

кодових послідовностей. При цьому максимально можливе число помилок, що виправляється, становить 25% від загального числа розрядів коду. Порівняно з існуючими методами синтезу коригувальних кодів, запропоновані методи не вимагають обов'язкового пошуку твірних поліномів та побудови мінімальних незвідних в полі Галуа GF (2) поліномів, як передбачено в алгоритмі синтезу кодів, запропонованих Боузом, Чоудхурі та Хоквінхемом (кодів БЧХ). Результати досліджень можуть знайти практичне застосування для розроблення інформаційних технологій та систем з поліпшеними технічними характеристиками за такими показниками, як забезпечення достовірності інформації, підвищення надійності, функціональної безпеки і живучості інформаційних та інформаційно-управляючих систем.

1. Цымбал В.П. *Теория информации и кодирование*. – К.: Вища школа, 1982. – 304 с. 2. Питерсон У., Уэлдон Э. *Коды, исправляющие ошибки*. – М.: Сов. Радио, 1974. – 590 с. 3. Берлэкэмп Э. *Алгебраическая теория кодирования*. – М.: Мир, 1971. – 478 с. 4. Різник В.В. *Синтез оптимальних комбінаторних систем*. – Львів: Вища школа, 1989. – 168 с.

УДК 536.521.2

Н. Гоц

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

МОДЕЛЮВАННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕТОДАМИ ДВОКАНАЛЬНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ ВИПРОМІНЕННЯ

© Гоц Н., 2011

Наведено огляд двоканальних методів вимірювання температури об'єктів за випроміненням. На основі комп'ютерного моделювання проаналізовано інструментальну та методичну складові похибки вимірювання температури цими методами. Визначено умови, за яких доцільне їх застосування, та загальні недоліки використання цих методів.

Ключові слова: температура за випроміненням, похибка вимірювання, методи пірометрії.

In the article the review of twochannel methods of measuring of temperature of objects is conducted after a radiation. On the basis of computer design the analysis of instrumental is conducted and methodical constituents of error of measuring of temperature by these methods. Certainly terms, which their expedient application, and general lacks of the use of these methods, is for.

Key-words: radiation temperature, measurement error, methods of pyrometry.

Актуальність та постановка задачі

Для дослідження фізичних властивостей речовин, контролю природних явищ та технологічних процесів широко застосовуються такі безконтактні засоби вимірювання температури, як двоканальні термометри випромінення [1,2,3].

Вони функціонують на основі методів двоканальної термометрії випромінення (ДКТВ), а саме на основі вимірювання спектральної енергетичної яскравості на двох спектральних ділянках випромінення, утворення їх різних комбінацій та прирівнювання до аналогічних комбінацій яскравостей абсолютно чорного тіла (АЧТ) при тій самій температурі. В результаті розвитку теоретичної бази пірометрії існує велика кількість локальних методів ДКТВ, які розрізняються способом опрацювання інформації, що несе потік випромінення від поверхні досліджуваного об'єкта. Сьогодні розроблені промислові моделі термометрів випромінення переважно ґрунтуються лише на одному методі – методі

спектрального відношення, який використовується лише за умови селективності досліджуваного об'єкта та відсутності впливу проміжного середовища на потік випромінення від досліджуваного об'єкта. Використання мікропроцесору дає можливість застосовувати одночасно зразу декілька методів термометрії випромінення. Отже, дослідження особливостей використання різних методів двоканальної термометрії випромінення в різних умовах є актуальним.

Огляд методів двоканальної термометрії випромінення

Для аналізу існуючих локальних методів двоканальної пірометрії та визначення умов їх застосування доцільно провести огляд існуючих методів та порівняння їх за точністю вимірювання температури за випроміненням.

Двоканальні методи термометрії випромінення поділяються на дві основні групи:

- методи двоканальної монохроматичної пірометрії;
- методи двоканальної широкоспектральної пірометрії.

Методи монохроматичної двоканальної пірометрії ґрунтуються на вимірюванні спектральної енергетичної яскравості об'єкта дослідження (ОД) на двох робочих довжинах хвиль випромінення, утворенні їх різних комбінацій та прирівнюванні до аналогічних комбінацій яскравостей АЧТ при тій самій температурі. Вони використовуються з метою зменшення похибки від відсутності або неточності інформації про значення коефіцієнта випромінення досліджуваної поверхні. Найвідоміші методи монохроматичної двоканальної пірометрії та формули визначення відповідної умовної та термодинамічної температури локального методу наведено в табл. 1.

У табл. 1 використані наступні позначення: С1 та С2 – сталі [3]; λ_1 та λ_2 – робочі довжини хвилі відповідно для першого та другого каналу пірометра; Т – термодинамічна температура; ϵ_1 та ϵ_2 – значення коефіцієнтів випромінення при відповідних значеннях довжин хвиль, α – показник степеня; L – еквівалентна довжина хвилі методу ДКТВ; I₁ та I₂ – виміряна інтенсивність випромінення відповідним спектральним каналом пірометра; інваріант J – вираз, утворений шляхом нелінійного перетворення спектральних інтенсивностей випромінення; q₁ та q₂ – вагові коефіцієнти.

У результаті аналізу формул визначення термодинамічної температури різними методами монохроматичної ДКТВ можна сформулювати узагальнений вираз визначення умовної та термодинамічної температури:

$$T = \frac{T_{ум} \cdot C_2}{C_2 - k_i T_{ум} \cdot L_{ум} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(e_i))}, \quad \text{де } T_{ум} = \frac{C_2}{L_{ум} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \ln(I_i))}, \quad (1)$$

де – a_i та b_i коефіцієнти, які залежать від обраного методу; i – кількість робочих спектральних каналів ДКТВ, i=2; L_{ум} – еквівалентна довжина хвилі відповідного методу монохроматичної ДКТВ; k_i = ±1 залежно від використаного методу.

Методи широкополосної двоканальної пірометрії ґрунтуються на вимірюванні спектральної енергетичної яскравості об'єкта дослідження (ОД) в двох робочих спектральних інтервалах випромінення, утворенні їх різних комбінацій та прирівнюванні до аналогічних комбінацій яскравостей АЧТ при тій самій температурі (табл.2). На практиці вимірювання спектральної яскравості завжди здійснюється не на фіксованій довжині хвилі, а згідно з (2) у деякому спектральному інтервалі, який задається оптичним каналом та параметрами приймача випромінення пірометра:

$$U(I, T) = k \cdot \int_{I_1}^{I_2} y(I, T) \cdot L(I, T) dl ; \quad (2)$$

Але використання (5) викликає такі труднощі: складність визначення апаратної функції $\Psi(\lambda)$, необхідність розрахунку калібраційної кривої та проведення чисельного інтегрування. Ці недоліки усуваються при використанні наближень, за якими реєстрація широкополосного випромінення заміняється монохроматичною або інтегральною реєстрацією випромінення.

Тому в двоканальній широкополосній пірометрії при переході від запису сигналу (2), що реєструє широкополосне випромінення до монохроматичної реєстрації, використовують методи врахування немонохроматичності спектрального каналу шляхом введення поняття ефективної довжини хвилі (ЕДХ) та різних видів ЕДХ, таких як: гранична ЕДХ; референсна ЕДХ; середньозважена ЕДХ.

Методи монохроматичної двоканальної термометрії випромінення

Назва методу монохроматичної ДКТВ	Формула визначення умовної температури монохроматичної ДКТВ	Формула термодинамічної температури
Метод спектрального відношення [4]	$T_{\kappa}^{-1} = -\frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{I_2}{I_1}$	$T^{-1} = T_{\kappa}^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2}{e_1}$
Взаємкореляційний метод [4]	$T_{\text{вк}}^{-1} = -\frac{L_{\text{вк}}}{C_2} \cdot \ln(I_1 \cdot I_2)$	$T^{-1} = T_{\text{вк}}^{-1} + \frac{L}{C_2} \cdot \ln(e_1 \cdot e_2)$
”Оптимальний” метод визначення температури за власним випроміненням шляхом нелінійного перетворення з інваріантним сигналом [4]	$\text{онм}T_{\text{я1}}^{-1} = T_{\text{я1}}^{-1} + \frac{I_1}{C_2 \cdot (I_2 - I_1)} \cdot J_{2,1}$ $\text{онм}T_{\text{вк1}}^{-1} = T_{\text{вк1}}^{-1} + \frac{2I_1 I_2}{C_2 \cdot (I_2^2 - I_1^2)} \cdot J_{2,1}$	$T^{-1} = \text{онм}T_{\text{я1}}^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2}{e_1}$ $T^{-1} = \text{онм}T_{\text{вк1}}^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2}{e_1}$
Метод визначення комбінованої середньояскравісної температури $T_{\text{ср}}^{-1} = 0,5(T_{\text{я1}}^{-1} + T_{\text{я2}}^{-1})$ [5]	$T_{\text{ср}}^{-1} = -\frac{I}{2C_2} \cdot (I_1 \ln I_1 + I_2 \ln I_2)$	$T^{-1} = T_{\text{ср}}^{-1} + \frac{I}{2C_2} \cdot (I_1 \ln e_1 + I_2 \ln e_2)$
Метод визначення комбінованої температури $T_{\kappa}^{-1} = 0,5(T_{\text{ц}}^{-1} + T_{\text{вк}}^{-1})$ [7]	$T_{\text{ком}}^{-1} = \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1 I_2}{I_2^2 - I_1^2} \cdot (I_1 \ln I_2 + I_2 \ln I_1)$	$T^{-1} = T_{\text{ком}}^{-1} - \frac{I_1 I_2}{C_2 \cdot (I_2^2 - I_1^2)} \cdot (I_1 \ln e_2 - I_2 \ln e_1)$
Метод визначення комбінованої кольорово-яскравісної температури $T_{\text{кя}}^{-1} = 0,5(T_{\kappa}^{-1} + T_{\text{вк}}^{-1})$ [7]	$T_{\text{кя}}^{-1} = \frac{I}{4C_2 (I_2 - I_1^2)} \times$ $\times [I_2 (3I_1 - I_2) \ln I_2 + I_1 (3I_2 - I_1) \ln I_1]$	$T^{-1} = T_{\text{кя}}^{-1} -$ $- \frac{I_2 (3I_1 - I_2) \ln e_2 - I_1 (3I_2 - I_1) \ln e_1}{4C_2 \cdot (I_2 - I_1)}$
Експоненційно-степеневий метод, [6]	$T_{\text{ес}}^{-1} = \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1 I_2}{I_2^{a+1} - I_1^{a+1}} \cdot$ $\cdot (I_1^a \ln I_2 - I_2^a \ln I_1)$	$T^{-1} = T_{\text{ес}}^{-1} - \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1 I_2}{I_2^{a+1} - I_1^{a+1}} \cdot$ $\cdot (I_1^a \ln e_2 - I_2^a \ln e_1)$
Степеневий метод [8]	$T_{\text{см}}^{-1} = \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \cdot$ $\cdot \left(\ln I_2 - \ln I_1 + a \ln \frac{I_2}{I_1} \right)$	$T^{-1} = T_{\text{см}}^{-1} - \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \cdot$ $\cdot \left(\ln e_2 - \ln e_1 + a \ln \frac{I_2}{I_1} \right)$
Універсальний метод визначення температури за двома умовними температурами з введенням вагових коефіцієнтів [7]	$T_y^{-1} = \frac{I}{C_2} \cdot \frac{q_1 \ln I_1 - q_2 \ln I_2}{q_2/I_2 - q_1/I_1}$	$T^{-1} = T_y^{-1} - \frac{I}{C_2} \cdot \frac{q_1 \ln e_1 - q_2 \ln e_2}{q_2/I_2 - q_1/I_1}$

Таблиця 2

Методи широкополосної двоканальної термометрії випромінення

Методи широкоспектральної ДКТВ	Формула розрахунку термодинамічної температури
Метод визначення ефективної кольорової температури [9]	$T_{\text{ек}}^{-1} = \frac{I_1 I_2}{C_2 \cdot (I_2 - I_1)} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^5 Y_1 U_2}{Y_2 U_1} \right]$
Метод визначення кольорової температури з використанням коректуючих множників [10]	$T_{\kappa}^{-1} = \frac{I_1 I_2}{(I_2 - I_1)} \cdot \left(\frac{1}{I_1 T_1} - \frac{1}{I_2 T_2} \right) + \frac{I}{C_2} \ln \left[\frac{R_2^0(T_2) \cdot R_1^0(T_{\kappa}(I))}{R_1^0(T_1) \cdot R_2^0(T_{\kappa}(I))} \right]$

Для визначення оптимального методу термометрії випромінення для певних умов вимірювання доцільно порівняти точність визначення температури методами двоканальної пірометрії.

Аналіз похибок вимірювання температури за випроміненням

Порівняння існуючих методів вимірювання температури за випроміненням проведено на основі зіставлення відповідних інструментальних та методичних складових похибок визначення температури різними методами.

Інструментальна складова похибки виникає внаслідок недосконалості засобів вимірювальної техніки, зумовлена впливом на вихідний сигнал параметрів оптичної системи, електричної схеми, приймача випромінення. Загальний вираз, що описує інструментальну складову похибки, має вигляд:

$$DT_{in} = K_{in} \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{DI_i}{I_i}, \quad (3)$$

де K_{in} – передавальний коефіцієнт складової інструментальної похибки вимірювання температури, вираз та значення якого залежать від відповідного методу пірометрії; $k_i = \pm 1$ залежно від використаного методу; i – кількість робочих спектральних каналів.

Методична похибка [11–13] – це складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, прийнятої при вимірюванні. Основними факторами, що спричиняють виникнення методичної похибки вимірювання температури за випроміненням, є використані теоретичні спрощення (зокрема використання формули Віна та неврахування немонохроматичності спектральних каналів), відсутність достовірної інформації про випромінювальні властивості досліджуваного об'єкта, нехтування впливом фонового випромінення та проміжного середовища. Вираз складової методичної похибки вимірювання температури за випроміненням у пірометрії визначається як сума часткових похідних від виразу визначення термодинамічної температури цим методом по ϵ_i, λ_i . Загальний вираз складової методичної похибки має вигляд:

$$DT_{мет} = K_{мет} \cdot \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{De_i}{e_i} + \sum_{i=1}^n p_i \cdot \frac{DI_i}{I_i} \right), \quad (4)$$

де $K_{мет}$ – передавальний коефіцієнт складової методичної похибки вимірювання температури, значення якого залежать від методу пірометрії; m та p – коефіцієнти впливу складових похибок.

Вирази складових інструментальної та методичної похибок найуживаніших методів пірометрії наведено в табл. 3, графічні залежності – на рис. 1–6.

Таблиця 3

Вирази інструментальної та методичної складових похибки вимірювання температури методами ДКТВ

Методи пірометрії	Вираз складової інструментальної похибки	Вираз складової методичної похибки
Взаємодіючий метод	$\frac{C_2}{L_{\text{БК}} \cdot \ln(I_1 I_2)^2} \cdot \left[\frac{DI_1}{I_1} + \frac{DI_2}{I_2} \right]$	$-\frac{T_{\text{БК}}^2 \cdot C_2 \cdot L_{\text{БК}}}{(T_{\text{БК}} \cdot L_{\text{БК}} \cdot \ln(e_1 e_2) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(e_1 e_2) \cdot \frac{DL_{\text{БК}}}{L_{\text{БК}}} + \frac{De_1}{e_1} + \frac{De_2}{e_2} \right]$
Метод спектрального відношення	$\frac{C_2}{L_{\text{СВ}}} \cdot \frac{1}{\ln(I_2/I_1)^2} \cdot \left[\frac{DI_2}{I_2} - \frac{DI_1}{I_1} \right]$	$\frac{T_{\text{СВ}}^2 \cdot C_2 \cdot L_{\text{СВ}}}{(-T_{\text{СВ}} \cdot L_{\text{СВ}} \cdot \ln(e_2/e_1) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(e_2/e_1) \cdot \frac{DL_{\text{СВ}}}{L_{\text{СВ}}} - \frac{De_1}{e_1} + \frac{De_2}{e_2} \right]$
Степеневий метод	$\frac{C_2(I_2 - I_1)}{I_2 I_1 \cdot (\ln(I_2/I_1) + a \ln(I_2/I_1))^2} \cdot \left[\frac{DI_1}{I_1} - \frac{DI_2}{I_2} \right]$	$\frac{1}{\left(\frac{1}{T_c} - \frac{I_2 I_1 \cdot (\ln(e_2/e_1) + a \ln(I_2/I_1))}{C_2(I_2 - I_1)} \right)^2} \cdot \left[\frac{I_2 I_1}{C_2(I_2 - I_1)} \left(\frac{De_1}{e_1} - \frac{De_2}{e_2} \right) - A \frac{DI_1}{I_1} - B \frac{DI_2}{I_2} \right]$

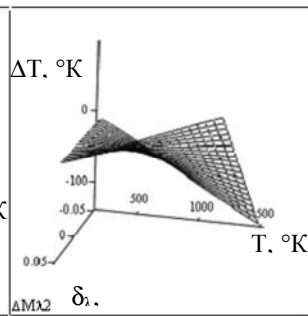
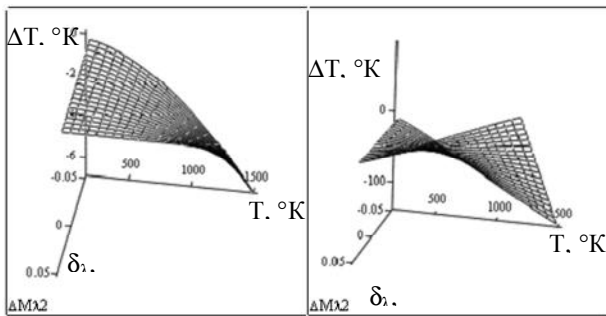


Рис.1. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни I) взаємкореляційним методом

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм},$
 $б - I_{p1}=12 \text{ мкм}, I_{p2}=14 \text{ мкм}$

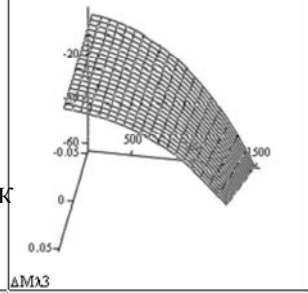
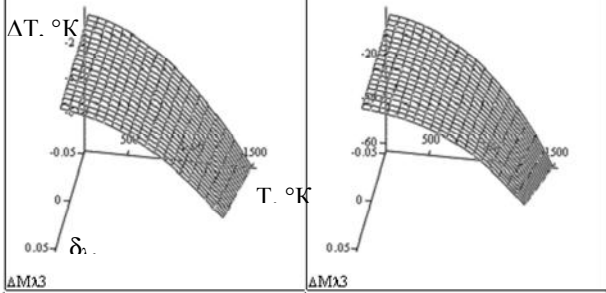


Рис.2. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни I) методом спектрального відношення:

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм},$
 $б - I_{p1}=12 \text{ мкм}, I_{p2}=14 \text{ мкм}$

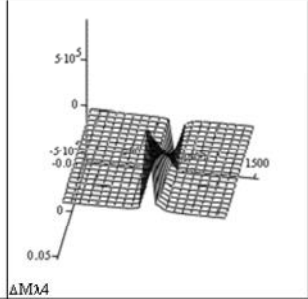
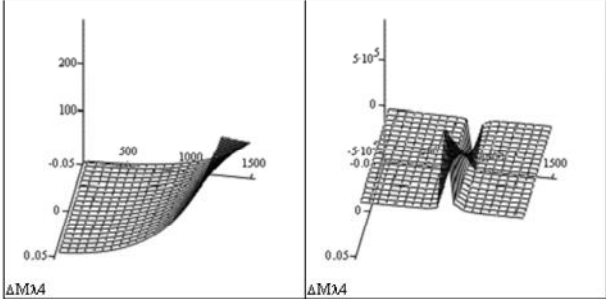


Рис.3. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни I) степеневим методом:

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм},$
 $б - I_{p1}=12 \text{ мкм}, I_{p2}=14 \text{ мкм}$

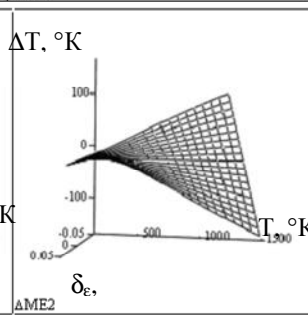
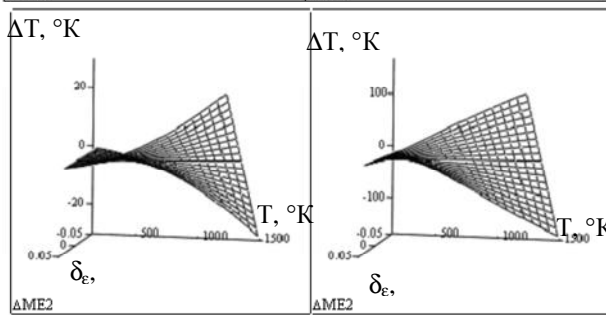


Рис.4. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни e) методом спектрального відношення:

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм},$
 $б - I_{p1}=12 \text{ мкм}, I_{p2}=14 \text{ мкм}$

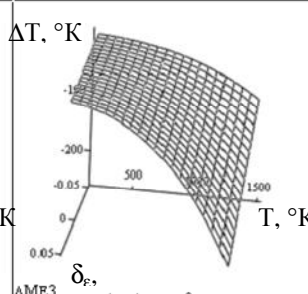
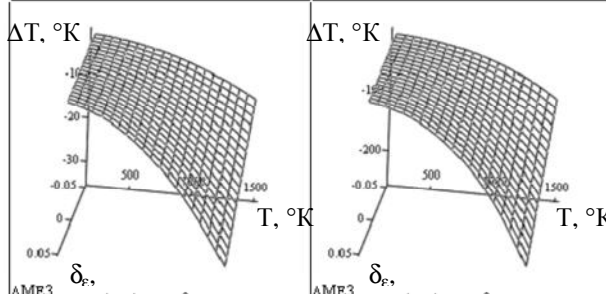


Рис.5. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни e) взаємкореляційним методом:

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм},$
 $б - I_{p1}=12 \text{ мкм}, I_{p2}=14 \text{ мкм}$

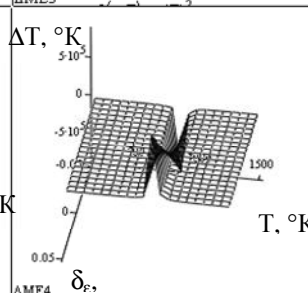
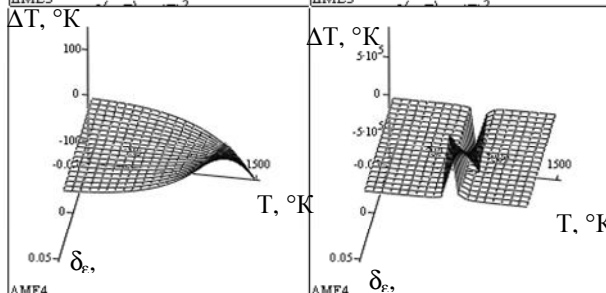


Рис.6. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни e) степеневим методом:

$a - I_{p1}=2 \text{ мкмк}, I_{p2}=4 \text{ мкмк},$
 $б - I_{p1}=12 \text{ мкмк}, I_{p2}=14 \text{ мкмк}$

При використанні широкоспектральної пірометрії використовуються квазімонохроматичні методи, тобто вимірювання температури відбувається в широкому спектральному інтервалі, а розрахунок температури – з використанням монохроматичних співвідношень шляхом введення різних видів ефективної довжини хвилі. Тому аналізують похибки вимірювання температури на прикладі методів монохроматичної пірометрії.

Проведено комп'ютерне моделювання залежності похибки вимірювання температури різними методами залежно від зміни інтенсивності випромінення, довжини хвилі та коефіцієнта випромінення в таких діапазонах фізичних величин:

- температура – від 200 до 1500 °К;
- діапазон довжин хвиль – від 2 до 15 мкм;
- робочі довжини хвиль – 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 мкм;
- коефіцієнт випромінення від 0,5 до 1.
- відносна зміна впливних факторів – від 0 до 10 %;

Розглянемо похибки вимірювання умовної та термодинамічної температури різними методами пірометрії. Для двоканальної пірометрії інструментальна похибка наближається до нуля лише при вимірюванні температури взаємкореляційним методом, що відбувається внаслідок зменшення еквівалентної довжини хвилі, що використовується в даному методі. На всьому спектральному діапазоні від 300 до 1500°К похибка не перевищує одиниць градусів та прямує до нуля з ростом температури та значень робочих довжин хвиль. Але негативно на точність вимірювання температури можуть впливати неконтрольовані зміни параметрів оптичної системи каналів та приймачів випромінення.

Інші методи двоканальної пірометрії доцільно застосовувати для окремих температурних діапазонів, оскільки існують ділянки температури, де інструментальна складова похибки різко зростає. Рекомендовані температурні діапазони для методу спектрального відношення – від 200 до 600°К для короткохвильової області спектра, та від 600 до 1500°К для довгохвильової області спектра, де складові інструментальної похибки не перевищують 20°К. Зменшення складової інструментальної похибки досягається зменшенням значення еквівалентної довжини хвилі цього методу та покращенням характеристик вимірювального тракту.

Складова інструментальної похибки вимірювання температури ступеневим методом є достатньо велика та зменшується лише на невеликих ділянках розглянутого температурного діапазону – від 1000 до 1500°К у короткохвильовій області спектра при мінімальних змінах значень довжин хвиль; від 1100 до 1500°К в довгохвильовій області спектра похибка не перевищують 50°К.

Аналогічною є ситуація з складовою методичної похибки від зміни λ в короткохвильовій області спектру – найменші значення похибки вимірювання температури є при використанні взаємкореляційного методу (рис.1).

Складова методичної похибки від зміни λ методу спектрального відношення не перевищує 10°К, але різко зростає з температурою при роботі в довгих довжинах хвиль (рис.2). Тому в інфрачервоній області не доцільно вимірювати цим методом температури вище 500°К.

Неточності визначення або зміни еквівалентної довжини хвилі при використанні ступеневого методу значно впливають на значення складової методичної похибки вимірювання (рис.3). Лише від 200 до 800°К для короткохвильової області спектра похибка не перевищує 30°К. Для довгохвильової області спектра мінімальне значення похибки становить близько 25%, що робить цей спектральний діапазон не придатним для вимірювання температури. Отже, цей метод вимірювання температури є достатньо чутливим до точності визначення робочих довжин хвиль.

Позитивною характеристикою методу спектрального відношення є низьке значення методичної складової похибки від неточності визначення коефіцієнта випромінення, яке в короткохвильовій області спектра в діапазоні температур від 200 до 1000°К не перевищує 1%, що надає переваги використанню цього діапазону (рис.4). У довгохвильовій області лише в діапазоні температур від 200 до 500°К ця похибка становить аж 20°К, що надзвичайно обмежує використання методу в інфрачервоних тепловізійних камерах. За умови наближення значень коефіцієнтів

випромінення в обох спектральних областях ця складова методичної похибки може дорівнювати нулеві. Але за умови впливу потужного фонового випромінення та зміни спектрального коефіцієнта випромінення складова методичної похибки може некеровано зростати, що також обмежує використання методу спектрального відношення в промисловості. Негативною особливістю вимірювання температури двоканальною пірометрією взаємкореляційним методом значна складова методичної похибки від неточності визначення ϵ внаслідок неточності визначення коефіцієнта випромінення. При роботі в короткохвильовій області спектра значення похибки не перевищує 5 %, але стрімко зростає з температурою та при переході в довгохвильову спектральну ділянку (рис.5). Тому пріоритетною є температура до 1000°K. Складова методичної похибки вимірювання температури від зміни ϵ з використанням степеневого методу в довгохвильовій області спектра досягає значних значень, що накладає особливі вимоги на вибір показника степені методу. Тільки в короткохвильовій області спектра похибка вимірювання температури від зміни ϵ в діапазоні температур від 200 до 1000°K не перевищує 20°K (рис.6).

Висновки

В результаті огляду існуючих методів двоканальної пірометрії можна зробити такі висновки. Методи монохроматичної двоканальної пірометрії, на відміну від методів широкополосної двоканальної пірометрії, мають перевагу в тому, що дають змогу вимірювати температуру без апріорної інформації про значення коефіцієнта випромінення ОД. Під час дослідження похибок визначення температури різними методами двоканальної пірометрії встановлено появу ділянок, на яких багатократно зростають похибки вимірювання. Це визначає доцільність використання тих або інших методів двоканальної пірометрії для певних значень температури, довжини хвилі та спектральних інтервалів.

На підставі проведеного аналізу математичних залежностей можна стверджувати, що методи двоканальної пірометрії розрізняються алгоритмами опрацювання сигналів потоку випромінення від об'єкта дослідження на двох спектральних ділянках. Тому доцільно розробляти засоби вимірювання температури за випроміненням з можливістю оптимального вибору методу пірометрії для вимірювання температури залежно від умов вимірювань та властивостей об'єкта дослідження. Це доцільно реалізувати на основі їх відповідного програмного забезпечення, яке б дало змогу залежно від умов вимірювання та властивостей об'єкта обирати оптимальний метод вимірювання температури за випроміненням, робочі довжини хвиль та метод опрацювання результату вимірювання.

1. <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/ProductsAndAccessories/>.
2. <http://www.mikroninfrared.com/catalog>.
3. <http://www.fluke.co.uk>.
4. Рубо Г. *Оптическая пирометрия*. – М. –Л.: Гостехтеориздат, 1934. – 455 с.
5. Снопко В.Н. *Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности*. – Минск: Наука и техника, 1988. – 248 с.
6. Снопко В.Н. *Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения*. – Минск: Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с.
7. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. *Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью*. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с.
8. Брянский Л.Н., Дойников А.С. *Краткий справочник метролога*. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – С. 79.
9. Снопко В.Н. *Эффективная длина волны цветового пирометра // Измерительная техника*. – 1994. – №2. – С. 37–38.
10. Nabs J.W. Rhee C. *Calculation of temperature error in a two-color pyrometer designet with the reference wavelength method // Appl. Opt.* 1988. V. 27, 10 P. 1916-1918.
11. ДСТУ 2681-94 *Метрологія. Терміни та визначення*. – Введ. 01.01.95. – К.: Держстандарт України, 1995.- 66 с.
12. Обозовський С.С. *Інформаційно-вимірювальна техніка (Методологічні питання теорії вимірювань)*. – К.: ІСДО, 1993. – 424 с.
13. *Основы метрологии та вимірювальної техніки: підручник: у 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1. *Основы метрологии*. – 532 с.