

УДК 536.521.2

Н. С. Гоц, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

## КРИТЕРІЇ ФОРМУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНИХ МЕТОДІВ ТЕРМОМЕТРІЇ ВИПРОМІНЕННЯ

В статті запропоновано критерії формуванні спектральних каналів для реалізації багатоканальних методів термометрії випромінювання. На формування вихідного сигналу окремого спектрального каналу термометра випромінювання впливають спектральна чутливість, потужність сигналу та особливості методу вимірювання, тому пропонується систему критеріїв розділити на три групи згідно цих ознак.

**Ключові слова:** *термометрія випромінювання, спектральний канал, спектральна чутливість.*

**Постановка проблеми.** Основною проблемою термометрії випромінювання є незадовільна точність вимірювання температури, що переважно, зумовлено значною методичною похибкою внаслідок відсутності в умовах вимірювань достовірної інформації про значення коефіцієнта випромінювання об'єкта.

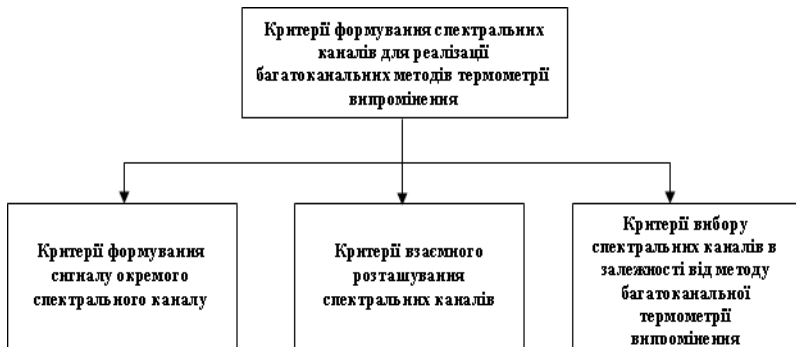
**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для підвищення точності вимірювання температури за випромінюванням доцільно використовувати багатоканальні методи, згідно яких значення температури визначається за певним алгоритмом опрацювання вихідних сигналів приймача випромінювання в декількох спектральних каналах [1, с. 98—240]. Це дозволяє отримувати більше інформації про випромінювальні властивості об'єкту і зменшувати вплив випромінювальних характеристик об'єктів на результати вимірювання температури по випромінюванню.

Збільшення числа використовуваних спектральних каналів веде до зменшення методичної складової і зростання інструментальної похибки вимірювання температури по випромінюванню, що зумовлює доцільність створення більш високоточних термометрів випромінювання для багатоканальної пірометрії [2, с. 39—50]. На основі дослідження точності визначення термодинамічної температури різними методами термометрії випромінювання визначено, що кількість спектральних каналів не має перевищувати чотирьох.

**Постановка задачі.** Застосування багатоканальних методів термометрії випромінювання зумовлює необхідність оптимізації вибору

ширини і місцезоташування спектральних ділянок спектральних каналів, врахування немонохроматичності випромінювання.

**Основний матеріал дослідження.** На формування вихідного сигналу кожного спектрального каналу багатоканального термометра випромінювання впливають спектральна чутливість, потужність сигналу, особливості методу вимірювання температури та ін. Тому для реалізації багатоканальних методів термометрії випромінювання запропоновано систему критеріїв, яка включає три групи згідно рисунку 1.



*Рис. 1. Системна класифікація критеріїв формування спектральних каналів для реалізації багатоканальних методів термометрії випромінювання*

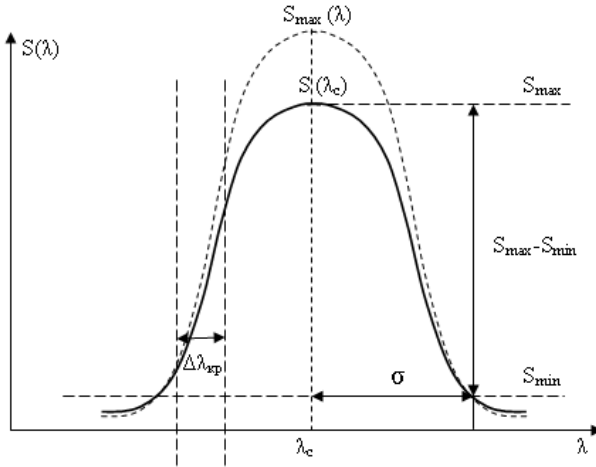
*Критерії формування сигналу окремого спектрального каналу.* При взаємодії потоку випромінювання та спектральної чутливості вихідний сигнал приймача випромінювання можна моделювати у вигляді нормального закону розподілу [3, с. 98—151, 4, с. 100—112] згідно рівняння 1 та рисунку 2:

$$S(\lambda) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

де  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення,  $\lambda_c$  — середнє значення довжини хвилі, що відповідає максимальному значенню спектральному розподілу вихідного сигналу.

Для вихідного сигналу приймача випромінювання можна сформулювати наступні критерії:

- максимальна потужність сигналу;
- максимальна виявна здатність інформативного вихідного сигналу приймача випромінювання.



**Рис. 2.** Спектральний розподіл вихідного сигналу приймача випромінювання  
Для реалізації даних критеріїв визначені наступні вимоги:

1. Максимальне співвідношення сигнал/шум  $\frac{S_i}{S_{nois}} \rightarrow \max$ .
2. Висока контрастність сигналу  $\frac{S_{\max}}{S_{\min}} \rightarrow \max$ .
3. Висока гранична крутизна  $\Delta\lambda_{кр} \rightarrow \min$ .
4. Малі втрати потужності сигналу  $S_{\max} \geq 0,8S_{id}$ .

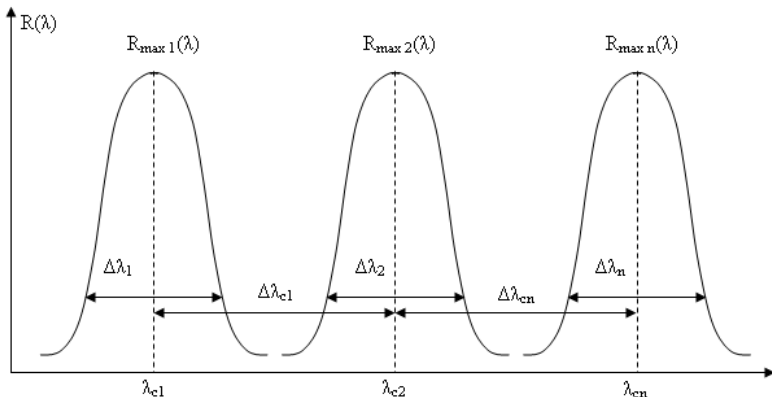
Виконання даних вимог дозволить сформувати вихідний сигнал приймача випромінювання максимальної потужності та виявної здатності.

*Критерії взаємного розташування спектральних каналів.* Чутливості окремих спектральних каналів мають бути однаковими. Спектральна чутливість окремих спектральних каналів відповідає нормальному закону розподілу, але різниться по спектру згідно рисунку 3:

$$R_i(\lambda) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\lambda - \lambda_{iC})^2}{2\sigma_R^2} \right]. \quad (2)$$

Для реалізації однакового сприйняття випромінювання спектральними каналами (СК) термометра випромінювання необхідна реалізація наступних критеріїв:

- незалежність чутливостей окремих СК;
- рівність параметрів СК.



**Рис. 3.** Взаємне розташування розподілів чутливості спектральних каналів термометра випромінення

На підставі вибраних критеріїв визначено наступні вимоги до співвідношення параметрів спектральних каналів:

1. Незалежність функцій чутливості окремих спектральних каналів:

$$k_1 R_1(\Delta\lambda, T) + k_2 R_2(\Delta\lambda, T) = k_3 R_3(\Delta\lambda, T). \quad (3)$$

2. Рознесення по спектру середніх значень довжини хвилі, що відповідають максимальним значенням чутливостей спектральних каналів.

$$\lambda_{c1} \neq \lambda_{c2} \neq \lambda_{ci}. \quad (4)$$

3. Однакові форма (висота та дисперсія) нормальних розподілів спектральних каналів

$$\begin{cases} R_{\max 1} = R_{\max 2} = R_{\max i} \\ \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_i \end{cases}. \quad (5)$$

*Критерії вибору спектральних каналів в залежності від методу багатоканальної термометрії випромінення.* Вихідні сигнали приймачів випромінення в різних спектральних каналах при вимірювання температури  $T$  схематично зображені на рисунку 4.

Критерієм вибору спектральних каналів залежно від методу термометрії випромінення обрано мінімальну похибку вимірювання температури. Для реалізації даних критеріїв сформульовано наступні вимоги до вихідного сигналу приймача випромінення.

1. Рознесення нормальних розподілів вихідних сигналів.

$$S_1(\lambda_{c1}, T) < S_2(\lambda_{c2}, T) < S_n(\lambda_{cn}, T)$$

або

$$S_1(\lambda_{c1}, T) > S_2(\lambda_{c2}, T) > S_n(\lambda_{cn}, T)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{або} & (6) \\
 & S_1(\lambda_{c1}, T) < S_2(\lambda_{c2}, T); S_2(\lambda_{c1}, T) > S_n(\lambda_{cn}, T); S_1(\lambda_{c1}, T) < S_n(\lambda_{cn}, T) \\
 & \text{або} \\
 & S_1(\lambda_{c1}, T) < S_2(\lambda_{c1}, T); S_2(\lambda_{c1}, T) > S_n(\lambda_{cn}, T); S_1(\lambda_{c1}, T) > S_n(\lambda_{cn}, T)
 \end{aligned}$$

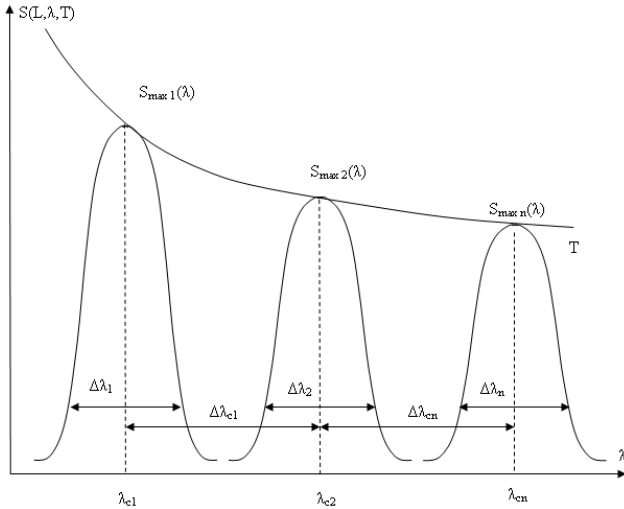


Рис. 4. Вихідні сигнали приймача випромінення в різних спектральних інтервалах для одного значення температури  $T$

2. Однозначність визначення температури багатоканальним методом термометрії випромінення згідно рисунку 5.

$$T = f(k), \text{ де } k = F[S_i^p(\lambda_{cn})] \text{ при } p \in \{-1; 0; 1\}. \quad (7)$$

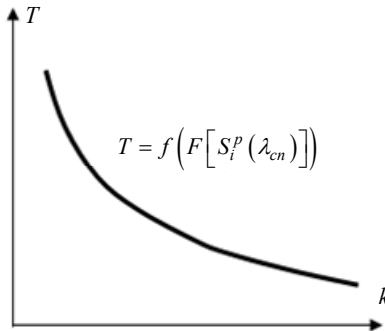


Рис. 5. Однозначність між співвідношенням вихідних сигналів багатоканального методу термометрії випромінення при вимірюванні температури  $T$

3. Максимальне наближення значення умовної температури до значення термодинамічної температури, які визначаються за наступною узагальненою формулою:

$$T = \frac{T_{ум} \cdot C_2}{C_2 - k_i T_{ум} \cdot \Lambda_{ум} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(\varepsilon_i))}, \quad (8)$$

де  $T_{ум} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i)$ .

Згідно (8), для зменшення значення похибки визначення радіаційної температури даним методом, критерієм вибору значень робочих ефективних довжин хвиль спектральних каналів детектора є мінімальне значення наступного виразу:

$$\lim \left[ k_i \cdot \Lambda_{ум} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(\varepsilon_i)) \right] \longrightarrow \min. \quad (9)$$

Значення виразу може прямувати до нуля в наступних випадках. По-перше, при наближенні  $\varepsilon$  до 1. Це проблематично, оскільки коефіцієнт випромінювання різниться у різних матеріалів і змінюється в широких межах не тільки з довжиною хвилі, але і з температурою. Фактично мінімізація співвідношення (9) досягається шляхом підбору ефективних значень спектральних каналів пірометра такими, щоб еквівалентна довжина хвилі використовуваного методу пірометрії була мінімальною. Це зумовлює вимоги до взаємного розташування по спектру робочих спектральних каналів приймача випромінювання.

#### 4. Нормування вихідних сигналів

$$\begin{cases} x = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \\ y = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \\ z = \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \end{cases}. \quad (10)$$

5. Важливим питанням є взаємне розташування по спектру окремих спектральних каналів згідно рис. 6. Вихідний сигнал, який залежить від вихідних сигналів спектральних каналів термометра випромінювання. Значення температури визначається за співвідношенням вихідних сигналів спектральних каналів термометра випромінювання та залежить від розташування середніх значень довжин хвиль спектральних каналів та відстані між їх центрами

$$T = f(\lambda_{C1}, \lambda_{C2}, \dots, \lambda_{Ci}, \Delta\lambda, K) = f(p_i) \quad (11)$$

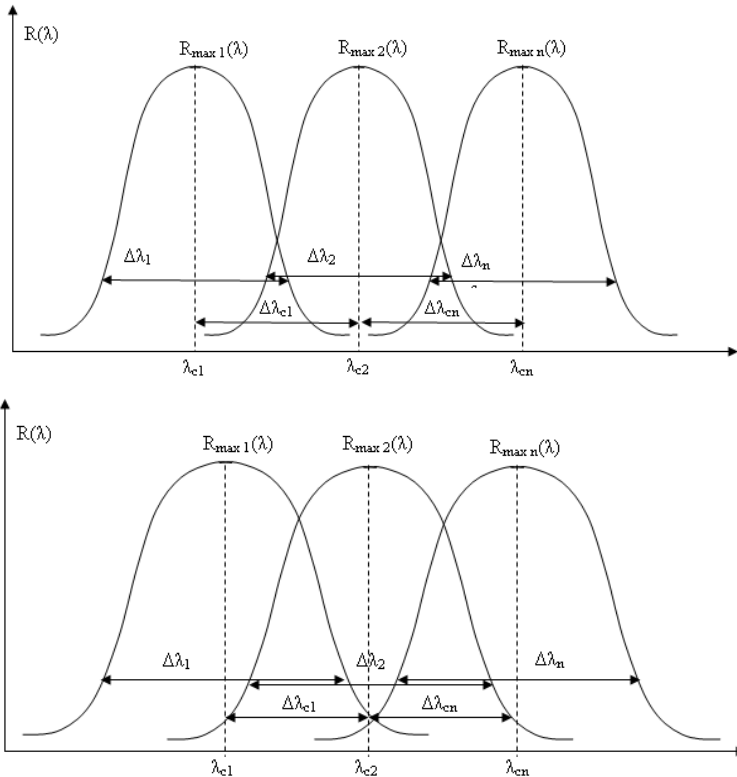
де  $\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \dots = \Delta\lambda_i = const$ ,  $p_i$  —  $i$ -тий параметр рівняння.

Похибка визначення температури з використанням декількох спектральних каналів залежатиме від параметрів їх взаємного розташування — середніх значень довжин хвиль спектральних каналів та відстані між їх центрами.

$$\delta T = \sum_{s=1}^n \frac{\partial T}{\partial p_i} = \frac{\partial T}{\partial \lambda_{c1}} + \frac{\partial T}{\partial \lambda_{c2}} + \dots + \frac{\partial T}{\partial \lambda_{cn}} + \frac{\partial T}{\partial \Delta \lambda} \quad (12)$$

Умовою оптимального взаємного розташування середніх значень довжин хвиль спектральних каналів та відстані між їх центрами буде таке їх розташування, коли похибка визначення температури прямуватиме до 0, а значить сума часткових похідних по  $\lambda_{Ci}$  та  $\Delta \lambda$  прямуватиме до нуля.

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial p_i} \rightarrow 0 \quad (13)$$



**Рис. 6.** Варіанти взаємного розташування розподілів чутливості спектральних каналів термометра випромінювання

А отже, розв'язання рівняння дозволяє встановити залежність

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda_{C1}} + \frac{\partial T}{\partial \lambda_{C2}} + \dots + \frac{\partial T}{\partial \lambda_{Ci}} + \frac{\partial T}{\partial \Delta \lambda} = 0 \quad (14)$$

В результаті розв'язання рівняння отримуємо співвідношення між середніми значеннями довжин хвиль спектральних каналів  $\lambda_i$  та відстані між їх центрами  $\Delta \lambda$ , де  $\Delta \lambda = f(\lambda_{Ci})$ .

Розглянемо приклад оптимального вибору розташування двох спектральних каналів для методу спектрального відношення. Для АЧТ температура методом спектрального відношення визначається за наступною формулою.

$$T^{-1} = -\frac{\Lambda}{C_2} \cdot \ln \frac{L_2}{L_1}, \text{ де } \Lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}, k = \frac{L_2}{L_1}. \quad (15)$$

За умови  $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta \lambda$  отримуємо вираз:

$$T = \frac{\Delta \lambda \cdot C_2}{(\lambda^2 + \lambda \Delta \lambda) \cdot \ln(K)}. \quad (16)$$

Сума часткових похідних по  $\lambda$  та  $\Delta \lambda$  виразу температури матиме вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial(\lambda, \Delta \lambda)} &= \frac{C_2}{(\lambda^2 + \lambda \Delta \lambda) \ln(K)} - \\ &- \frac{C_2 \lambda \Delta \lambda}{(\lambda^2 + \lambda \Delta \lambda)^2 \ln(K)} - \frac{C_2 \Delta \lambda (2\lambda + \Delta \lambda)}{(\lambda^2 + \lambda \Delta \lambda)^2 \ln(K)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для методу спектрального відношення оптимальна залежність між середніми значеннями довжин хвиль спектральних каналів  $\lambda_i$  та відстані між їх центрами  $\Delta \lambda$  має вигляд:

$$\Delta \lambda = \lambda (1 \pm \sqrt{2}) \quad (18)$$

Отже, для того, щоб похибка визначення температури від взаємного розташування спектральних каналів термометра випромінювання при реалізації методу спектрального відношення прямувала до 1, необхідно, щоб виконувалося співвідношення  $\Delta \lambda_{\min} \rightarrow \lambda (1 + \sqrt{2})$ .

**Висновок.** Отже, в результаті можна сказати, що на підставі сформульованих критеріїв та вимог визначаються оптимальні параметри спектральних каналів багатоканального термометра випромінювання, який використовується в певному спектральному та температурному



діапазоні та реалізує відповідні багатоканальні методи вимірювання температури. Це дає можливість розроблення та побудови багатоканальних термометрів випромінювання з різними алгоритмами обчислення умовної і термодинамічної температури та оптимального вибору методу в залежності від умов вимірювання та властивостей об'єкта.

### Список використаних джерел:

1. Снопко В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения / В. Н. Снопко. — Минск : Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 1999. — 224 с.
2. Гоц Н. Є. Сравнительная характеристика методов пирометрии / Н. Є. Гоц // Научно-технический журнал «Приборы + Автоматика». — 2007. — С. 35–50.
3. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання : в 3 т. / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра, В. В. Григор'єв, В. Каліта, О. М. Мельник, Є. Потєцькі, В. В. Черпак ; за ред. З. Ю. Готри. — Львів : Ліга-Прес, 2007. — Т. 3, кн. 1. — 249 с.
4. Яцишин С. Отклонения тепловых шумов в материалах при низких температурах от равновесных значений. Mereni teplotv priemusly / С. Яцишин, Б. И. Стадник, З. А. Колодий. — Praha : CSVTS, Dum Techniki, 1989. — S. 102–112.

The article proposed the formation of spectral criteria channels of multichannel radiation thermometry techniques. The formation of a single output spectral channel radiation thermometer influence spectral sensitivity, signal strength and features measurement method, the proposed system of criteria de divided into three groups according to these characteristics.

**Key words:** *radiation thermometry, spectral channel, the spectral sensitivity.*

Отримано: 23.03.2012