фізичні основи роботи ПЗЗ.
23. Поясніть принцип роботи трьохтактного зсувного регістру на ПЗЗ.
24. Яка функція формувачів сигналів зображень на ПЗЗ – елементах? Які режими роботи їм характерні (режими сприйняття і сканування: часове і просторове)?
25. Які існують способи організації матричних формувачів сигналів зображень на ПЗЗ? Кадрова організація, недоліки та переваги.
26. Які існують способи формування кольорового сигналу в матричних камерах на ПЗЗ? Наведіть їх недоліки та переваги.
27. Приведіть області застосування ПЗЗ в системах формування сигналів інфрачервоних зображень.
28. Поясніть принцип роботи матриць, побудованих за технологією CMOS: принцип дії, порівняння технологій CMOS і ПЗЗ.
29. Наведіть структурні елементи схеми тепловізора третього покоління. Поясніть принцип дії сучасного тепловізора.
30. Які технології побудови детекторів ІЧ-випромінювання ви знаєте?

5. ТЕПЛОВІ ДЕФЕКТОСКОПИ

Тепловий дефектоскоп (ТД) – це прилад, призначений для виявлення дефектів типу порушення суцільності та для виявлення вологи, наприклад, в стільникових структурах. Узагальнену блок-схему теплового дефектоскопу приведено на рис. 5.1.

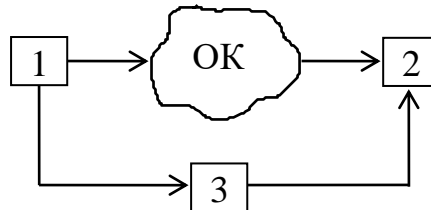


Рис. 5.1. Узагальнена блок-схема теплового дефектоскопу: 1 – джерело теплового збудження; 2 – пристрій, що реєструє; 3 – пристрій сканування і управління

ТД суттєво відрізняється від тепловізора. До складу ТД входить не лише пристрій реєстрації (його роль може виконувати тепловізор або радіометр), а й інші вузли. Окрім конструкції, ТД відрізняється від тепловізора і своїм призначенням.

Для тепловізора основним параметром є чутливість, в той час як для ТД головним параметром є параметри порогового дефекту (рис. 5.2) – глибина залягання h , ширина або площа S , розкриття дефекту δ .

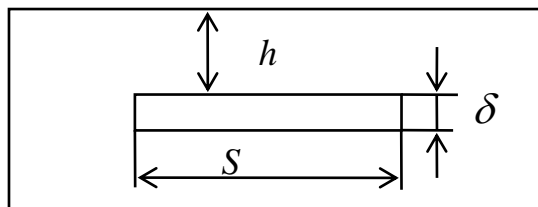


Рис. 5.2. Основні параметри дефекту

Іншим важливим параметром для ТД є достовірність контролю або ймовірність знаходження фіктивного дефекту. Істотна відмінність ТД від тепловізора і в тому, що в поняття еталонного об'єкта вкладається інший зміст. Для тепловізора це джерело еталонного випромінювання у вигляді АЧТ. Для дефектоскопа використовують еталонний об'єкт контролю, тобто об'єкт без дефектів в ньому. Основні елементи структури теплових дефектоскопів зведені до табл. 5.1.

Серед основних технічних параметрів ТД виділяють наступні:

- лінійна роздільна здатність по ОК;
- рівень власних шумів ТД або гранична температурна роздільна здатність;
- діапазон реєстрації температури та динамічний діапазон системи реєстрації;

- продуктивність контролю;
- розміри мінімального дефекту.

Таблиця 5.1. Основні структури теплових дефектоскопів

Складова частина	Тип ТД			
	1	2	3	4
джерело теплового збудження	точковий	смуговий	площинний	Спеціальні пристрої
пристрій реєстрації	радіометр без сканування	радіометр, що сканує по одній координаті	тепловізор	
система сканування	механічна по обох координатах	комбінована	може бути відсутньою	

5.1. Джерела теплового збудження

Джерело теплового збудження (ДТЗ) є частиною теплового дефектоскопа, що призначена для нагріву ОК або його ділянки з метою формування на поверхні температурного поля, яке містить інформацію про наявність внутрішніх дефектів.

ДТЗ (нагрівачі) застосовуються в процесі активного теплового контролю з метою виявлення дефектів типу порушення суцільності, зміна структури і фізико-механічних властивостей ОК.

Передача теплової енергії від джерела нагрівання до ОК здійснюється трьома відомими методами – теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

До основних параметрів ДТЗ відносяться: густина теплового потоку, спектральний розподіл енергії, робоча температура, потужність, що підводиться до джерела, напруга живлення, діаграма спрямованості.

Залежно від характеру взаємодії фізичних полів з ОК, ДТЗ бувають наступних видів: ІЧ-випромінювач, вихрова труба, індукційний нагрівач, лазерний нагрівач, електронно-променевий нагрівач, плазмотрон.

ІЧ-випромінювачі поділяються на світлі та темні. Світлі створюють одночасно ІЧ- та видиме випромінювання. Темні – випромінюють тільки ІЧ-випромінювання.

Світлі передбачають фокусування випромінювання відбивачами, та необхідність їх охолодження в умовах безперервної роботи. В якості таких нагрівачів часто використовують кварцеві галогенні лампи (рис. 5.3).

Кварцева галогенна лампа – це колба, виконана з кварцевого скла, яка заповнена галогеном (парами йоду або броду). Це дозволяє підняти робочу

температуру вольфрамової спіралі до 3200 К. Звичайна лампа розжарювання має температуру розжарення нитки 2900 К.

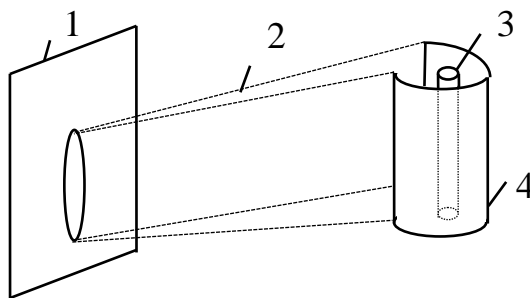


Рис. 5.3. Схема нагріву ОК інфрачервоним випромінювачем: 1 – ОК, 2 – траєкторія випромінювання, 3 – галогенна лампа, 4 – відбивач випромінювання

Основні параметри ІЧ-випромінювачів: густина теплового потоку до 400 кВт/м^2 ; спектральний діапазон (0,7 – 0,8) мкм; потужність, що підводиться (500 – 4500) Вт; напруга живлення (220, 380) В.

Вихрова труба – це ДТЗ, яке складається з труби, на поверхню якої намотана спіраль нагрівача (рис. 5.4). Всередину нагрітої труби нагнітається повітря, яке проходить через неї, нагрівається до певної температури і видувається на ОК. Таким чином, на поверхні ОК з'являється ділянка, температура якої буде вище основної температури ОК.

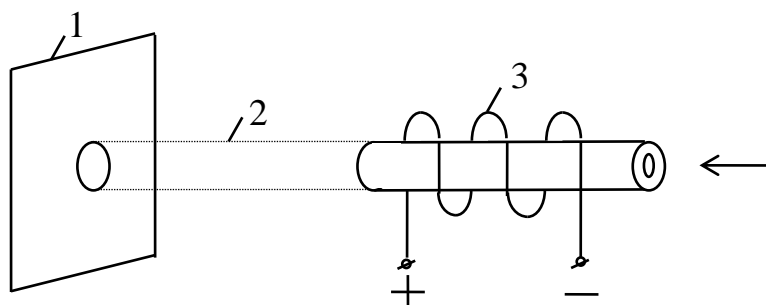


Рис. 5.4. Схема нагріву ОК за допомогою вихрової труби: 1 – ОК, 2 – теплоносій (газ або повітря), 3 – нагрівач

Густина теплового потоку, що створюється за допомогою використання вихрової труби, може сягати 150 Вт/м^2 .

Індукційний нагрівач виконує нагрів об'єкту електромагнітним полем високої частоти. Схему нагріву ОК за допомогою індукційного нагрівача показано на рис. 5.5.

Основною перевагою індукційного нагрівача в порівнянні з ІЧ-нагрівачем є високий коефіцієнт корисної дії (ККД) введення потужності. У разі нагрівання об'єкта з полірованою металевою поверхнею, ККД інфрачервоних випромінювачів невеликий та складає декілька відсотків. В той же час, індукційний нагрів не залежить від відбивної здатності поверхні і в ряді випадків можна досягти необхідної температури нагріву з меншими витратами енергії.

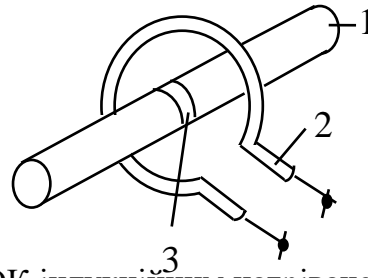


Рис. 5.5. Схема нагріву ОК індукційним нагрівачем: 1 – ОК, 2 – індукційний нагрівач, 3 – зона нагріву

Крім того, додатковою перевагою цього типу нагрівачів є можливість виявити тріщини, що є перпендикулярними до контрольованої поверхні ОК (рис. 5.6).



Рис. 5.6. Температура на поверхні ОК в процесі нагрівання: а) ГЧ-випромінювачем, б) індукційним нагрівачем

Лазерний нагрівач є єдиним джерелом, що дає монохроматичні та когерентні коливання. Промінь такого нагрівача здатний на невеликій ділянці створити високу концентрацію енергії, що дає змогу виконати нагрів невеликих ділянок ОК до високих температур.

Основним елементом **електронно-променевого нагрівача** є електронна гармата, яка розташована у вакуумній камері (рис. 5.7). Нагрівання відбувається за допомогою сфокусованого пучка електронів, який видувається на поверхню ОК.

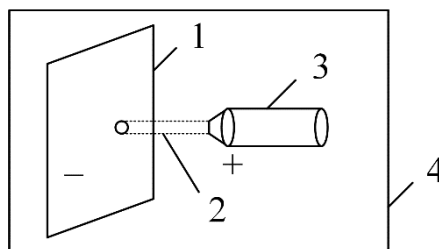


Рис. 5.7. Схема нагріву електронно-променевим нагрівачем: 1 – ОК, 2 – пучок електронів, 3 – електронна гармата, 4 – вакуумна камера

Електронно-променевий нагрівач має наступні переваги:

- 1) можливість забезпечення локального нагріву до високих температур;
- 2) нагрів ОК відбувається з високою просторовою й часовою точністю.

До недоліків слід віднести необхідність створення вакууму, що іноді може ускладнювати процес проведення контролю.

Робота **плазмотронного нагрівача** (плазмотрона) ґрунтується на використанні електричного пробоя між двома електродами – катодом і анодом, що призводить до іонізації газу, (наприклад аргону) та утворення плазми, яка видувається з камери через сопло і направляється на ОК. Плазмотрон дає змогу максимально зосередити енергію в зоні нагріву, забезпечує велику потужність і за мінімальним діаметром зони нагріву (до 5 мм) поступається лише лазеру.

Для створення стаціонарних полів в ОК використовують нагрівання електричним струмом, шляхом пропускання його через об'єкт. Однак, такий метод можна застосовувати тільки для електропровідних об'єктів.

У польових умовах може бути використана сонячна енергія. Наприклад, в процесі контролю доріг або будівельних споруд та об'єктів.

У практиці ТНК частіше зустрічаються нагрівачі на основі джерел променевої енергії. Це ІЧ-лампи та лазери. Решта нагрівачів використовуються рідко.

Використовуючи зазначені джерела нагріву необхідно враховувати, що ефективність променистого нагріву істотно залежить від узгодження спектру випромінювання зі спектральною характеристикою поглинання ОК. Якщо вони будуть різні, то ККД нагрівача буде дуже низьким.

Джерела променевої енергії мають такі основні оптико-фізичні характеристики:

1. Спектральні характеристики – характер спектра (суцільний, лінійчатий), діапазон довжин хвиль.
2. Амплітудні характеристики – яскравість, сила світла, променистий потік.
3. Просторові характеристики – розподіл сили світла або променистого потоку в просторі.
4. Часові характеристики – безперервне або імпульсне випромінювання.

Для формування і управління цими характеристиками застосовують спеціальні засоби, наприклад світлофільтри різного типу, монохроматори, атенюатори для ослаблення випромінювання, які засновані на ефектах поглинання, відбивання, розсіювання, оптичні системи для фокусування, поляризатори для виділення випромінювання заданої поляризації, модуляторі різних видів.

Узагальнена структурна схема нагрівача на основі оптичного випромінювача показана на рис. 5.8.

Випромінювання джерела 2 проходить блоки спектральної фільтрації 3, поляризатор 4, атенюатор 5, модулятор 6 і оптичною системою фокусується на

об'єкт контролю. Випромінювання контролюється блоком 8, а блок 9 служить для управління схемою. У реальних приладах деякі блоки можуть бути відсутні.

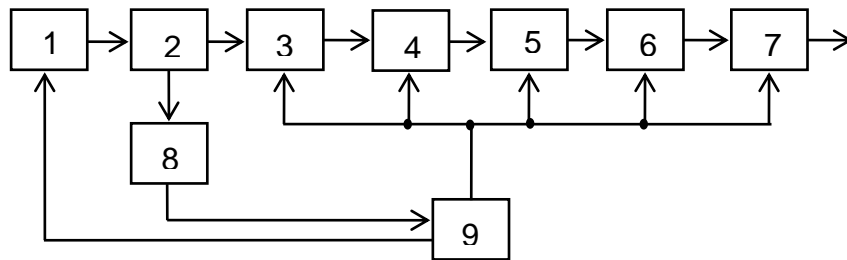


Рис. 5.8. Структурна схема нагрівача на основі оптичного випромінювача: 1 – блок живлення, 2 – джерело випромінювання, 3 – фільтр, 4 – поляризатор, 5 – атенюатор, 6 – модулятор, 7 – оптична система з функцією фокусування, 8 – блок контролю випромінювання, 9 – мікропроцесор

5.2. Теплометричний дефектоскоп

Основними складовими елементами теплового дефектоскопу є джерело теплового збудження та пристрій реєстрації. У якості ДТЗ у таких дефектоскопах широко використовують електричні випромінювачі трох типів: точкові, смугові та площинні. В якості пристрою реєстрації, як правило, використовують тепловізор або радіометр. Проте, існують конструкції, в яких ДТЗ та пристрій реєстрації суміщені в одному блоці. До таких конструкцій належить теплометричний дефектоскоп.

Теплометричний дефектоскоп відноситься до дефектоскопів контактного типу. Основним його елементом є тепловий зонд (рис. 5.9), який складається з теплометричного чутливого елемента 1, термометра опору 2 і електричного нагрівача 3. В якості чутливого елемента використовують малогабаритний батарейний перетворювач теплового потоку.

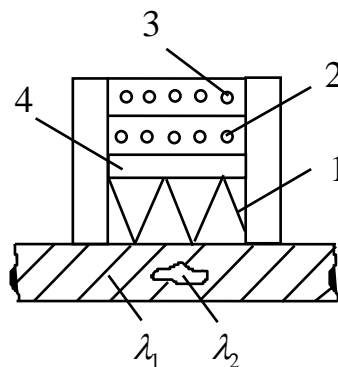


Рис. 5.9. Конструкція теплового зонду: 1 – чутливий елемент; 2 – термометр опору; 3 – нагрівач; 4 – роздільна стінка, λ_1 – коефіцієнт теплопровідності ОК; λ_2 – коефіцієнт теплопровідності дефекту

Як показано на рис. 5.9, теплометричний перетворювач та інші елементи розташовані по різні боки роздільної стінки 4. Принцип роботи дефектоскопа

ґрунтується на генерації електричного сигналу теплометричним перетворювачем в процесі проходження через нього теплового потоку від нагрівача.

Розглянемо принцип роботи теплового зонду з рис. 5.9 детальніше. Перед початком вимірювань тепловий зонд (ТЗ) перебуває в наступному тепловому стані: нагрівач нагріває ТЗ до температури $50 \div 60$ °С, тобто температура теплового зонда на $20 \div 30$ °С перевищує температуру навколишнього середовища. Термометр опору 2 управляє нагрівачем 3, який підтримує температуру постійною. Температура по обидва боки допоміжної стінки однакова. У цей момент перетворювач формує сигнал, рівний E_0 .

На початку контролю ТЗ контактує з поверхнею ОК, температура якого дорівнює температурі навколишнього середовища. В результаті контакту нагрітого ТЗ з більш холодним ОК температура поверхні перетворювача зменшується. У цей же час, температура по іншу сторону стінки підтримується постійною. Це призводить до того, що перепад температур на гранях перетворювача зростає, а отже з'являється тепловий потік, який пронизує перетворювач. Тепловий потік збільшується та викликає появу е.р.с. та відповідне її збільшення. З плином часу ОК нагрівається датчиком, різниця температур починає зменшуватися, відповідно тепловий потік теж зменшується та падає е.р.с. – система приходить в стан рівноваги. На рис. 5.10 показано залежність е.р.с. чутливого елемента від часу контролю для трьох випадків. Крива 1 (рис. 5.10) відповідає випадку, коли ОК має дефект у вигляд несучільності, теплопровідність якої менша за теплопровідність ОК. Це може бути металевий зразок з повітряною раковиною. У другому випадку (крива 2, рис. 5.10) зразок не має дефектів. Крива 3 (рис. 5.10) показує характер зміни е.р.с. у випадку коли теплопровідність ОК менша за теплопровідність дефекту. Як приклад, неметалевий зразок з металевим включенням або стільникова конструкція з водою у деяких комірках.

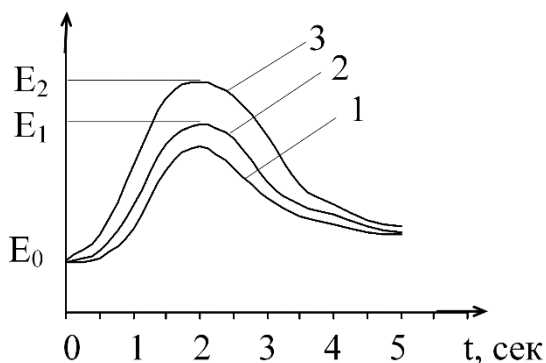


Рис. 5.10. Залежність електричного сигналу теплометричного перетворювача від часу в процесі контролю: 1 – випадок, коли дефект має меншу теплопровідність ніж ОК; 2 – ОК без дефекта, 3 – дефект має більшу теплопровідність ніж ОК

Функціональну схему, яка реалізує описаний вище принцип роботи теплометричного дефектоскопу показано на рис. 5.11. Схема має наступні позначення: 1 – ОК; 2 – тепловий зонд; 3 – електричний регулятор температури. Дефектоскоп містить два канали – інтегральний та диференціальний. До складу інтегрального каналу входять інтегратор 4 та атенюатор 5. Диференціальний канал має диференціатор 6 і амплітудний детектор 7. У схемі також присутні: детектор рівня 8, індикатор дефекту 9, вимірювач відношення 10 та тригер 11.

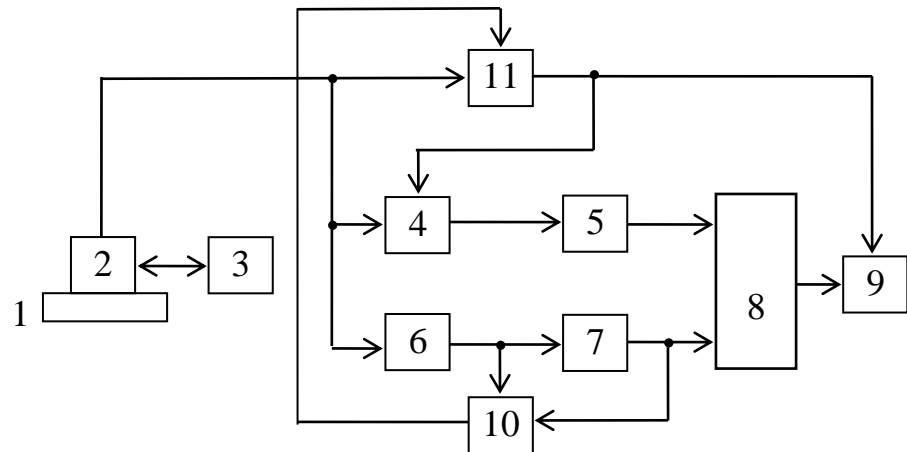


Рис. 5.11. Функціональна схема теплометричного дефектоскопу

Принцип дії дефектоскопа наступний. При контакті теплового зонда з поверхнею ОК на виході чутливого елемента виникає електричний сигнал. Ця напруга одночасно надходить на інтегратор 4, диференціатор 6 та тригер 11. Інтегратор обчислює певний інтеграл напруги, пропорційний тепловому потоку через тепловий зонд протягом часу контролю, тобто від моменту дотику, до моменту настання стаціонарного стану. Керуючий сигнал, що задає час інтегрування, формується тригером 11. Диференціатор 6 обчислює швидкість зміни напруги перетворювача теплового зонда. Напруга на виході диференціатора 6 пропорційна швидкості зміни теплового потоку через перетворювач теплового зонда. З виходу диференціатора сигнал надходить на амплітудний детектор 7. При цьому напруга на виході амплітудного детектора дорівнює максимальній швидкості зміни напруги на перетворювачі та характеризує максимальну швидкість проходження теплового потоку через тепловий зонд (тобто швидкість нагріву ОК).

Сигнали з блоків 6 та 7 надходять до вимірювача відношення 10. Для заданого відношення напруги пристрій 10 формує керуючий сигнал, що переводить тригер 11 в початковий стан. З тригера сигнал надходить на інтегратор 4 і, одночасно, на блок 9, дозволяючи індикацію. Вихідна напруга інтегратора пропорційна кількості тепла необхідного для нагрівання ділянки ОК до певної встановленої температури, тобто пропорційна величині об'ємної

теплоємності контрольованої ділянки. Ця напруга через калібрувальний атенюатор 5 надходить до детектора 8.

Таким чином, до блока 8 надходить дві напруги. Ділянка зразка з дефектом має меншу об'ємну теплоємність ніж бездефектна ділянка (через зменшення густини). Тому, напруга на вході детектора 8 в процесі контролю зразка з дефектом менша ніж в процесі контролю бездефектної ділянки на величину, що пропорційна різниці об'ємної теплоємності еталонного (бездефектного) і дефектного зразків. На другий вхід детектора 8 надходить напруга з амплітудного детектора 7, яка характеризує швидкість нагріву ОК і залежить від його теплового опору. Відомо, що зразок з дефектом має меншу теплову постійну часу ніж бездефектний зразок. Відповідно, напруга на другому вході блока 8 в процесі контролю зразка з дефектом, збільшується на величину, пропорційну різниці теплових постійних часу контрольованого зразка і еталонного зразка. Детектор 8 фіксує різницю вхідних напруг, що збільшує чутливість дефектоскопа. За умов такої схеми включення детектор 8 не реагує на синфазні зміни напруги, обумовлені похибками вимірювання. Далі сигнал з детектора надходить на блок 9, де відбувається індикація сигналу про наявність чи відсутність дефекту.

Запитання для перевірки

1. Які теплові дефектоскопи існують? Назвіть їх основні технічні параметри.
2. Опишіть переваги теплових дефектоскопів та сфери застосування.
3. Опишіть види та особливості джерел теплового збудження.
4. Приведіть складові елементи функціональної схеми теплометричного дефектоскопа
5. Поясніть принцип роботи теплометричного дефектоскопа
6. Що таке тепловий зонд? Яку конструкцію він має та принцип роботи?

6. ПРИКЛАДИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ ДЕФЕКТОСКОПІВ

Теплові дефектоскопи знайшли широке застосування у промисловості для пошуку дефектів у різноманітних матеріалах і виробках, та для контролю і керування технологічними процесами, що супроводжуються високими температурами.

6.1. Контроль якості теплоізоляції термоса

Гарним ілюстративним прикладом застосування теплового дефектоскопа з метою виявлення дефектів є контроль якості теплоізоляції термоса. На рис. 6.1 показано скляні колби термоса в перерізі. Одна з них є якісним виробом і не має дефектів, інша виготовлена з порушенням технології та має дефект у вигляді злипання внутрішньої та зовнішньої поверхонь.



Рис. 6.1. Переріз скляних колб термоса: без дефекту (а), з дефектом (б)

Наявність контакту зовнішньої та внутрішньої стінок вважається дефектом тому, що через це місце відбувається витік теплової енергії назовні. Прилад, що реалізує методу контролю теплоізоляції термосів, показано на рис. 6.2.

Дефектоскоп складається з двох каналів: перший канал забезпечує сканування бічної поверхні термоса, другий канал використовується для сканування днища термоса.

Сканування об'єкту здійснюється комбінованим способом, де механічне обертання термоса поєднується з оптико-механічною розгорткою радіометра по другій координаті. Таким чином ми отримуємо розгортку поверхні об'єкта по двох координатах. Сигнали з двох каналів складаються та переводяться в цифровий код та інтегруються по всій поверхні термоса. Отриманий результат виводиться на цифрове табло 12 та порівнюється з еталонним значенням. Різниця сигналів з пристрою порівняння 13 надходить на пристрій, де приймається рішення про брак.

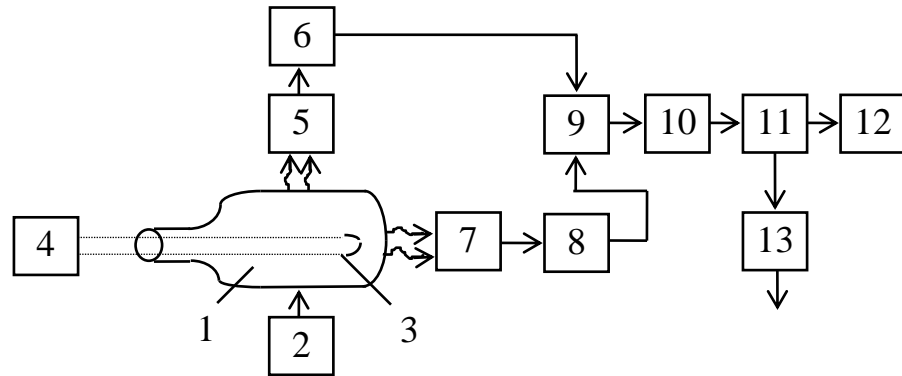


Рис. 6.2. Структурна схема дефектоскопу для контролю теплоізоляції термосів:
 1 – термос; 2 – пристрій механічного сканування (обертання термоса); 3 – джерело теплового випромінювання (нагрівач); 4 – блок живлення нагрівача; 5 та 7 – радіометри, що сканують поверхні; 6 та 8 – блоки підсилення і обробки сигналу; 9 – суматор; 10 – АЦП; 11 – інтегратор; 12 – цифровий індикатор; 13 – пристрій порівняння

Використання такого дефектоскоп дозволяє не тільки виявити наявність дефекту, але і дати якісну оцінку ОК.

6.2. Контроль гарячого прокату

Наступний приклад використання теплових дефектоскопів комбінує виявлення дефектів та управління технологічним процесом. Об'єктом контролю у цьому випадку слугує гарячий прокат. На рис. 6.3 представлена структурна схема дефектоскопу, який реалізує контроль якості металевого листа в процесі його прокату.

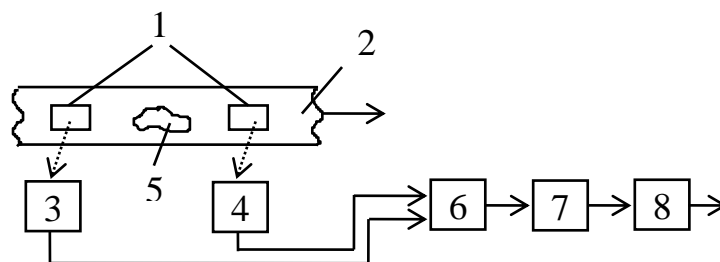


Рис. 6.3. Структурна схема дефектоскопу для контролю гарячого прокату:
 1 – пляма сканування радіометра; 2 – лист прокату; 3 та 4 – радіометри; 5 – дефект (раковина або розшарування); 6 – диференційний підсилювач;
 7 – основний підсилювач; 8 – пускова схема

Принцип роботи дефектоскопа наступний. Лист прокату рухається в напрямку стрілки та сканується двома радіометрами. Сигнали від радіометрів надходять в диференційний підсилювач 6. Диференційний підсилювач збалансований таким чином, що за умови відсутності дефекту вихідний сигнал буде рівний нулю. Поява дефекту (тріщини, раковини) призведе до того, що сигнали радіометрів будуть відрізнятися один від одного. На виході

диференційного підсилювача з'явиться сигнал різниці, який підсилиться основним підсилювачем 7. Цей сигнал надходить до пускової схеми 8, яка управляє рухом ножиць, що вирізають дефектну ділянку.

У подібній схемі використовуються особливості технологічного процесу – наявність нагрітого ОК, що дозволяє виключити ДТЗ зі складу дефектоскопа.

6.3. Приклад використання спеціалізованої системи

Розглянемо спеціалізовану систему, розроблену для контролю стаціонарних та імпульсних теплових полів потужних транзисторів. Схема такої системи приведена на рис. 6.4.

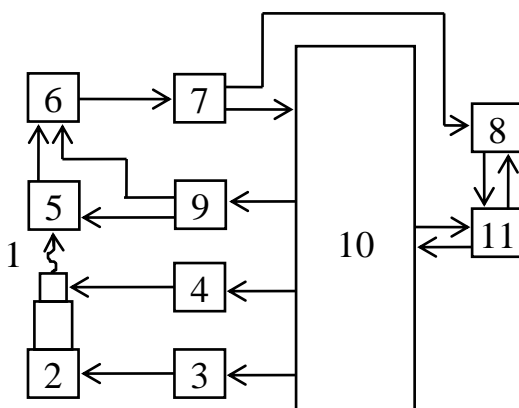


Рис. 6.4. Спеціалізована система контролю потужних транзисторів: 1 – ОК (потужний транзистор), 2 – 2-х координатний стіл, 3 – блок управління, 4 – блок, що задає режим роботи транзистора, 5 – приймач випромінювання, 6 – блок підсилення та комутації, 7 – пристрій реєстрації, 8 – запам'ятовуючий пристрій, 9 – блок цифрових розгорток, 10 – інтерфейс, 11 – мікропроцесор

Об'єкт контролю 1 (потужний транзистор) розташовується на 2-х координатному столі 2, що управляється блоком керування 3. Електричний режим роботи транзистора задається пристроєм 4. Теплове випромінювання транзистора потрапляє на приймач випромінювання 5, що містить 50 чутливих елементів. Вихідний сигнал від приймача через блок підсилення і комутації 6 потрапляє на пристрій реєстрації 7 та запам'ятовується пристроєм 8. Блок цифрових розгорток 9 дозволяє проводити порядкове сканування об'єкта за довільною траєкторією, яка задається мікропроцесором 11. Робота системи узгоджується з мікропроцесором через інтерфейс 10. Транзистори, теплові поля яких відрізняються від еталонних значень, вважаються дефектними та знімаються з конвеєра.

6.4. Теплові дефектоскопи-дрони

Дрон – безпілотний літальний апарат (БПЛА), який здатний автономно переміщатися в повітрі та не вимагає безпосереднього пілотування. Апарати керуються за допомогою спеціального пульта або бортового комп'ютера. БПЛА це літальний робот, який здатний виконувати декілька простих функцій. Зовсім недавно БПЛА мали виключно військове застосування, де вони використовувалися для знищення повітряних цілей, моніторингу та збору інформації. Проте, сьогодні дрони отримали широке застосування, наприклад для спостереження за погодою, трафіком, тушіння пожеж, доставки вантажу та ін. Використання дронами фото- і відео-зйомки суттєво розширило їх можливості в різних галузях, в тому числі й неруйнівному контролі [33].

Однією з актуальних проблем на сьогодні є контроль стану елементів сонячних батарей. З огляду на те, що таких елементів батарея налічує десятки тисяч, то виявити неробочий елемент батареї серед такої кількості дуже складно. Проте, проблему контролю можливо вирішити застосуванням теплового дефектоскопу-дрону. Такий дефектоскоп, як правило, складається з БПЛА та інфрачервоної камери. В процесі контролю дрон інспектує сонячну батарею шляхом облітання та фіксує теплове поле усієї конструкції, до складу якої входить безлічі окремих елементів та блоків. На рис. 6.5 показано цей процес.



Рис. 6.5. Контроль сонячних панелей за допомогою теплового дефектоскопа-дрона

Результатом контролю, проведеного дефектоскопом-дроном, є набір зображень-термограм сонячних панелей. На рис. 6.6 показано термограму однієї з таких панелей, де чітко видно елемент з температурним відхиленням. Така температурна аномалія свідчить про наявність дефектів в конструкції панелі –

декілька елементів вийшли з ладу. До найбільш поширених дефектів в конструкції сонячної панелі відносять коротке замикання в схемі підключення елемента або відсутність контакту з рештою елементів.

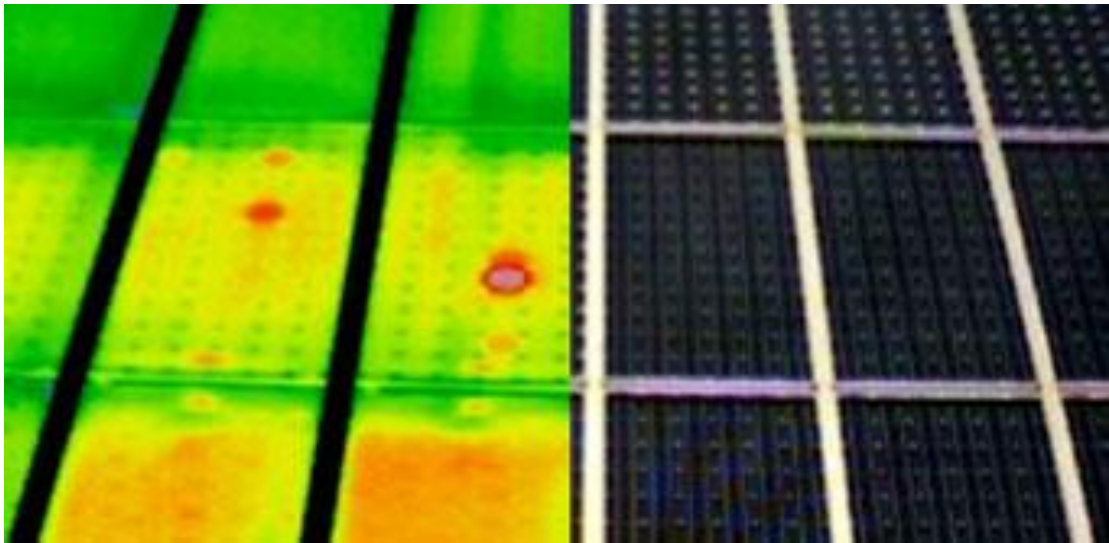


Рис. 6.6. Термограма сонячної панелі

У випадку короткого замикання в електричній схемі елемента сонячної панелі спостерігається підвищення температури в зоні розташування цього елемента. У випадку відсутності контакту – температура дефектного елемента буде завжди нижче, ніж у сусідніх елементах. Таким чином, температурні контрасти завжди будуть індикаторами дефектності елементів сонячних батарей.

Теплові дефектоскопи-дрони обов'язково мають систему визначення координат дефекту, що дає змогу персоналу, який обслуговує конструкцію, оперативно знайти пошкоджений елемент панелі та провести його заміну на робочий.

Запитання для перевірки

1. Поясніть особливості поєднання засобів теплового НК для перевірки теплоізоляції об'єктів.
2. Чи можливе комбінування виявлення дефектів та управління технологічним процесом засобами теплового НК? Якщо так, то як саме?
3. Поясніть особливості поєднання засобів теплового НК для перевірки працездатності електронних схем.
4. Проаналізуйте актуальність проведення теплового контролю з використанням дронів.
5. Поясніть принцип контролю з використанням дефектоскопів-дронів.

7. ЗАВАДИ В ПРОЦЕСІ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Всі завади, що виникають при активному ТНК, можна розділити на дві групи. До першої відносять завади, що характерні практично для всіх методів ТНК, а завади, що є характерними тільки для теплового ТНК, входять до другої.

До завад, що характерні практично для всіх методів НК, належать: технологічні шуми, які викликані неоднорідністю ОК, що не є дефектом, нестабільність пристрою реєстрації та нестабільність джерела зовнішнього впливу на ОК.

До завад, що характерні тільки для ТНК, належать завади, обумовлені: неоднорідністю КТВ об'єкта, нерівномірністю розподілу енергії в плямі нагріву, коливаннями температури навколишнього середовища, засвіченням ОК від сторонніх джерел випромінювання.

Однією з найбільш характерних для активного ТНК (АТНК) завад є нестабільність середнього рівня сигналу. Ця завада може бути викликана наступними причинами: нестабільністю ДТЗ, коливаннями температури навколишнього середовища, неоднорідністю поверхні ОК.

В процесі боротьби з впливом такої завади необхідно враховувати, що корисна інформація про локальні дефекти міститься в області більш високих частот. Це дозволяє відфільтрувати сигнал від перешкоди шляхом автоматичного регулювання підсилення (АРП) в перших каскадах електронного тракту дефектоскопа.

Іншою типовою для АТНК завадою є паразитна модуляція сигналу. Вона може бути викликана нерівномірністю нагріву ОК уздовж поля огляду пристрою реєстрації. Варто враховувати, що ідеального рівномірного нагріву ОК досягти неможливо в реальному житті і нерівномірність нагріву, як правило, буде складати близько 1–5 %. Це значення еквівалентне перепаду температур від декількох десятих градуса до одиниць градусів. Найбільш ефективним методом боротьби з такою завадою є частотна селекція, що ґрунтується на відмінності спектрів корисного сигналу та завади.

7.1. Вплив коефіцієнта теплового випромінювання на результати контролю

В процесі АТНК поверхневі флуктуації КТВ є джерелом хибних сигналів у випадках, коли носієм корисної інформації є температурний перепад (різниця

температур). Цей фактор істотно впливає на температурну роздільну здатність радіометричної і тепловізійної апаратури при виявленні малих дефектів. Через це при тепловому контролі реєструються перепади температури не менше кількох градусів. В медицині при термодіагностиці захворювань різних органів використовується значно менша різниця температури, реєструються десятки градуса. Це пояснюється тим, що в області ІЧ-спектру людська шкіра є практично АЧТ.

На сьогодні розроблено цілий ряд способів боротьби з завадами, викликаними неоднорідністю КТВ. Серед них можна виділити наступні.

1. Найбільш простим способом боротьби з впливом КТВ є нанесення на поверхню виробу спеціального покриття, яке має однорідний коефіцієнт. Це покриття вирівнює КТВ по всій поверхні. Однак, недоліком цього способу є його низька продуктивність при контролі об'єктів з великою площею. Крім того, необхідно брати до уваги, що КТВ залежить від товщини покриття і якості його зв'язку з поверхнею виробу.

2. Другим простим способом визначення флуктуації КТВ є дослідження поверхні виробу в двох режимах. Спочатку ОК досліджують в стаціонарному режимі, в якому контраст термограми відображає просторову нерівномірність КТВ. Потім дослідження проводяться в нестаціонарному режимі, при якому до стаціонарної картині додаються температурні градієнти, які викликані наявністю дефектів. Недоліки цього методу: складність реалізації та низька продуктивність.

3. Універсальним і надійним методом усунення флуктуації КТВ є спосіб подвійного сканування. Суть методу полягає в тому, що вимірювання температури після нагрівання здійснюється не одним, а двома приймачами випромінювання. При цьому, другий приймач випромінювання «переглядає» ті ж самі ділянки поверхні ОК після першого, але через деякий час t_3 . Сигнал від першого приймача затримується на цей час t_3 і в момент приходу сигналу від тієї ж ділянки з другого приймача відбувається поділ цих сигналів. В результаті на виході системи отримуємо сигнал, який не залежить від КТВ. Припустимо, що сигнал з приймача має вигляд:

$$U_i = k \cdot \varepsilon \cdot f(T_i),$$

де k – постійний коефіцієнт; ε – КТВ; $f(T)$ – функція, що залежить від температури ОК.

Якщо розділити сигнал першого приймача на сигнал другого, то отримаємо:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f(T_1)}{f(T_2)},$$

де T_1, T_2 – температура ОК однієї і тієї ж точки, але T_1 в момент часу t_1 , а T_2 – в момент часу t_2 .

Як видно, результат не буде залежним від КТВ. Цей метод ґрунтується на наступних припущеннях:

- вимірювання температури обмежено таким чином, щоб коефіцієнт ε залишався постійним;
- для обраного діапазону довжин хвиль $\varepsilon = const$;
- температура радіометра постійна і менше температури ОК;
- час затримки сигналів визначається оптимальним часом теплового контролю для конкретних дефектів (для металів – десяті частки секунди, а для неметалів – від секунди до десятків секунд).

Запитання для перевірки

1. Назвіть основні групи завад, що виникають в процесі активного ТНК.
2. Проаналізуйте вплив КТВ на результати вимірювання.
3. Назвіть способи боротьби з впливом КТВ.

8. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ

До теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалів відносять:

- теплоємність, $[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{г} \times ^\circ\text{К}}$;
- теплопровідність, $[\lambda] = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times ^\circ\text{К}}$;
- температуропровідність, $[a] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

У загальному випадку ТФХ матеріалів залежать від температури. На сьогоднішній день немає універсальних теоретичних моделей, що дозволяють розраховувати ТФХ реальних матеріалів. Тому основним методом розрахунку ТФХ є експериментальний.

ТФХ функціонально пов'язані між собою через об'ємну густину $[\rho] = \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$, а теплопровідність визначається формулою:

$$\lambda = c \cdot a \cdot \rho.$$

8.1. Методи вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів

Методи вимірювання ТФХ ґрунтуються на аналізі реакції об'єкта $T = f(x, y, z, t)$ на вплив теплового поля. Теорія теплопровідності дозволяє аналітично визначити таку функцію для тіл простої форми. Для цього забезпечують умови одномірності температурного поля, що дає можливість використовувати функцію від однієї координати та часу, $T = f(x, t)$. Від виду цієї функції істотно залежить вид теплового впливу на ОК.

Зазвичай застосовують такі види впливу, як імпульсний об'ємний, імпульсний локальний, вплив постійної потужності, гармонійний. Кожен з цих впливів має чіткі аналітичні рішення, які легко реалізуються на практиці.

При імпульсному об'ємному впливі на ОК тепла енергія рівномірно розподіляється в усьому об'ємі зразка і не створює спрямованих теплових потоків. Об'єкт при цьому теплоізолюваний від навколишнього середовища.

Прикладом такого впливу є нагрівання металевого зразка імпульсом електричного струму.

Метод імпульсного об'ємного впливу використовується тільки для визначення теплоємності зразків:

$$C(T_0) = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{Q}{\Delta T} \right), \quad (8.1)$$

де T_0 – початкова температура зразка; m – маса зразка; ΔT – приріст температури зразка; Q – енергія, $Q = \int_0^{tk} W(t) \cdot dt$; $W(t)$ – імпульсна потужність; tk – час дії імпульсу.

Прилади, в основі яких лежить метод імпульсного об'ємного теплового впливу на ОК, називаються *C - калориметрами*.

При імпульсному локальному впливі на ОК джерело тепла діє на локальну ділянку об'єкта, при цьому створює спрямований тепловий потік та нестационарне нерівномірне температурне збудження. Локальний імпульсний вплив дозволяє визначити всі ТФХ.

Припустимо, що на ізотропне середовище з початковою умовною температурою $T(x, t=0) = 0$, в площині $P(x=0, y, z)$ діє тепловий імпульс з енергетичною поверхневою густиною, $[q_n] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$. Тоді:

$$T(x, t) = \frac{q_n}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot t}\right). \quad (8.2)$$

Для визначення потрібної ТФХ слід виміряти температуру $T(x_0, t)$ для будь-якого ізотермічного перерізу зразка x_0 .

Для точки $T_m = T(x_0, t_m)$, де похідна температури по часу $\frac{dT}{dt} = 0$, отримаємо значення теплоємності і температуропровідності:

$$c = \frac{0,24 \cdot q_n}{\rho \cdot x_0 \cdot T_m}; \quad a = \frac{x_0^2}{2 \cdot t_m}. \quad (8.3)$$

Однак визначення T_m зазвичай має певну похибку для кривої з малою кривизною. Для точок з більшою крутизною, наприклад: $T(x_0, t_1) = T(x_0, t_2) = 0,5 \cdot T_m$, отримаємо:

$$a = \frac{x_0^2}{7,4 \cdot t_1}; \quad a = \frac{x_0^2}{0,202 \cdot t_2}. \quad (8.4)$$

Формули (8.1) – (8.4) використовуються при визначенні ТФХ матеріалу методом лазерного спалаху.

Вплив постійної потужності – в цьому випадку нагрівач забезпечує в межах зразка рівномірне температурне поле.

Припустимо, що на поверхню плоского зразка з рівномірним початковим температурним полем в момент часу $t=0$ діє теплове джерело з постійною питомою густиною $q_n = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T^4 - T_0^4]$. Температура поверхневого шару буде рівна:

$$T_n(0,t) = \frac{2 \cdot q_n \cdot \sqrt{a \cdot t}}{\sqrt{\pi}}$$

Знаючи одне зі значень $T_i = T(0,t_i)$, можемо розрахувати теплову активність матеріалу:

$$A = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} = \frac{2 \cdot q_n \cdot \sqrt{t_i}}{\sqrt{\pi} \cdot T(0,t_i)}$$

Гармонійний вплив. Важливою перевагою цього впливу є можливість керувати частотою нагріву та реєструвати фазовий зсув температурних хвиль.

Нехай на поверхню зразка ($x=0$) впливає теплове джерело з енергетичною густиною $q = q_0 \cdot \cos \omega \cdot t$. При цьому амплітуда теплової хвилі буде рівна:

$$\theta(x,t) = \frac{q_0}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \omega}} \cdot \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - x \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right)$$

Для $x=0$ отримаємо:

$$\theta(0,t) = \left(\frac{q_0}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \omega}}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{4}\right)$$

За умови вимірювання амплітуди коливань температури поверхні зразка θ при заданому потоці q , можна визначити теплову активність зразка:

$$A = \frac{q_0}{(\theta_0 \cdot \sqrt{\omega})}$$

За умови реєстрації зсуву фаз коливань φ температури між шарами $x=0$ і $x=l$, можна визначити теплопровідність матеріалу:

$$a = \frac{0,05 \cdot \omega \cdot l^2}{\varphi_l^2}$$

8.2. Прилади з оптичним імпульсним нагріванням

Прилади з оптичним імпульсним нагріванням використовують для визначення ТФХ таких матеріалів, як кераміка, композити, полімери та теплоізолятори.

В основі приладу метод, який реалізується за допомогою імпульсного лазера та має наступні особливості в застосуванні:

- зразок матеріалу (ОК) повинен бути теплоізолюваний;
- тривалість імпульсу нагрівання повинна бути значно менше часу поширення теплового імпульсу в матеріалі;
- зразок матеріалу повинен бути однорідним і не повинен змінювати свої ТФХ в діапазоні температури нагріву.

При цьому температуропровідність буде визначатися за формулою:

$$a = \frac{0,14 \cdot l^2}{t_{0,5}},$$

де l – товщина зразка; $t_{0,5}$ – час досягнення зворотного боку матеріалу температури, рівній $\Delta T = 0,5 \cdot \Delta T_{\max}$; T_{\max} – максимальна температура нагріву. На рис. 8.1 показано зміну температури на зворотному боці матеріалу після дії лазерного імпульсу.

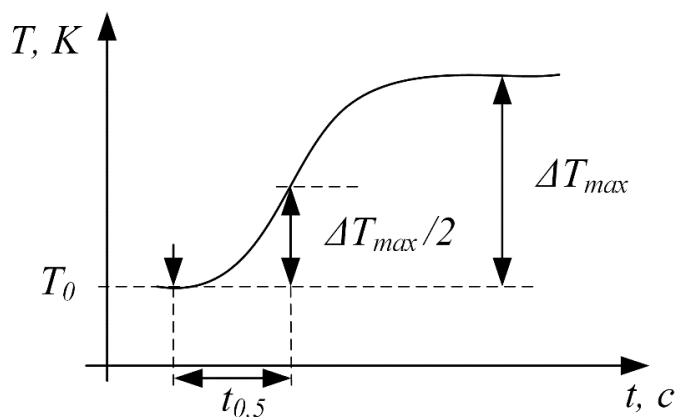


Рис. 8.1. Процес нагріву матеріалу зразка

За умови відомого абсолютного значення енергії лазерного спалаху Q , яку поглинув зразок, є можливість визначити теплоємність зразка:

$$c = \frac{Q}{(l \cdot \Delta T_{\max} \cdot \rho)},$$

де l – товщина; ρ – густина зразка; Q – абсолютне значення енергії.

Теплопровідність зразка визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{0,14 \cdot l \cdot Q}{(t_{0,5} \cdot \Delta T_{\max})}.$$

Вищеописаний метод реалізовано на прикладі системи, блок-схема якої приведена на рис. 8.2.

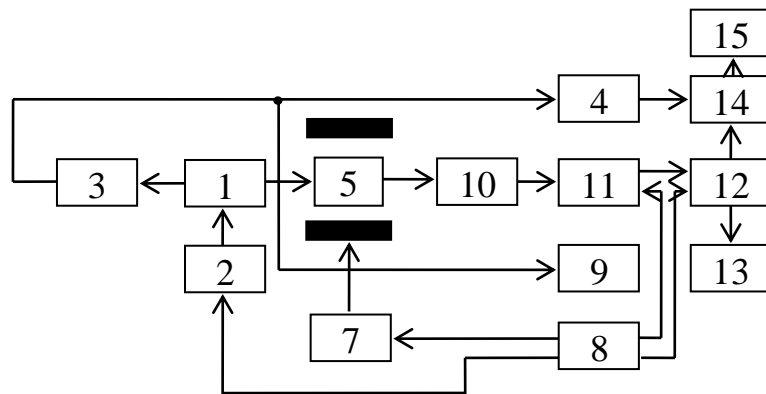


Рис. 8.2. Блок-схема системи для визначення ТФХ матеріалу методом лазерного спалаху: 1 – лазер; 2 – блок живлення лазера; 3 – фотодіод; 4 – вимірювач енергії лазерного імпульсу; 5 – ОК; 6 – нагрівач; 7 – терморегулятор; 8 – контролер керування системою; 9 – фотодіод каналу синхросигналу; 10 – термодатчик (пристрій реєстрації); 11 – підсилювач; 12 – пристрій оперативного запам’ятовування; 13 – самописець; 14 – інтерфейс; 15 – комп’ютер

Робота системи відбувається наступним чином. Імпульсний лазер 1 за вказівкою від контролера 8 генерує імпульс, тривалість якого близько 10^{-3} сек та енергія $E = 3 \div 6$ Дж. Зазвичай використовується лазер на рубіні з $\lambda = 0,69$ мкм. Частина випромінювання потрапляє на фотодіод 3, сигнал з якого надходить на вимірювач 4, та проходить до блока генератора синхроімпульсів 9, пов’язаного з контролером 8. Зразок 5 розміщений в порожнині нагрівача 6 для адіабатизації (теплоізоляції) та нагрівання до високих температур. В якості термодатчика 10 може бути використаний інфрачервоний радіометр або термопара. З термодатчика 10 сигнал передаються до підсилювача 11, який формує сигнал пропорційний температурі протилежної поверхні зразка $T = T(t)$. Сигнали термодатчика та інша необхідна інформація фіксуються та запам’ятовуються в блоці 12. Залежність $T = T(t)$ може відобразитися на діаграмі самописця 13. Через інтерфейс 14 дані вимірювання надходять на комп’ютер для подальшої обробки.

Запитання для перевірки

1. Назвіть основні теплофізичні характеристики матеріалів.
2. Поясніть принцип вимірювання ТФХ з імпульсним тепловим впливом на ОК.
3. Поясніть принцип вимірювання ТФХ з впливом постійної теплової потужності на ОК.
4. Поясніть принцип вимірювання ТФХ з гармонійним тепловим впливом на ОК.
5. Приведіть елементи структурної схеми приладу з імпульсним тепловим впливом.

9. УЛЬТРАЗВУКОВІ ТЕРМОМЕТРИ

9.1. Загальні відомості

В основі ультразвукової (УЗ) термометрії лежить використання температурної залежності параметрів, що описують процес поширення пружних коливань в різних середовищах. Як правило, в якості такого температурно-залежного параметра обирається швидкість.

Розглянемо зв'язок швидкості поширення ультразвукових коливань в *ідеальному газі* з температурою за допомогою виразу:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R}{\mu} T},$$

де P – тиск в речовині; ρ – густина речовини; $\gamma = C_p / C_v$ – відношення теплоємностей за умови постійного тиску (C_p) та постійного об'єму (C_v); $R = 8,31$ Дж / (моль·К); μ – відносна молекулярна маса; T – температура.

Таким чином, в газі швидкість поширення пружної хвилі однозначно пов'язана зі значенням температури, а газовий УЗ термометр використовують для визначення еталону температури. Чутливість такого термометра визначається співвідношенням:

$$\frac{\Delta v}{\Delta T} = \frac{v}{2T}. \quad (9.1)$$

Для рідин співвідношення (9.1) матиме вигляд:

$$\frac{\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)}{\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)} = -3. \quad (9.2)$$

У виразі (9.2) чисельник визначає температурний коефіцієнт швидкості, а знаменник – коефіцієнт об'ємного розширення.

Швидкість поширення ультразвукової хвилі в *необмежених твердих тілах* визначається модулем пружності Юнга E (здатність чинити опір пружним деформаціям) і модулем зсуву G , які є температуро-залежними величинами.

В *обмежених тілах*, крім поздовжньої і поперечної хвилі ультразвукового коливання, які також виникають в необмежених тілах, можуть збуджуватись й інші типи хвиль: поверхневі, крутильні, згінні, хвилі Лемба, Релея та ін [34]. Швидкість поширення цих ультразвукових хвиль визначається не тільки пружними характеристиками речовини, але і геометрією тіла.

В УЗ термометрії використовують крутильні коливання, а в якості чутливих елементів застосовують стрижні, поперечні розміри яких набагато менше довжини хвилі. Швидкість поширення крутильних хвиль в стрижнях рівна:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

де G – модуль зсуву; ρ – густина речовини.

При розробці та проектуванні УЗ термометрів необхідно враховувати поглинання ультразвукових коливань середовищем об'єкту. Фізична природа поглинання коливань в газах і рідинах пов'язана з в'язкістю і теплопровідністю середовища [34].

Коефіцієнт поглинання в газах при певній температурі залежить від відношення частоти коливань та тиску. У рідинах поглинання УЗ визначається в'язкістю. У твердих тілах спостерігається поглинання і розсіювання УЗ хвиль, але для поздовжніх і зсувних хвиль це проявляється в різній мірі. Поглинання визначається внутрішнім тертям і теплопровідністю середовища. Розсіювання виникає за рахунок багаторазового відбиття та заломленнями УЗ хвиль на неоднорідностях структури об'єкта.

9.2. Методи побудови ультразвукових термометрів

Залежно від виду чутливого елемента УЗ термометри умовно поділяють на контактні та безконтактні. Контактні термометри містять спеціальний чутливий елемент, що вводиться в середину об'єкта контролю або має безпосередній контакт з ним. У випадку безконтактних термометрів чутливим елементом служить сам об'єкт контролю, через який пропускаються УЗ коливання.

УЗ термометри в залежності від контактного чи безконтактного методу вимірювання розрізняють резонансні і імпульсні. Резонансні термометри використовують температурну залежність резонансних властивостей чутливого елемента. В основі імпульсних методів лежить температурна залежність часового інтервалу між ультразвуковими сигналами-імпульсами. Метрологічні характеристики контактних термометрів визначаються фізичними властивостями матеріалів, з яких виконані чутливі елементи. Характеристики безконтактних термометрів визначаються параметрами об'єкту контролю.

Перевагою безконтактних термометрів є відсутність чутливого елемента, який спотворює первісну картину розподілу температури. Недолік – при впливі на ОК акустичним сигналом підвищеної потужності, температура ОК може

змінюватися за рахунок проходження через нього УЗ коливань. Зміна температури при цьому оцінюється співвідношенням:

$$\Delta T = \frac{\varepsilon_d \cdot E \cdot t \cdot f}{\rho \cdot c \cdot Q},$$

де Q – добротність, ε_d – амплітуда деформації, E – модуль Юнга, t – час, f – частота УЗ, ρ та c – густина та теплоємність речовини.

9.3. Способи збудження і реєстрації ультразвукових сигналів

З метою збудження та реєстрації УЗ сигналів в термометрах використовують магнітострикційні або п'єзоелектричні перетворювачі.

Основна характеристика магнітострикційного матеріалу, яка використовується в перетворювачах, це коефіцієнт магнітомеханічного зв'язку, який характеризує ефективність перетворення одного виду енергії в інший:

$$K_m = \sqrt{\frac{\mu \mu_0 \lambda_s^2}{E}},$$

де μ – магнітна проникність при постійній деформації; μ_0 – магнітна проникність вакууму; λ_s – константа магнітострикції; E – модуль пружності.

Магнітострикційний перетворювач складається з феромагнітного осердя і котушки намагнічування. Найбільш поширеними є перетворювачі стрижневого і кільцевого типу. Осердя для крутильних коливань мають форму трубок (рис. 9.1). При цьому вектор змінного магнітного поля H_m перпендикулярний вектору індукції підмагнічування B_0 .

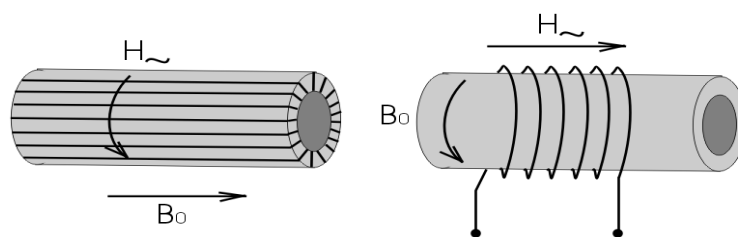


Рис. 9.1. Конструкції магнітострикційних трубчатих перетворювачів

Максимальна робоча температура перетворювача повинна бути на 100–200 К менше температури Кюрі. Температура Кюрі – температура, при якій зникають феромагнітні властивості матеріалу, і феромагнетик перетворюється в парамагнетик [35]. Приклади температури Кюрі для деяких металів: нікель 350 °С, залізо 770 °С, кобальт 1140 °С.

Принцип роботи УЗ термометра з використанням п'єзоелектричного перетворювача ґрунтується на основній характеристиці такого перетворювача – коефіцієнті електромеханічного зв'язку:

$$K_R = \frac{d_k}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 S_E}},$$

де ε – відносна діелектрична проникність; ε_0 – діелектрична проникність вакууму; d_k – п'єзомодуль; S_E – коефіцієнт пружної піддатливості.

Для роботи в діапазоні частот від 40 до 100 кГц використовують перетворювачі у вигляді стрижнів, які здійснюють поздовжні коливання. Для частот, більших за 100 кГц, використовують перетворювачі у вигляді пластин, які здійснюють коливання по товщині ОК.

Подібний перетворювач може працювати в двох режимах: в режимі безперервних коливань і імпульсному режимі. У режимі безперервних коливань використовують роздільні перетворювачі (тобто два перетворювача). Для імпульсного режиму може використовуватися один перетворювач. Він буде виконувати функцію випромінювача і приймача.

9.4. Резонансний ультразвуковий термометр

Розглянемо конструкцію широковідомого резонансного УЗ термометра – кварцевого термометр, чутливим елементом якого є кристал кварцу. Температурна залежність частоти кварцу описується наступним співвідношенням:

$$f(T) = f_0(1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2 + \gamma \cdot T^3 + \dots).$$

Зстосовуючи сучасні технології в обробці кристалів кварцу, можна отримати такий зріз кристала, напрямком осі якого заберпечить коефіцієнт α рівним нулю. В цьому випадку частота коливань такого кристала практично не залежить від температури. Крім того, можна знайти такий зріз кристала, для якого впливи інших коефіцієнтів вищих порядків також зникають. В такому разі, резонансна частота кварцу майже лінійно залежать від температури. Завдяки цьому кварц є гарним датчиком для цифрових вимірювань температури. На рис. 9.2 представлена блок-схема кварцевого термометра.

Принцип роботи термометра полягає в наступному. Кристал кварцу 1 в поєднанні зі схемою генератора утворює датчик вимірювання температури. У схемі змішувача 3 відбувається придушення частоти $f(t=0)$ шляхом накладання на постійну частоту f_0 від генератора 4. На виході блоку 3 з'являються дельта імпульси, які заповнюють часовий проміжок, що формується блоком 5. Ці

імпульси потрапляють до лічильника 7, та їх кількість відображається на цифровому індикаторі 8.

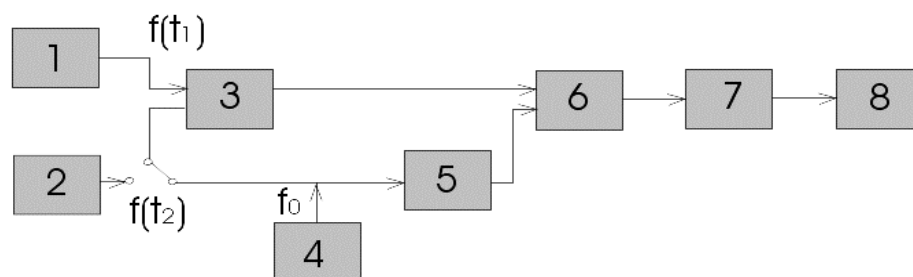


Рис. 9.2. Блок-схема резонансного УЗ термометра з кварцевим резонатором: 1, 2 – кристали кварцу; 3 – змішувач; 4 – генератор незалежних коливань; 5 – генератор часових імпульсів; 6 – схема співпадіння; 7 – лічильник; 8 – цифровий індикатор

З метою отримання в якості результату різницю температур, необхідно замість генератора 4 (незалежного від температури) підключити другий датчик температури 2, який має такі самі властивості що й датчик 1. Іншими словами, така система є інтегруючим АЦП (аналого-цифровим перетворювачем).

Кварцеві термометри будуються в основному на високочастотних кварцових резонаторах. Робоча частота термочутливих резонаторів лежить в діапазоні від 1 до 30 МГц.

Терморезонатор з метою його захисту від осадження на поверхні твердих частинок, пилу, вологи і т.п., поміщують в герметичний корпус. Це підвищує його надійність, запобігає старінню і зниженню добротності.

Існує два варіанти виконання термодатчиків – з вакуумуванням резонатора в скляному балоні та з герметизацією резонатора в металевому балоні, що заповнений газом з хорошою теплопровідністю (наприклад гелієм). Герметизовані датчики мають меншу теплову інерційність ніж вакуумні. У той же час, вакуумні термодатчики мають більш високу часову стабільність і роздільну здатність.

Недоліком кварцевого термодатчика є наявність гістерезису, природа якого остаточно не з'ясована. Гістерезис може бути зменшений в 2–3 рази шляхом термотренуванням. Термотренування це десятикратна витримка термодатчиків почергово в рідкому азоті (-196 °С) та в нагрітому термостаті (150 °С) на протязі години. Діапазон вимірюваних температур для кварцових термометрів становить від -80 ... + 250 °С. Для високих температур застосовують контактні резонансні термометри з чутливими елементами з тугоплавких матеріалів.

9.5. Імпульсний ультразвуковий термометр

Розглянемо конструкцію імпульсного ультразвукового термометра, в основі якого лежить метод синхрокільця або автоциркуляції імпульсу (рис. 9.3).

Імпульс від генератора 1, який працює в режимі зовнішнього запуску, перетворюється в акустичний сигнал перетворювачем 2. Цей сигнал надходить до чутливого елемента 4, в якості якого може бути використано газ, рідину або тверду речовину. Імпульс – сигнал, прийнятий перетворювачем 3, після його підсилення в 5 використовується для формування відповідного імпульсу в 6 для включення тригера 7, який запускає генератор 1.

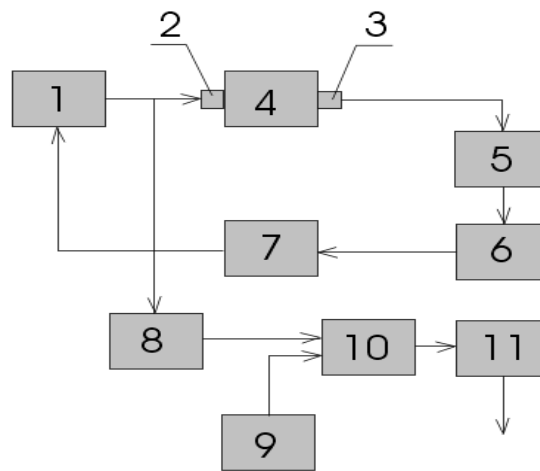


Рис. 9.3. Блок-схема імпульсного УЗ термометра: 1 – генератор; 2 та 3 – перетворювачі; 4 – чутливий елемент; 5 – підсилювач; 6 – формував; 7 – тригер; 8 – перетворювач; 9 – джерело еталонної напруги; 10 – перерахунковий пристрій; 11 – аналого-цифровий перетворювач

Часовий інтервал між генерацією та прийняттям імпульсу, що запускає генератор 1, визначається швидкістю проходження акустичного сигналу по чутливому елементу, яка залежить від температури. Таким чином, частота проходження імпульсів на виході генератора 1 буде функцією температури.

Послідовність імпульсів з генератора 1 також надходить до перетворювача 8, який формує напругу, пропорційну періоду проходження імпульсів. Потім в блоці 10 відбувається порівняння отриманої напруги з еталонною. Різниця цих двох напруг перетворюється в цифровий код і надходить до індикатора.

У випадку вимірювання високих температур (вище 1200 К) необхідно відокремити електроакустичний перетворювач та чутливий елемент. У цьому випадку застосовують режим роботи на відбиття.

Запитання для перевірки

1. Приведіть основний температурно-залежний параметр, що використовується в УЗ термометрах. Чому?
2. Охарактеризуйте резонансні і імпульсні УЗ термометри: переваги, відмінності, недоліки.
3. Які способи збудження УЗ коливань, що використовуються в УЗ термометрах, вам відомі?
4. Яку конструкцію має резонансний УЗ термометр? Опишіть його принцип дії.
5. Приведіть варіанти виконання термодатчиків в резонансних УЗ термометрах.
6. Яку конструкцію має імпульсний УЗ термометр? Опишіть його принцип дії.

10. ШУМОВІ ТЕРМОМЕТРИ

10.1. Загальні відомості

З курсу фізики твердого тіла відомо, що в провіднику виникає хаотичний рух носіїв заряду, цей рух називають броунівським або тепловим рухом. Флуктуації швидкостей носіїв заряду в провідниках створюють випадкові пульсації напруги на кінцях цих провідників [36]. Амплітудні значення цієї напруги підкоряються нормальному закону розподілу з нульовим математичним очікуванням та дисперсією, крім того, ці амплітудні значення залежать від температури. Такі пульсації напруги називають тепловим шумом. Таким чином, термошумовий метод ґрунтується на температурній залежності різниці електричних потенціалів.

Теоретичні основи цього методу були викладені в роботах Ейнштейна і Найквіста давно, проте практичне застосування почалося нещодавно. Це пов'язано з розвитком нано і мікро електроніки, яка дозволила вимірювати шумові напруги і потужності, що мають дуже малі значення. На сьогодні, шумові термометри не випускаються серійно, існують тільки лабораторні зразки.

Переваги термошумового методу:

1. дозволяє вимірювати термодинамічну температуру;
2. результати вимірів не залежать від характеру і структури матеріалу первинного перетворювача;
3. на термометри, що ґрунтуються на цьому методі, не впливають такі фактори, як іонізуюче випромінювання (можна використовувати в ядерних реакторах), деформація, зміна структури матеріалу, хімічні перетворення. Середньо квадратичне значення шумової напруги визначається формулою (співвідношення Найквіста):

$$\bar{U}^2 = \int_{f_1}^{f_2} 4 \cdot k \cdot T \cdot R(f) df, \quad (10.1)$$

де k – постійна Больцмана; $R(f)$ – активна частина комплексного опору. Якщо опір не залежить від частоти, то формула (10.1) буде виглядати так:

$$\bar{U}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f.$$

Отже, середнє квадратичне значення напруги теплового шуму прямо пропорційне термодинамічній температурі зразка.

Діапазон значень температури, в якому може використовуватися термошумовий метод, є необмеженим – від 0,01 до 3000 К і вище. Точність вимірювання лежить в межах 0,1 – 1 %.

За умови вимірювання низьких температур необхідно вводити поправки на отримані значення через те, що похибка істотно зростає. Наприклад, при вимірюванні температури 1 К похибка становить 10 %, а при температурі затвердіння золота (1064,43 °С) вона становить 0,05 %. Суттєвий вплив на похибку шумового термометра здійснюють власні шуми апаратури, електричні завади з невідомим законом розподілу (особливо з характером білого шуму). Типова структура шумового термометра представлена на рис. 10.1.

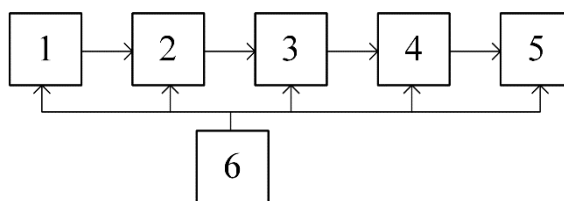


Рис. 10.1. Узагальнена структурна схема шумового термометра: 1 – первинний перетворювач, 2 – лінія зв'язку, 3 – масштабний перетворювач, 4 – проміжний перетворювач, 5 – блок обробки та реєстрації інформації, 6 – блок керування

Для первинних перетворювачів використовуються наступні матеріали: платина, вольфрам, константан, ніхром, нікель і т. п. Конструкція контактного первинного перетворювача шумового термометра показана на рис. 10.2.

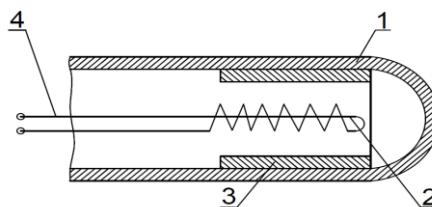


Рис. 10.2. Конструкція контактного перетворювача: 1 – екран з теплопровідного матеріалу (сталь, мідь); 2 – чутливий елемент (NiCr); 3 – ізолятор (MgO, Al₂O₃); 4 – провідні дроти

Схематично класифікація методів вимірювання температури шумовим термометром показана на рис. 10.3.

У методі безпосередньої оцінки температура визначається наступним чином:

$$T = \frac{\bar{U}^2 - \bar{U}_{ш}^2}{4 \cdot k \cdot K_e^2 \cdot R_\delta \cdot \Delta f},$$

де \bar{U}^2 – середньоквадратичне значення вимірюваної шумової напруги; $\bar{U}_{ш}^2$ – середньоквадратичне значення власної шумової напруги підсилювача; K_e – ефективний коефіцієнт підсилення; R_δ – опір чутливого елемента.

Термометр попередньо калібрують для одного або декількох значень температури. Вимірювальний ланцюг повинен мати високу температурну стабільність опору вимірювального елемента, яка підтримується шляхом введення в схему від'ємного зворотного зв'язку (рис. 10.4).

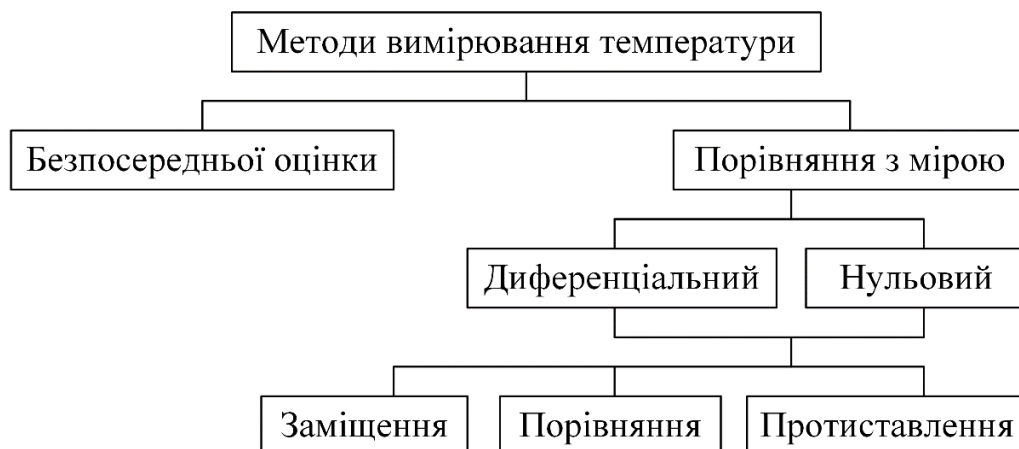


Рис. 10.3. Методи вимірювання температури шумовим термометром

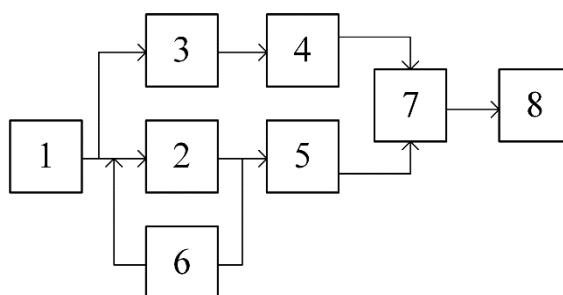


Рис. 10.4. Схема шумового термометра з від'ємним зворотним зв'язком: 1 – чутливий елемент, 2 та 3 – вузько смугові підсилювачі, 4 та 5 – детектори, 6– пристрій зворотного зв'язку, 7 – перемножуючий пристрій, 8 – інтегратор

Підсилення сигналу, що надходить від чутливого елемента 1 (рис. 10.4), проводиться в двох різних частотних діапазонах. Пристрій зворотного зв'язку 6 зменшує коефіцієнт підсилення пристроєм 2 на величину, пропорційну збільшенню опору чутливого елемента 1. Сигнали від детекторів 4 і 5 перемножуються в пристрої 7, а потім інтегруються в заданому частотному діапазоні за допомогою пристрою 8.

Зменшення системної похибки термометра від власних шумів підсилювача проводиться шляхом застосування двотактного способу вимірювання. У першому такті запам'ятовується сумарне значення середньоквадратичних напруг чутливого елемента і перетворюючої схеми. У другому такті чутливий елемент в схемі замикається та проводиться вимірювання і запам'ятовування тільки середньоквадратичного значення напруги схеми перетворення. Різниця отриманих цих двох сигналів буде пропорційна температурі.

Крім того, температуру можна визначати шляхом вимірювання потужності шумів з використанням формули:

$$P_{ш} = 4 \cdot k \cdot T \cdot B$$

У першому такті підсилюється та запам'ятовується напруга теплового шуму чутливого елемента. У другому такті напруга визначається за формулою:

$$U = \sqrt{P_{ш} \cdot R}$$

Потім отримані ефективні значення цих напруг перемножуються. У такому випадку, вплив систематичної похибки, пов'язаний з температурною залежністю опору, виключається.

Використання методу вимірювання температури заміщенням дає можливість виключити такі недоліки шумового методу як залежність результату вимірювання від коефіцієнта передачі та виникнення систематичної похибки, пов'язаної з власними шумами масштабного перетворювача. На рис. 10.5 представлена схема, що реалізує метод заміщення.

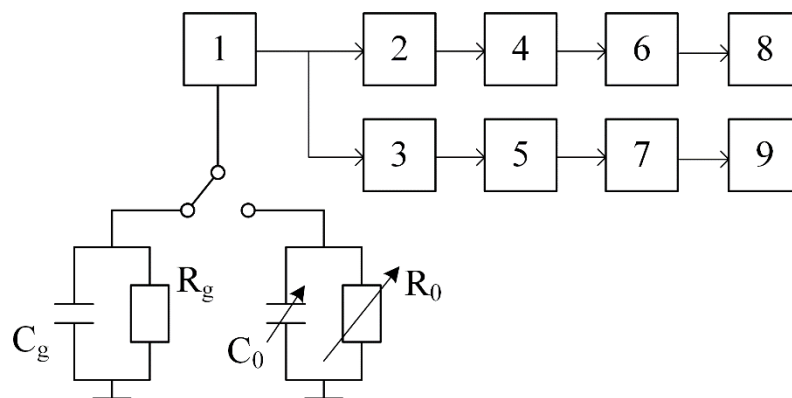


Рис. 10.5. Структурна схема шумового термометра з методом вимірювання заміщенням: 1 – широкосмуговий підсилювач, 2 – вузькосмуговий підсилювач (465 кГц), 3 – підсилювач (10–50 кГц), 4 та 5 – детектори, 6 та 7 – фільтри, 8 та 9 – індикатори

Схема термометра з рис. 10.5 працює наступним чином. До входу широкосмугового підсилювача 1 почергово підключаються вимірювальний ($R_{\delta}C_{\delta}$) і опорний (R_0C_0) первинні перетворювачі. До виходу підсилювача 1 підключені низько частотний (НЧ) і високо частотний (ВЧ) канали, частота пропускання яких 10–50 і 465 кГц, відповідно. Регулюючи ланцюжок R_0C_0 опорного перетворювача домагаються рівності нулю різниці напруг на виходах каналів. У цьому випадку буде виконуватися умова $R_{\delta}T_{\delta} = R_0T_0$ та $R_{\delta}C_{\delta} = R_0C_0$, а значить температура визначається співвідношенням:

$$T_{\delta} = \frac{T_0 R_0}{R_{\delta}}.$$

Запитання для перевірки

1. Поясніть принцип дії шумових термометрів. Наведіть їх переваги та недоліки.
2. Приведіть узагальнену функціональну схему шумового термометра. Які перетворювачі використовуються в таких термометрах?
3. Наведіть класифікацію методів вимірювання температури шумовим термометром.
4. Приведіть структурну схему шумового термометра з методом вимірювання температури заміщенням.

11. ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ

11.1. Тепловізійний метод контролю вологості

Наявність вологи в об'єктах (особливо в пористих) обумовлює інтенсивний процес випаровування за рахунок інфільтрації вологи з під поверхневих областей матеріалу. Ці процеси супроводжуються зміною енергії, а значить, зміною температури на поверхні об'єкта.

Метод ґрунтується на залежності поглинання ІЧ-випромінювання (наприклад в діапазоні $\lambda = 1,9$ мкм) від вмісту вологи. При опроміненні об'єкта ІЧ-випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda = 1,9$ мкм відбитий потік буде обернено пропорційним кількості вологи в об'єкті, тому що випромінювання з такою довжиною хвилі добре поглинається вологою.

Для мінімізації впливу завади, викликані неоднорідністю КТВ, використовують диференційний метод вимірювання. Він ґрунтується на порівнянні коефіцієнта відбиття об'єкта у двох областях спектра. В одному відбиття не залежить від вологості матеріалу, а залежить тільки від КТВ (наприклад $\lambda = 0,6$ мкм). В іншому діапазоні залежить від вологи і від КТВ. Після поділу сигналів, отриманих з фотоприймача, можна виключити завади, що викликані КТВ. Калібрування цього методу здійснюється ваговим методом. Тобто, береться вологий ОК і зважується, потім висушується і знову зважується. Різниця цих зважувань буде відповідати кількості вологи у матеріалі.

11.2. Вібротепловізійний метод контролю цілісності матеріалу

У матеріалах з порушенням структури (цілісності), в процесі дії на них вібрації, виникають температурні поля. Причиною появи температурних полів є розсіювання енергії коливань на дефектах і перетворення її в теплоту за рахунок внутрішнього нагріву матеріалу. В околі ділянок з порушенням цілісності матеріалу виникають локальні зони перегріву об'єкта. Для об'єктів, які піддаються циклічному механічному навантаженню з частотою f , підвищення температури після n циклів коливань, що здійснюються за час t , визначається виразом:

$$\Delta T = (\delta \cdot \sigma_0^2) \cdot (c \cdot \rho \cdot E) \cdot f \cdot t,$$

де δ – декремент загасання; c – питома теплоємність; ρ – густина матеріалу; E – модуль пружності; σ_0 – модуль механічної напруги.

У дефектних ділянках об'єкта амплітуда коливань буде відрізнятися від відповідних значень в бездефектних ділянках. Різниця температур зростає зі збільшенням частоти коливань. Додатково чутливість методу підвищує вібрація виробу (ОК) на частотах, що відповідають резонансним коливанням дефектних ділянок. На термограмах пластин, що вібрують, чітко виявляються дефекти типу розшарувань, порушень структури і т. ін.

Вібротепловізійний метод особливо перспективний для аналізу виробів, що працюють в умовах вібрацій, з метою виявлення дефектів і прогнозування надійності таких виробів.

11.3. Термохвильовий метод контролю

У мовах впливу змінного теплового потоку на поверхню ОК, в об'єкті виникають теплові хвилі, які розповсюджуються на глибину, рівну:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\rho \cdot c \cdot \omega}},$$

де ω – кутова частота модуляції випромінювання.

Внаслідок періодичного нагріву, тобто періодичної теплової деформації, в об'єкті збуджуються та поширюються акустичні хвилі тієї ж частоти, що і теплові. Це явище отримало назву термохвильового ефекту.

Блок-схема, що реалізує цей спосіб контролю показана на рис. 11.1.

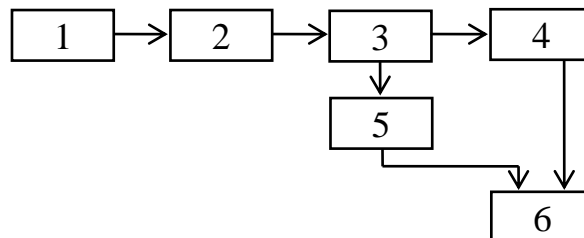


Рис. 11.1. Структура приладу, що реалізує термохвильовий метод: 1 – лазер; 2 – оптична система; 3 – ОК; 4 та 5 – пристрій реєстрації теплових і акустичних полів; 6 – система обробки інформації

Збудження акустичних хвиль в об'єкті можливе після виникнення в ньому теплових хвиль в результаті лазерного його нагріву. Аналізуючи проходження двох типів хвиль через ОК можна зробити висновок про внутрішню структуру його матеріалу.

11.4. Інші методи контролю

У методі *фототермоакустики* лазерне випромінювання проходить через оптичну систему та потрапляє на поверхню ОК, в якому під дією цього випромінювання створюються температурні і акустичні поля. Аналіз цих полів дозволяє робити висновок про структуру та параметри об'єкту. Поглинання лазерного імпульсу призводить до нестационарного підвищення температури поверхневого шару поглинаючого або (за рахунок теплопровідності) прозорого середовища. Під час цього процесу відбувається збудження акустичних хвиль як в прозорому, так і в поглинаючому середовищі.

Метод теплової томографії – метод візуалізації внутрішніх перерізів об'єкту за допомогою теплових ефектів. Його можна реалізувати імпульсним опроміненням об'єкта плоским рівномірним пучком і послідовною реєстрацією "теплових відбитків" дефектів теплофізичних параметрів контрольованої структури на протилежній стороні виробу за допомогою швидкодіючого тепловізора.

Вихрострумотепловий метод ґрунтується на радіоімпульсному впливі електромагнітним полем індуктора на металеві об'єкти, прийомі теплового відгуку накладним перетворювачем в момент та після теплової дії, та послідовному амплітудно-часовому аналізу інформаційного сигналу. Тепловий процес визначається теплофізичними і одночасно електромагнітними характеристиками об'єкту, що дозволяє в поєднувати дослідження ОК як тепловими, так і вихрострумовими методами контролю [37].

Радіо-тепловий метод використовується для реєстрації розподілу температури в об'ємних ділянках ОК. До цього методу належить СВЧ термометрія (СВЧТ), що дозволяє проводити вимірювання температури приповерхневих і глибинних шарів виробів з діелектриків, прозорих в радіодіапазоні (діапазон довжин хвиль від 1 до 100 ..150 мм). Відомо, що більшість матеріалів є непрозорими в ГГц-діапазоні спектру, проте добре пропускають СВЧ випромінювання. Глибина проникнення такого випромінювання суттєво залежить від довжини хвилі і хімічного складу матеріалу ОК [37].

Фазова термографія передбачає сканування ОК сфокусованим лазерним пучком, переміщення якого синхронізовано з розгорткою ІЧ-камери тепловізора, та реєстрацію фазових термограм. Такі термограми представляють собою зміни температури в кожній точці в залежності від часу. Даний метод дозволяє зменшити вплив неоднорідності випромінювальної здатності поверхні об'єкту та є ефективним для контролю тонких плівок, різних покриттів тощо [37].

Теплоголографічний ТНК застосовують з метою контролю тонкостінних оболонок з полімерних композиційних матеріалів, міцність яких залежить від

дефектів типу повітряних розшаровувань, "злипнутих" відшаровувань тощо. Даний метод ґрунтується на нагріванні ОК і одночасній реєстрації термограм та голографічних інтерферограм нагрітої поверхні ОК. Виявлення дефектів відбувається за аномаліями в інтерференційних смугах, а розмір та глибина залягання дефектів визначається через аналіз термограм, отриманих під час нагрівання поверхні ОК галогенними лампами [37].

Запитання для перевірки

1. На якому ефекті ґрунтується вимірювання вологості тепловим методом?
2. Поясніть який вплив має циклічність коливань ОК з дефекотною ділянкою та без неї.
3. Від чого залежить глибина розповсюдження теплового випромінювання в ОК, якщо на її поверхню діє змінний тепловий потік?
4. Поясніть принцип роботи приладу, що реалізує термохвильовий метод.

12. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Сучасним підходом до вирішення наукових задач в процесі будь-яких досліджень є застосування комп'ютерного моделювання (КМ) фізичних процесів та послідуочий аналіз його результатів. Як правило КМ ґрунтується на використанні чисельних методів та інтерактивних графічних технологій. В процесі моделювання досліджувана модель об'єкта та процесу представляється системою алгебраїчних рівнянь та обчислюється з використанням методу скінченних різниць або методу скінченних елементів [38, 39]. В залежності від засобу, що використовується для КМ, математичне представлення моделі може базуватися на системі диференціальних або інтегральних рівнянь, що відображають функціональну залежність від величин, які є важливими характеристиками досліджуваного процесу (наприклад, координати, час, температура тощо).

У порівнянні з реальним об'єктом або експериментом КМ має ряд переваг:

- дозволяє спостерігати фізичні явища і експерименти, які неможливо продемонструвати в реальних умовах (високі температури та їх розподіл в середині ОК);
- показує динаміку процесів і відтворює їх елементи, які важко зафіксувати, спостерігаючи реальні явища та експерименти;
- надає візуалізацію не реального явища/елемента, а його спрощеної моделі (модель ідеального газу);
- можливість змінювати час/період протікання процесу, що неможливо реалізувати в реальних фізичних експериментах (відображення температури ОК в будь-який момент процесу).

В загальному випадку, застосування КМ дозволяє вирішити питання відсутності необхідного, часто дороговартісного, обладнання та безпеки проведення найсміливіших експериментів в реальних умовах.

Серед сучасних програмних продуктів автоматизації інженерно технічних задач (Computer-Aided Engineering, CAE-системи), що мають високу ефективність та використовуються для КМ теплових процесів, особливої популярності досягли наступні: Comsol Multiphysics, Ansys, Abaqus, SysWeld, Nastran [40].

12.1. Моделювання об'єктів простої форми у форматі 2D

Розглянемо можливості моделювання процесу нагріву поверхні ОК з використанням програмного продукту Comsol Multiphysics (далі Comsol). Comsol це потужне інтерактивне середовище для моделювання фізичних процесів та являє собою набір основних фізичних інтерфейсів для різних областей застосування фізики, таких як структурний аналіз, ламінарний потік, акустика, процеси в розведених розчинах, електростатика, електричні струми, теплообмін і Джоулів нагрів. Особливістю даного продукту є можливість одночасного застосування фізичних явищ різного типу, які вирішують пов'язані явища фізики.

Процес моделювання в Comsol передбачає ряд стандартних операцій:

1) вибір початкових налаштувань моделювання з зазначенням фізичних явищ (для моделювання теплових процесів це Heat Transfer), виду представлення моделі (площинне чи просторове) та параметру, зміну якого необхідно дослідити (наприклад, час).

2) вибір геометрії моделі, що передбачає побудову графічного представлення усіх елементів моделі ОК.

3) вибір та додавання до налаштувань моделі матеріалів елементів, що входять до графічного представлення моделі (наприклад, ОК та дефекту)

4) налаштування параметрів досліджуваного фізичного явища. У випадку теплового випромінювання вказуються початкові умови, значення зміни температури, вплив граничних умов тощо.

5) вибір значень досліджуваних параметрів для обрахунку моделі з урахуванням заданих характеристик.

Результати моделювання можна отримати в стандартних графіках або запрограмувати самостійно шляхом вибору даних для візуалізації та аналізу.

Процедура теплового контролю передбачає попередній нагрів об'єкту до певної температури і аналіз температурного поля об'єкта, що утворюється після нагріву. Якщо в об'єкті контролю присутній дефект типу раковини або тріщини, яка має інші теплофізичні характеристики, то це вплине на теплове поле всередині об'єкту та відобразиться на його поверхні у вигляді локальних змін температури. Таким чином, результатом КМ є побудова картини розподілу температури в об'єкті контролю.

Запропонована технологія моделювання процесу контролю складається з двох основних задач – створення моделі об'єкта контролю та визначення найбільш інформативних параметрів контролю [41]. Вирішення першої задачі потребує виконання наступних кроків: вказання граничних умов, коефіцієнтів для

системи рівнянь у частинних похідних, генерація кінцево-елементної сітки та розв'язання системи рівнянь і вибір режиму візуалізації. Друга задача передбачає побудову температурного профілю, визначення локальних змін температури в часі та визначення оптимального часу для контролю.

В якості прикладу можливостей КМ розглянемо моделювання процесу теплового неруйнівного контролю в форматі 2D. Об'єктом контролю виступає один з чавунних блоків печі, який має всередині дефект – несучільність у вигляді повітряної кульки. Припустимо, що протягом 30 секунд на верхню поверхню ОК діє температура печі 873К, а температура навколишнього середовища постійна і дорівнює 293К. Решту необхідних параметрів (коефіцієнт теплопровідності чавуну і повітря) можна знайти в довіднику та задати в програмі. Типове вікно налаштувань параметрів середовищ показано на рис. 12.1

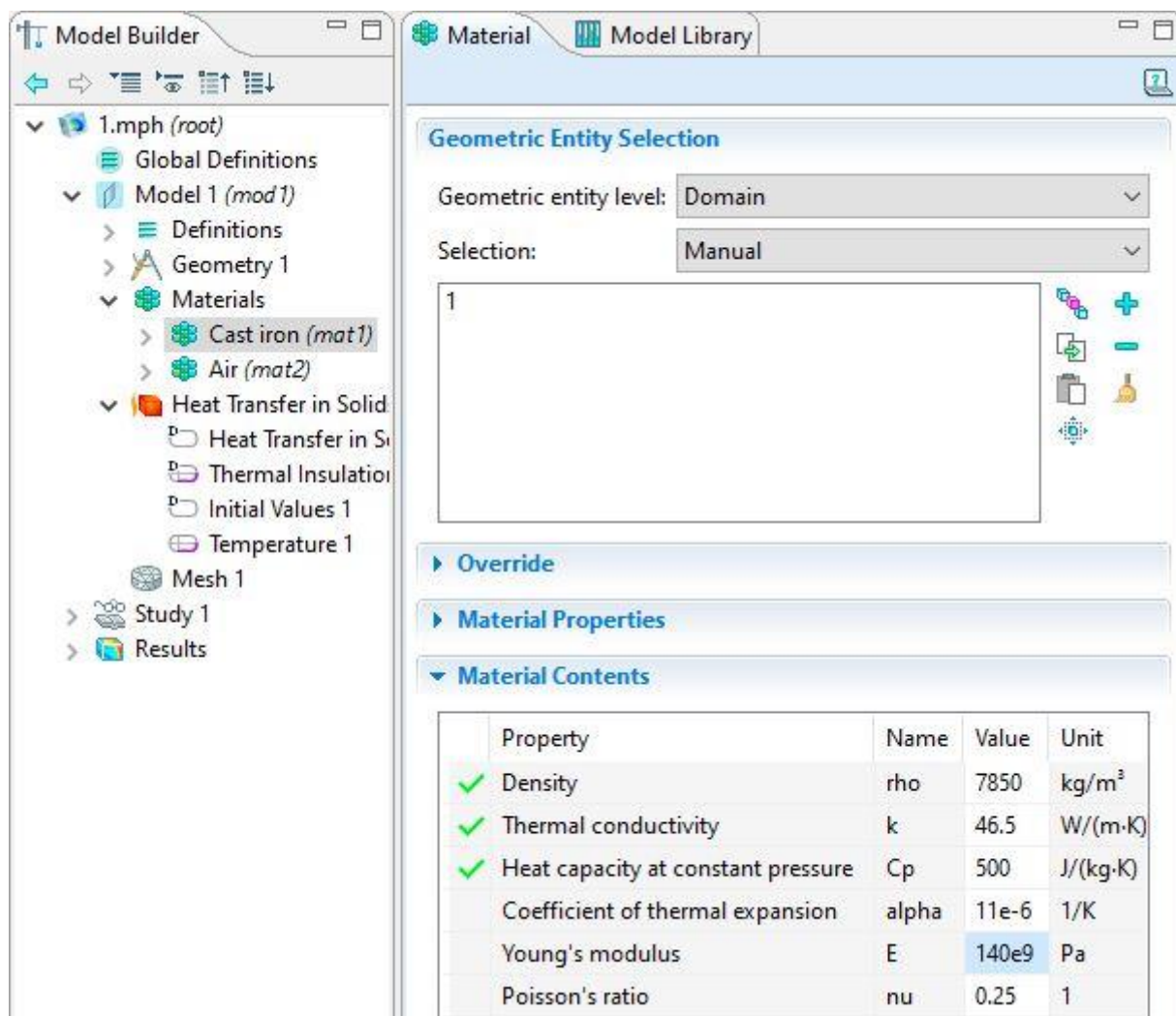


Рис. 12.1. Вікно налаштувань параметрів об'єкта з чавуну

На рис. 12.2 приведено переріз чавунного блоку з дефектом та розподіл температурного поля всередині цього блоку в певний момент часу. Отримана

термограма наочно демонструє, як наявність дефекту спотворює теплове поле всередині ОК.

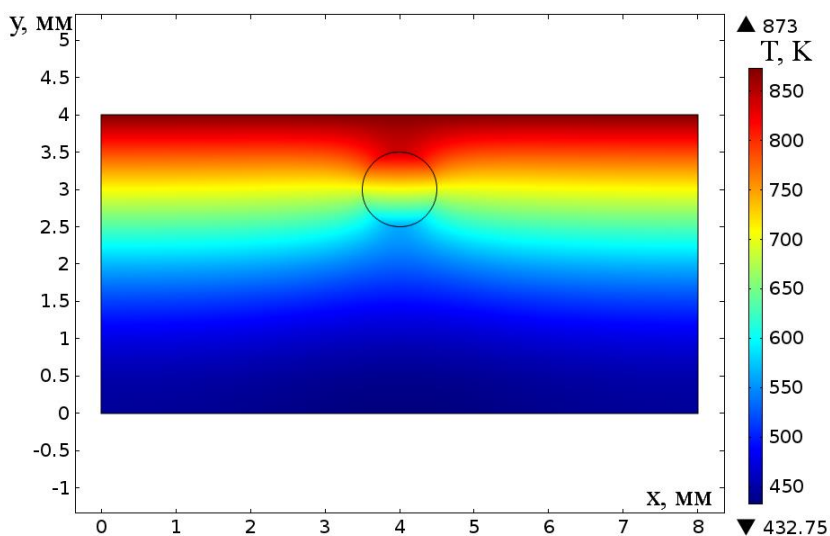


Рис. 12.2. Розподіл теплового поля в об'єкті з дефектом круглої форми

На рис. 12.3 представлено термопрофілі верхньої поверхні ОК в різні моменти часу. Як видно з графіків, наявність дефекту викликає нерівномірність температурного поля на поверхні ОК. У кожен наступний момент часу відмінність температури між точкою, де спостерігається пік температури (дефектна ділянка, $x = 4$ мм) і фіксованою точкою на поверхні ОК (бездефектна ділянка, наприклад $x = 6$ мм) спочатку збільшується, а потім зменшується. Максимальне значення перепаду температур досягається на 3 с, цей час і буде оптимальним часом для контролю [42].

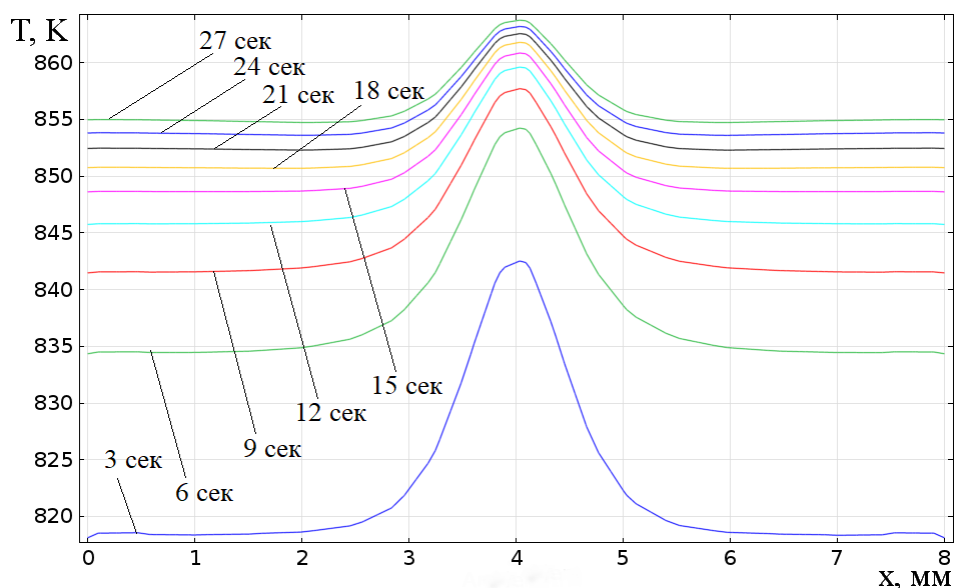


Рис. 12.3. Термопрофіль поверхні ОК в задані моменти часу

Оскільки теплопровідність повітряного дефекту значно менше ніж теплопровідність чавуну, то дефект буде чинити значний опір розповсюдженню

тепловому потоку який, обтікає дефект оточуючими шарами основного матеріалу і намагається проникнути в глиб ОК. При цьому має місце накопичення тепла в шарі над дефектом і його нестачу в шарі за ним, що проявляється в локальному підвищенні температури на поверхні, що нагрівається.

Таким чином, спостерігається локалізація температурного перепаду на ділянці над дефектом, який є інформативним параметром теплового неруйнівного контролю.

12.2. Моделювання стільникових структур у форматі 3D

У сучасному авіабудуванні широко використовуються конструкції з багатошарових композиційних матеріалів, які мають високу міцність і малу питому вагу. Значна частина фюзеляжу, крила, кіля та інших частин літака нового покоління виготовляють зі стільникових панелей. Несучі конструкції літака виконуються, як правило, зі стільникових панелей, що містять сплави алюмінію, а як заповнювач використовують алюмінієву фольгу. Деякі панелі виконують з полімерних композиційних матеріалів і заповнюють паперовими стільниками. Основними дефектами стільникових конструкцій є відшарування обшивки від заповнювача, внаслідок непроклею або зминання стільника. Ці дефекти можуть виникати як при експлуатації літального апарату, так і під час виготовлення стільникової панелі в результаті порушення технологічного процесу. Найбільш небезпечним дефектом вважається потрапляння води в стільникові структури елементів літака. При низьких температурах вода замерзає і збільшує свій об'єм, що призводить до руйнування комірок стільників і істотно знижує міцність всієї конструкції панелі.

Останнім часом, для діагностики стільникових конструкцій стали застосовувати тепловий метод контролю, який має певні переваги в порівнянні з традиційними. Цей метод знайшов успішне застосування для контролю стану елементів конструкцій літаків в таких компаніях, як Airbus Industry, Boeing та ін.

На рис. 12.4 показано, як фахівець авіаційної компанії проводить контроль стільникової панелі тепловим дефектоскопом.

Результати теплового контролю демонструє рис. 12.5. На екрані комп'ютерного блоку ми бачимо теплове зображення стільникової панелі, на поверхні якої чітко проступають дві чорні плями. Це означає, що температура в області плям відрізняється від температури решти панелі. Неоднорідність теплового поля на поверхні панелі вказує на наявність дефектів структури саме у тому місці, де розташовані плями.

Разом з тим, у випадку, коли конструкція стільникової панелі виконана із сплавів алюмінію, використання теплового методу для контролю не є ефективним.

Проблему створює висока теплопровідність таких конструкцій, яка є причиною швидкоплинності теплових процесів в об'єкті, що ускладнює процедуру контролю.



Рис. 12.4. Контроль стільникової панелі тепловим дефектоскопом: 1 – нагрівач, 2 – інфрачервона камера, 3 – комп'ютерний блок обробки зображення

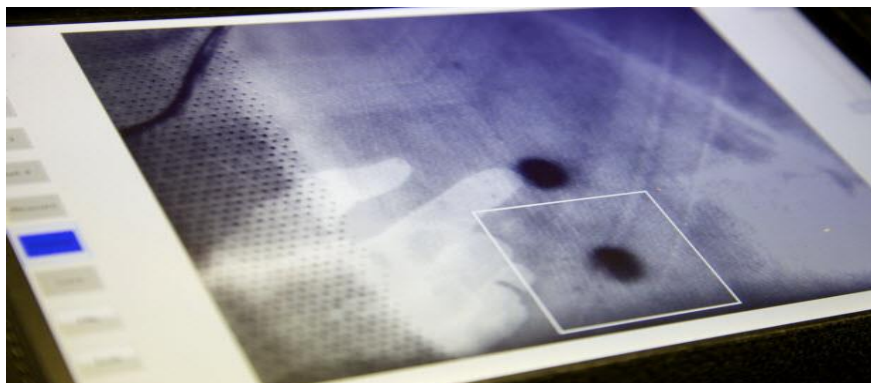


Рис. 12.5. Теплове зображення стільникової панелі з дефектами

З огляду на цю обставину, доцільно досліджувати можливості теплового методу контролю стільникових панелей, використовуючи комп'ютерне моделювання, яке дозволить візуалізувати невидимі для дослідника процеси та встановити оптимальні режими контролю.

Для реалізації моделювання використовуємо пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics і побудуємо в цьому середовищі тривимірну модель стільникової конструкції, яка має два види дефектів – відшарування обшивки від стільникового заповнювача і наявність води в осередку стільники. На рис. 12.6 представлений результат моделювання – тривимірна модель стільникового панелі з дефектами.

Процес контролю панелі тепловим методом можна описати математичною моделлю, яка реалізується при комп'ютерному моделюванні [13]. Всі теплові процеси, що протікають в об'єкті контролю, можна описати тривимірним нестационарним рівнянням теплопровідності:

$$c_n \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_n \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

де T – температура, t – поточний час, x, y, z – просторові координати точок, які аналізуються в n -й області.

$$(x, y, z) \in \sum_{n=1}^3 M_n; c_n, \rho_n, \lambda_n,$$

де c_n, ρ_n, λ_n теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровідності відповідно в n -й області.

Область $n = 1$ відповідає матеріалу стільникової панелі, $n = 2$ – повітряному дефекту, $n = 3$ – воді в заповнювачі. Модель містить три області, які відрізняються своїми теплофізичними властивостями. M_1 – область стільникової конструкції, M_2 – область дефекту типу відшарування, M_3 – область, що заповнена водою.

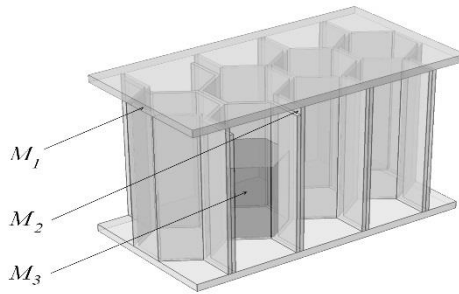


Рис. 12.6. Загальний вигляд тривимірної моделі стільникової панелі

На границях областей M_1 та M_2 (об'єкт – повітряний дефект), а також M_1 і M_3 (об'єкт - вода) має місце умова термічного сполучення, тобто граничні умови 4-го роду. Верхня поверхня панелі нагрівається від зовнішнього джерела. Зовнішні поверхні стільникової панелі (крім верхньої) беруть участь в процесі теплообміну з навколишнім середовищем за законом Ньютона, що відповідає граничним умовам 3-го роду. Початкові умови можуть бути задані в такий спосіб: $T|_{t=0} = T_0$.

У створеній для дослідження тривимірної моделі передбачається що верхня і нижня обшивки стільникової панелі виконані з алюмінію (область M_1) і простір між ними заповнений алюмінієвою фольгою. За умовами процедури контролю, верхня обшивка панелі нагрівалася до температури 313 і 373 К. На рис. 12.7 показані термограма верхньої обшивки стільникової панелі з дефектом (рис. 12.7 а) і сімейство термопрофілів (рис. 12.7 б). Як дефект розглядалося відшарування верхньої обшивки панелі від однієї комірки заповнювача і наявність води в тій же комірці. Термопрофілі були отримані після закінчення нагрівання, з часовим кроком в 0,1 сек.

Термограма отримана при нагріванні панелі з боку верхньої обшивки до температури 313 К. Представлений результат був отриманий через 0,15 с після

початку нагрівання. Як видно з малюнка, термограма не несе інформації про дефект, тому що має однорідне теплове поле. Наявність дефектів в структурі демонструє сімейство термопрофілей з верхньої обшивки панелі ($T = 373\text{K}$). Ми спостерігаємо різні значення температури над бездефектною та дефектною ділянками, різниця становить $0,4\text{ K}$. Однак, температурний градієнт триває всього десяті частки секунди, а через 3 сек ця різниця температури зникає зовсім. Це пояснюється високою теплопровідністю алюмінієвої конструкції.

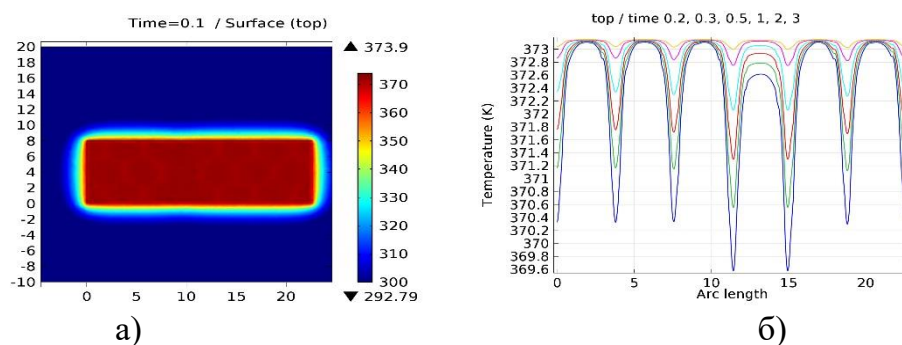


Рис. 12.7. Термограма верхньої обшивки алюмінієвої стільникової панелі з дефектами (а) і сімейство термопрофілей з тієї ж обшивки (б)

В результаті комп'ютерного моделювання були отримані результати, які практично неможливо отримати експериментальним шляхом через швидкоплинність теплових процесів. Отримані дані свідчать про те, що застосування теплового методу для контролю стільникових панелей, виконаних з алюмінієвих сплавів, пов'язане з певними технічними труднощами, я саме реалізувати в процесі контролю вимір незначного перепаду температури протягом 1 секунди із заданою точністю досить проблематично.

Для порівняння, проведемо аналогічні дослідження для стільникових панелей, виконаних з полімерних композиційних матеріалів. На рис. 12.8 показана термограма верхньої обшивки стільникової панелі (А) і часові залежності термопрофілю цієї ж поверхні (Б), виконаної з композиційного матеріалу. Малюнок демонструє спотворення теплового поля термограми і термопрофіля над дефектною коміркою, яка заповнена водою. На відміну від металеві панелі, різниця температур становить кілька десятків градусів і триває більше 3 сек .

Таким чином, умови контролю металевих панелей суттєво відрізняються від умов, що необхідні для контролю полімерних композиційних конструкцій.

Отримані результати підтверджують можливість застосування пакету прикладних програм COMSOL Multiphysics для дослідження технології активного теплового контролю стільникових панелей. КМ дозволяє візуалізувати теплові процеси, що протікають в об'єкті під час контролю та які неможливо визначити

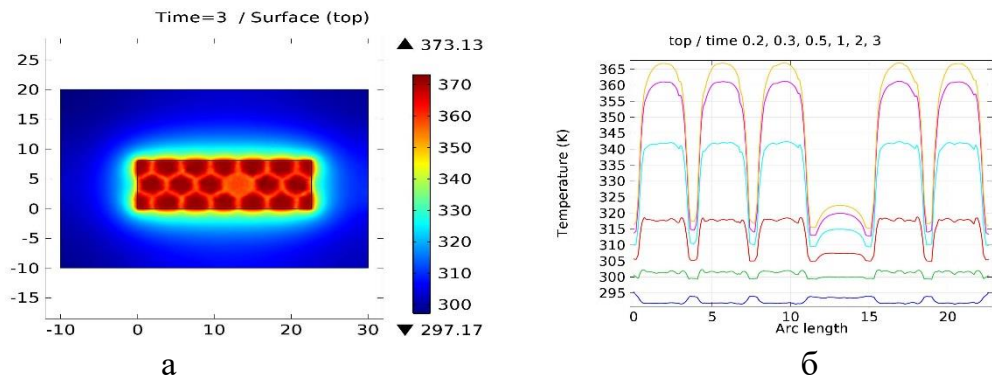


Рис. 12.8. Термограма верхньої обшивки дефектної стільникової панелі, що виконана з композиційного матеріалу (а) і сімейство термопрофілей з тієї ж обшивки (б)

експериментальним шляхом, а також встановити оптимальні параметри контролю. Програмний продукт COMSOL Multiphysics дає можливість при моделюванні змінювати розміри об'єкта контролю і його теплофізичні характеристики.

Запитання для перевірки

1. Поясніть основні переваги застосування КМ.
2. Проаналізуйте необхідність проведення стандартних операцій в процесі моделювання.
3. Що таке оптимальний час проведення контролю? Як він визначається у випадку КМ?
4. Наведіть випадки в яких доцільно використовувати КМ в форматі 2D.
5. Проаналізуйте переваги та недоліки використання КМ в форматі 3D.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення: ДСТУ 2865-94. – [Чинний від 01.01.1996]. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 52 с. – (Національний стандарт України)
2. Термометрія. Терміни та визначення. Зміна 1: ДСТУ 3518-97. – [Чинний від 01.10.2019]. – Київ: Держстандарт України, 2019 – 97 с. –(Національні стандарти України).
3. Міхєєв О. М. Інфрачервоне випромінювання: енциклопедія сучасної України [Електронний ресурс] / гол. редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2011. – Режим доступу: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=12491. – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики: издание 5-е, исправленное / Д. В. Сивухин. М.: Физматлит, 2006. – Т. II. Термодинамика и молекулярная физика – 2006. – 544 с.
5. Петрик В.Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі: навчальний посібник / В.Ф. Петрик, А.Г. Протасов. – Київ: НТУУ ”КПІ”, 2015. – 266 с.
6. Метрологія. Шкали температурні: ДСТУ 4017-2001. – [Чинний від 01.01.2002]. – Київ: Держстандарт України, 2001 – 30 с. –(Національні стандарти України).
7. Методи вимірювання температури [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://4ua.co.ua/physics/xa3bd69b5c53b89521306c37_0.html. – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.
8. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенський. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
9. The Boomerang Nebula – the coolest place in the Universe [Електронний ресурс] / European Space Agency, NASA. – USA: Space Telescope Science Institute, 2021. – Режим доступу: <https://www.spacetelescope.org/images/heic0301a/>. – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.
10. Де відбувається найхолодніший експеримент у Всесвіті [Електронний ресурс] / веб-портал Інформатор. – Київ: Інформатор, 2018. – Режим доступу: <https://life.informator.press/de-vidbuvaet-sia-naykholodnishyy-eksperyment-u-vsesviti/>. – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.
11. Кокс Б. Квантовая вселенная. Как устроено то, что мы не можем увидеть / Кокс Б., Форшоу Д. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 283 с.

12. Death Valley, California (042319): Period of Record Monthly Climate Summary [Електронний ресурс] / Providing climate services. – USA: Western Regional Climate Center, 2021. – Режим доступу: <https://wrcc.dri.edu/cgi-bin/cliMAIN.pl?ca2319> – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.

13. Protasov A. Active infrared testing of composites using 3D computer simulation / A. Protasov // International Journal of Technology. – 2018. – Vol. 9, Iss. 3: April, 2018. – P. 631-640. DOI: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i3.218>

14. Протасов А. Г. Моделирование процедуры контроля сотовых панелей тепловым методом / А. Г. Протасов // Научные известия. – Болгария, 2015. – № 2 (165). – С. 63-65. ISSN: 1310 -3946.

15. Protasov A. Reconstruction of the Thermal Field Image from Measurements in Separate Points / A. Protasov // Conf. proceed. of IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium. – Kyiv, Ukraine, 2017. – Aug. 29-31. – P. 89-92.

16. Ширан Н. В. Люмінофори: енциклопедія сучасної України [Електронний ресурс] / гол. редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2017. – Режим доступу: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=59942. – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.

17. DFP 2000 The Latest in Disappearing Filament Optical Pyrometers [Електронний ресурс] / Spectrodynе, Inc. – USA, 2020. – Режим доступу: <http://www.spectrodynе.com/DFP2000/> – (дата звернення: 02.03.2021). – Назва з екрану.

18. Model HW-101558 “Classic Photoscrenic Wedge Type” Optical Pyrometer [Електронний ресурс] / HeatWave Labs, Inc. – USA, 2018. – Режим доступу: <https://www.cathode.com/pdf/tb-203.pdf>. – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.

19. Протасов А.Г. Пирометр с FRAM-памятью / А.Г. Протасов, А.С. Корогод // Сб. докладов 6-й Междунар. н-т конфер. „Приборостроение 2013”. – Минск, Беларусь, 2013. – С. 68-70. ISBN 978-985-550-757-5.

20. PyroCube XS Focused Optics for Measuring Extremely Small Targets [Електронний ресурс] / IOThrifty. – UK, 2020. – Режим доступу: <https://www.iothrifty.com/products/pyrocube-xs-measuring-small-targets>. – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.

21. Коваленко В.Ф. Загальна фізика у прикладах, запитаннях і відповідях. Оптика : навчальний посібник / В. Ф. Коваленко, І. М. Халімонова, Н. П. Харченко, В. М. Стецюк. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2012. – 447 с.

22. Романюк М. О. Оптика / М. О. Романюк, А. С. Крочук, І. П. Пашук. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. – 564 с.

23. Circles of Confusion for Digital Cameras [Електронний ресурс] / Dofmaster. – USA, 2005. – Режим доступу: http://www.dofmaster.com/digital_coc.html – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.
24. Tyagur V. M. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat / V. M. Tyagur, O. K. Kucherenko and A. V. Murav'ev // Journal of Optical Technology. – 2014. – vol. 81 (4). – P. 199-203.
25. 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.
26. Джемисон Д.Э. Физика и техника инфракрасного излучения / Д.Э. Джемисон. – М.: Рипол Классик, 2013. – 646 с.
27. Воронцов М.А. Управляемые оптические системы / М. А. Воронцов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 268 с.
28. Тепловізори – скануючі пристрої та траєкторії сканування [Електронний ресурс] / Электрические сети – 2016. – Режим доступу: <https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/teplovizory-4.html> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.
29. Что такое CCD-матрица: приборы с зарядовой связью (ПЗС). Принцип работы ПЗС [Електронний ресурс] / Компьютерный портал. – 2019. – Режим доступу: <https://crabo.ru/hardware-solutions/chto-takoe-ccd-matrica-pribory-s-zaryadovoi-svyazuu-pzs-princip-raboty.html> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.
30. Носов Ю.Р. Приборы с зарядовой связью / Ю. Р. Носов. – М.: Знание, 1989. – 64 с.
31. Лисиця В. Т. Колірні моделі та закони поширення світла / В. Т. Лисиця. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. – 82 с.
32. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений: справочник / М. Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 1041 с.
33. Что такое дрон? [Електронний ресурс] / Онлайн журнал о дронах – 2021. – Режим доступу: <https://dronomania.ru/faq/chto-takoe-dron.html> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.
34. 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.
35. Куц Ю.В. Электромагнитные методы неруйнівного контролю. Ч1:Магнітний неруйнівний контроль [Електронний ресурс] / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко,

В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012, 138 с. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/1913> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.

36. Поплавко Ю.М. Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. / Ю. М. Поплавко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с.

37. Тепловой метод неразрушающего контроля: Презентации [Електронний ресурс] / Doccity, ИФНТУНГ. – 2017. – Режим доступу: <https://www.doccity.com/ru/teplovoy-metod-nerazrushaeshchego-kontrolya/2056689/> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.

38. Толок В.А. Метод конечных элементов: теория, алгоритмы, реализация / В.А.Толок [и др.]. – Київ: Наук. думка, 2003. – 316 с.

39. Есьман Р. И. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах / Р. И. Есьман, В. Ф. Шевцов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. –2006. – №5. – С. 62-67.

40. Мышковец В.Н. Компьютерное моделирование тепловых процессов в лабораторном практикуме / В.Н. Мышковец, А.В. Максименко, Г.А. Баевич// Ж-л Наукові записки. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. –2013. – Вип. 4 (I). – С. 73-75.

41. Протасов А. Г. Исследование возможностей компьютерного моделирования для решения задачи тепловой дефектометрии / А. Г. Протасов, К. М. Серый, А. В. Глущенко // Вісник НТУУ „КПІ”, серія Приладобудування. – 2014 – № 47(1). – С. 79-84.

42. 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.