

МОДЕЛЮВАННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ВИПРОМІНЕННЯМ БАГАТОКАНАЛЬНИМИ МЕТОДАМИ

© Гоц Н., 2011

На основі комп'ютерного моделювання проаналізовано інструментальну та методичну складові похибки вимірювання температури методами багатоканальної термометрії випромінювання. Визначено умови, за яких доцільне їх застосування, та загальні недоліки використання цих методів. Запропоновано методику багатоканального вимірювання температури.

Ключові слова: термометрія випромінювання, похибка, багатоканальні методи пірометрії.

In the article on the basis of computer design the analysis of instrumental is conducted and methodical constituents of error of measuring of temperature by the methods of multichannel radiation thermometry . Certainly terms, which their expedient application, and general lacks of the use of these methods, is for. The method of the multichannel measuring of temperature is offered

Keywords: radiation thermometry, error, multichannel methods of pyrometry.

Постановка проблеми

Однією з основних проблем термометрії випромінювання є низька точність вимірювання температури. Значна методична похибка зумовлена впливом фонового випромінювання і пропусканням проміжного середовища на результати вимірювання. Але основна причина низької точності вимірювань – це відсутність в умовах вимірювань достовірної інформації про значення коефіцієнта випромінювання об'єкта. Існують способи його визначення, які ґрунтуються на теоретичній оцінці, використанні табличних даних, вимірюванні у “зручний” час та експериментальному визначенні кожного в лабораторних умовах. Але їх недоцільно застосовувати за необхідності високоточного вимірювання температури в умовах виробництва. Отже, проблема підвищення точності вимірювань температури за випромінюванням залишається актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для зменшення впливу коефіцієнта випромінювання на результати вимірювання якнайширше використовують методи вимірювання температури за випромінюванням у двох спектральних ділянках та математичного опрацювання цих сигналів [1]. Однак за умови значної спектральної залежності коефіцієнта випромінювання використання цих методів не дає бажаних результатів.

Тому доцільно використовувати методи, які дають змогу врахувати спектральну залежність випромінювальних властивостей поверхні об'єкта. Це є методи три- та чотиріканальної термометрії, що узагальнено називаються багатоканальними методами термометрії випромінювання. Значення умовної та термодинамічної температури, що визначаються цими методами, наведено в табл.1. Узагальнений вираз визначення умовної та термодинамічної температури даними методами представлений формулами:

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

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 багатоканальної термометрії; $k_i = \pm 1$ залежно від використаного методу.

Основні методи багатоканальної монохроматичної термометрії випромінювання

Назва методу	Формула умовної температури	Формула термодинамічної температури
Метод подвійного спектрального відношення інтенсивностей випромінювання на трьох рівновіддалених за шкалою довжин хвиль спектральних інтервалах [1]	$T_{nl}^{-1} = \frac{I_1 I_2 I_3}{2C_2 \cdot DI^2} \cdot \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \frac{I_3}{I_2} \right)$	$T^{-1} = T_{nl}^{-1} - \frac{I_1 I_2 I_3}{2C_2 \cdot DI^2} \cdot \ln \left(\frac{e_1}{e_2} \frac{e_3}{e_2} \right)$
Метод подвійного спектрального відношення інтенсивностей випромінювання в трьох рівновіддалених за шкалою частот спектральних інтервалах [2]	$T_{nn}^{-1} = \frac{L_n}{C_2 \cdot (L-1)} \cdot \ln \frac{I_2^{(L+1)}}{I_1^L I_3}$	$T^{-1} = T_{nn}^{-1} - \frac{L_n}{C_2 \cdot (L-1)} \cdot \ln \frac{e_2^{(L+1)}}{e_1^L e_3}$
Метод подвійного спектрального відношення трьох інтенсивностей випромінювання з довільним розташуванням спектральних каналів [3]	$T_n^{-1} = \frac{I_1 I_2 I_3}{C_2 \cdot (I_3 - I_1)(I_3 - I_2)(I_2 - I_1)} \cdot \ln \left[\left(\frac{I_2}{I_3} \right)^{I_2 - I_1} / \left(\frac{I_3}{I_2} \right)^{I_3 - I_2} \right]$	$T^{-1} = T_n^{-1} - \frac{I_1 I_2 I_3}{C_2 \cdot (I_3 - I_1)(I_3 - I_2)(I_2 - I_1)} \cdot \ln \left[\left(\frac{e_2}{e_3} \right)^{I_2 - I_1} / \left(\frac{e_3}{e_2} \right)^{I_3 - I_2} \right]$
Універсальний метод подвійного спектрального відношення [4]	$T_y^{-1} = \frac{I_1 I_2 I_3 I_4}{C_2 \cdot I_3 I_4 (I_2 - I_1) - I_1 I_2 (I_4 - I_3)} \cdot \ln \frac{I_2 I_3}{I_1 I_4}$	$T^{-1} = T_y^{-1} - \frac{I_1 I_2 I_3 I_4}{C_2 \cdot I_3 I_4 (I_2 - I_1) - I_1 I_2 (I_4 - I_3)} \cdot \ln \frac{e_2 e_3}{e_1 e_4}$
Метод визначення оптимальної температури [3]	$T_{оя}^{-1} = - \frac{\sum_{i=1}^n I_i^{-1} \ln I_i}{C_2 \sum_{i=1}^n I_i^{-2}}$	$T^{-1} = T_{оя}^{-1} + \frac{\sum_{i=1}^n I_i^{-1} \ln e_i}{C_2 \sum_{i=1}^n I_i^{-2}}$

Також необхідно додати, що практично вся багатоканальна термометрія випромінювання користується монохроматичними співвідношеннями. Але вимірювання відбуваються в спектральних каналах певної ширини. При застосуванні монохроматичної реєстрації використовують методи врахування немонохроматичності спектрального каналу шляхом введення поняття ефективної довжини хвилі (ЕДХ) та різних видів ЕДХ, таких як: ЕДХ візуального пірметра; ЕДХ для інтервалу температур; гранична ЕДХ; референсна ЕДХ; середньозважена ЕДХ.

Формулювання цілі статті

Сьогодні використання мікропроцесорів у термометрах випромінювання дає можливість, використовуючи декілька спектральних каналів, застосовувати одночасно декілька методів. Для порівняння існуючих багатоканальних методів вимірювання температури за випромінюванням та визначення умов доцільності їх використання необхідно їх проаналізувати, порівнюючи точність визначення ними термодинамічної температури. Це доцільно провести, зіставляючи відповідні інструментальні та методичні складові похибок визначення температури різними методами. Отже, дослідження особливостей використання різних методів багатоканальної термометрії випромінювання в різних умовах є актуальним.

Виклад основного матеріалу

Інструментальна складова похибки залежить від властивостей засобу вимірювання. Під час вимірювання температури за випромінюванням інструментальна похибка зумовлена неточністю вимірювання потоку випромінювання від досліджуваного об'єкта внаслідок впливу параметрів

оптичної системи, електричної схеми, особливостей приймача випромінювання та зміни їх характеристик в часі. Загальний вираз, що описує інструментальну складову похибки від зміни інтенсивності потоку випромінювання I , що сприймає пірметр, має вигляд:

$$DT_{ин} = K_{ин} \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{DI_i}{I_i}, \quad (2)$$

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

Згідно з теорією похибок [5], методична похибка – це складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю властивостей об’єкта вимірювання та його моделі, прийнятої при вимірюванні. Основними факторами, що спричиняють виникнення методичної похибки вимірювання температури за випромінюванням, 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 випромінювання та проміжного середовища. Вираз методичної складової похибки вимірювання температури за випромінюванням подано формулою :

$$DT_{мет} = K_{мет} \cdot \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{De_i}{e_i} + \sum_{i=1}^n p_i \cdot \frac{DI_i}{I_i} \right), \quad (3)$$

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

Вирази складових інструментальної та методичної похибок різних методів пірметрії наведено в табл.2.

Таблиця 2

Вирази інструментальної та методичної складових похибок вимірювання температури методами багатоканальної термометрії випромінювання

Методи багатоканальної термометрії випромінювання		
Метод подвійного спектрального відношення (ПСВ)	Інструментальна складова похибки	$\frac{2C_2 DI^2}{I_1 I_2 I_3 \cdot (\ln(I_2^2 / I_1 I_3))^2} \cdot \left[\frac{DI_1}{I_1} - \frac{2DI_2}{I_2} + \frac{DI_3}{I_3} \right]$
	Методична складова похибки	$\frac{I_1 I_2 I_3}{2C_2 DI^2 \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(I_1 I_2 I_3 \ln(e_2^2 / e_1 e_3))^2}{C_2 DI^2} \right)} \cdot \left[\left(\frac{DI_1}{I_1} + \frac{DI_2}{I_2} + \frac{DI_3}{I_3} \right) \cdot \ln(e_2^2 / e_1 e_3) - \frac{De_1}{e_1} + \frac{De_2}{e_2} - \frac{De_3}{e_3} \right]$
Універсальний метод ПСВ	Інструментальна складова похибки	$\frac{C_2 I_3 I_4 (I_2 - I_1) - I_1 I_2 (I_4 - I_3)}{I_1 I_2 I_3 I_4 \cdot \left(\ln \left(\frac{I_2 I_3}{I_1 I_4} \right) \right)^2} \cdot \left[\frac{DI_1}{I_1} - \frac{DI_2}{I_2} - \frac{DI_3}{I_3} + \frac{DI_4}{I_4} \right]$
	Методична складова похибки	$\frac{1}{\left(\frac{1}{T_y} - I_1 I_2 I_3 I_4 \cdot \frac{\ln(e_2 e_3) - \ln(e_1 e_4)}{C_2 I_3 I_4 (I_2 - I_1) - I_1 I_2 (I_4 - I_3)} \right)^2} \cdot \left[-C \frac{DI_1}{I_1} - D \frac{DI_2}{I_2} - E \frac{DI_3}{I_3} - F \frac{DI_4}{I_4} - H \frac{De_1}{e_1} + K \frac{De_2}{e_2} + L \frac{De_3}{e_3} - M \frac{De_4}{e_4} \right]$

При використанні широкоспектральної реєстрації випромінювання використовуються квазімонохроматичні методи, тобто вимірювання температури відбувається в широкому спектральному інтервалі, а розрахунок температури – з використанням монохроматичних співвідношень.

Тому аналіз похибок вимірювання температури проводиться на прикладі методів монохроматичної пірометрії. Похибки вимірювання температури розглянутими методами представлено на рис. 1–6.

Як видно з рис. 1–6, багатоканальна термометрія випромінення характеризується малими значеннями похибок на окремих температурних ділянках і стрімким їх зростанням на інших ділянках. Так, при застосуванні методу ПСВ в області температур від 200 до 900°K значення інструментальної складової похибки в низькотемпературній області спектра на перевищує 3% і різко зростає з температурою. Для довгохвильової області спектра в діапазоні температур від 1000 до 1500°K інструментальна складова похибки може прямувати до нуля тільки при ідентичності властивостей спектральних каналів (рис.1).

Можна вважати, що метод подвійного спектрального відношення дає змогу визначати термодинамічну температуру з мінімальною методичною похибкою за умови правильного вибору місцерозташування робочих довжин хвиль по спектру відповідно до вибору функціональної залежності коефіцієнта випромінення від довжини хвилі. Із зменшенням методичної похибки безконтактного вимірювання температури значно зростає інструментальна похибка, що зображено на рис 1. Для її зменшення доцільно вибирати робочі спектральні ділянки так, щоб еквівалентні довжини хвиль кольорових температур були однакові.

На точність вимірювання температури універсальним методом ПСВ значно впливають метрологічні характеристики засобу вимірювання. Інструментальна похибка при використанні цього методу мінімальна і не перевищує 3%, лише при вимірюванні температури від 200 до 900°K при розкидах параметрів засобу вимірювання не більше 1%. Цей факт накладає вимоги на використання для реалізації даного методу тільки високоточних термометрів випромінення (рис.2).

Зміни параметрів робочої довжини хвилі мінімально впливають на методичну похибку в багатоканальному термометрі випромінення в короткохвильовій області спектра при використанні методу ПСВ, що становить не більше 1 % на всьому температурному діапазоні (рис. 3).

Методична складова похибки від зміни λ методу ДСО зменшується з використанням універсального методу ДСО, її вплив на точність вимірювання температури незначний і становить соті частки відсотка на всьому спектральному інтервалі в розглянутому температурному діапазоні (Рис.4).

Значення методичної складової похибки від зміни ϵ при використанні методу ДСО на всьому температурному діапазоні як в короткохвильовій, так і в інфрачервоній областях спектра є найменшим серед розглянутих методів (рис.5). Цей факт презентує підвищення точності вимірювання температури із збільшенням кількості робочих спектральних діапазонів пірометра. При використанні універсального методу ДСО значення цієї складової похибки теж є задовільним і знаходиться в межах від 0,5 до 4% (рис.6). Значення похибок вимірювання температури, пріоритетні діапазони вимірювання і спектральні інтервали наведено в роботі [6].

Оскільки відомі методи використовують монохроматичні співвідношення, а сприйняття випромінення приймачем відбувається в певному спектральному діапазоні, то для зменшення спричиненої цим похибки пропонується такий спосіб. Як відомо, методи, які використовують монохроматизацію випромінення, ґрунтуються на спектральній залежності коефіцієнта випромінення.

$$e = F(I, A, B) \quad (4)$$

Але при використанні спектральних каналів певної ширини значення коефіцієнта випромінення залежить не від значення монохроматичної довжини хвилі, а переважно від ширини спектрального інтервалу та має виражену температурну залежність. Тому при вимірюванні температури в певному спектральному діапазоні доцільно скористатися співвідношенням 5. При цьому залежно від виду матеріалу ця залежність може бути апроксимована степенною, експоненційною або оберненою функціональною залежністю від температури.

$$e = f(T, I) \quad (5)$$

У такому випадку при вимірюванні температури в трьох спектральних каналах можна записати систему рівнянь (6), яку утворюють вихідні сигнали приймача випромінення S:

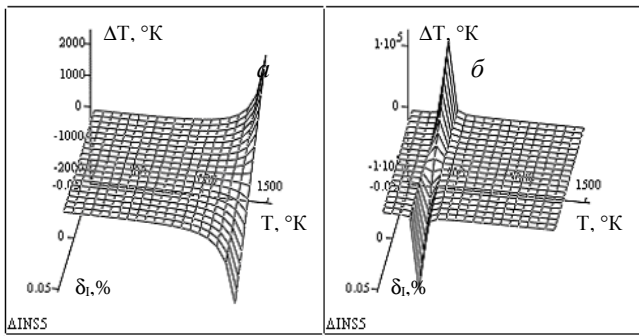


Рис.1. Температурна залежність інструментальної складової похибки багатоканальної монохроматичної пірометрії від зміни I (метод ПСВ):

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм}, I_{p3}=6 \text{ мкм}$
 $b - I_{p1}=10 \text{ мкм}, I_{p2}=12 \text{ мкм}, I_{p3}=14 \text{ мкм}$

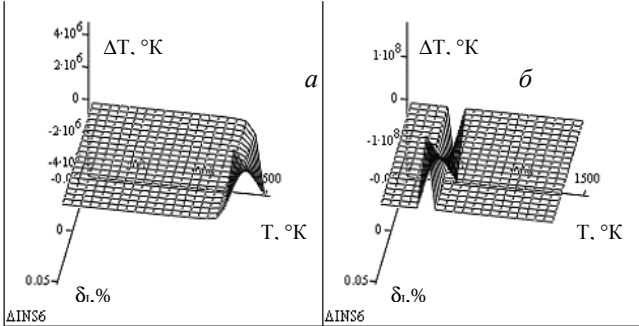


Рис.2. Температурна залежність інструментальної складової похибки від зміни I багатоканальної монохроматичної пірометрії (універсальний метод ПСВ):

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм}, I_{p3}=6 \text{ мкм}$
 $b - I_{p1}=10 \text{ мкм}, I_{p2}=12 \text{ мкм}, I_{p3}=14 \text{ мкм}$

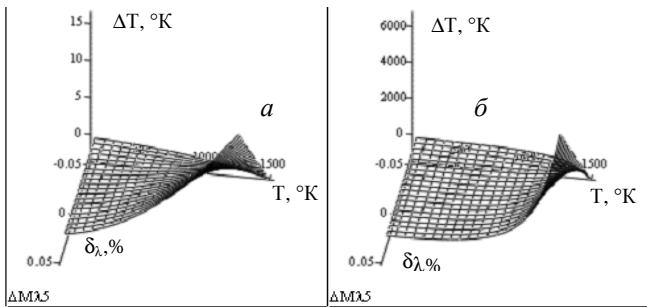


Рис.3. Температурна залежність методичної складової похибки, від зміни I багатоканальної монохроматичної пірометрії (метод ПСВ):

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм}, I_{p3}=6 \text{ мкм}$
 $b - I_{p1}=10 \text{ мкм}, I_{p2}=12 \text{ мкм}, I_{p3}=14 \text{ мкм}$

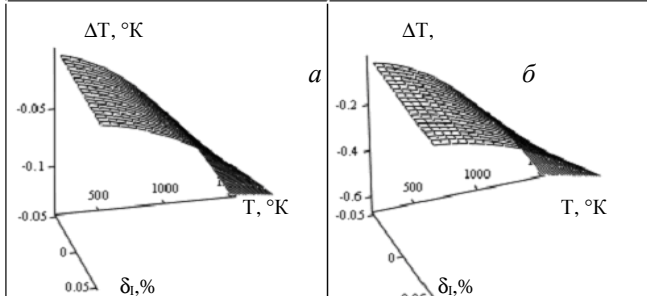


Рис.4. Температурна залежність методичної складової похибки від зміни I багатоканальної монохроматичної пірометрії (універсальний метод ПСВ):

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм}, I_{p3}=6 \text{ мкм}$
 $b - I_{p1}=10 \text{ мкм}, I_{p2}=12 \text{ мкм}, I_{p3}=14 \text{ мкм}$

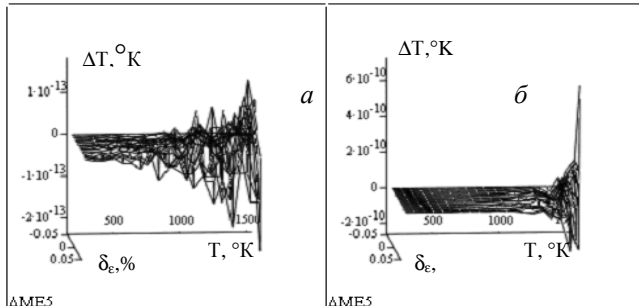


Рис.5. Температурна залежність методичної складової похибки від зміни ϵ багатоканальної монохроматичної пірометрії (метод ПСВ):

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм}, I_{p3}=6 \text{ мкм}$
 $b - I_{p1}=10 \text{ мкм}, I_{p2}=12 \text{ мкм}, I_{p3}=14 \text{ мкм}$

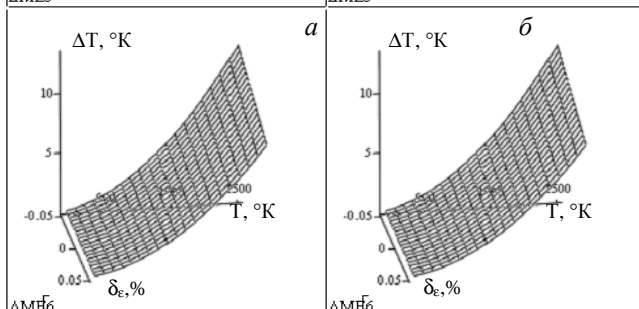


Рис.6. Температурна залежність методичної складової похибки від зміни ϵ багатоканальної монохроматичної пірометрії (універсальний метод ДСО):

$a - I_{p1}=2 \text{ мкм}, I_{p2}=4 \text{ мкм}, I_{p3}=6 \text{ мкм}$
 $b - I_{p1}=10 \text{ мкм}, I_{p2}=12 \text{ мкм}, I_{p3}=14 \text{ мкм}$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = \int_{I_1}^{I_2} f(T, I) \cdot b(T, I) dI \\ S_2 = \int_{I_3}^{I_4} f(T, I) b(T, I) dI \\ S_3 = \int_{I_5}^{I_6} f(T, I) b(T, I) dI \end{array} \right. \quad (6)$$

Для монохроматизації цих співвідношень та розв'язання системи доцільно скористатися поняттям усередненої довжини хвилі для певного спектрального інтервалу та температурного діапазону (7). Параметри А та В визначаються на основі попередніх обчислень температурної залежності усередненої довжини хвилі у відповідному діапазоні температур. Система рівнянь (6) набуває вигляду (8):

$$I_{yc} = f(T, A, B) \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln S_1 = \ln[f(I_{yc1}, T, A, B)] + \ln[b(I_{yc1}, T)] \\ \ln S_2 = \ln[f(I_{yc2}, T, A, B)] + \ln[b(I_{yc2}, T)] \\ \ln S_3 = \ln[f(I_{yc3}, T, A, B)] + \ln[b(I_{yc3}, T)] \end{array} \right. \quad (8)$$

Температуру можна визначити як функцію таких параметрів:

$$T = f(S_1, S_2, S_3, A, B) \quad (9)$$

Значення температури можна визначити з використанням методу Ньютона для розв'язування систем нелінійних рівнянь. Використання температурної залежності коефіцієнта випромінювання в певному спектральному діапазоні дає можливість реалізації багатоканального методу пірометрії, що використовує вимірювання температури випромінювання в спектральних діапазонах певної ширини.

Висновок

Сучасна монохроматична пірометрія розвивається в напрямку збільшення кількості робочих спектральних каналів, що дає такі можливості: зменшити вплив невизначеності коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні на результати вимірювання температури; підвищити точність вимірювання температури за випромінюванням за рахунок зростання об'єму інформації про випромінювальні властивості досліджуваного об'єкта; використовувати спектральні ділянки, в яких вплив випромінювання, поглинання та розсіювання проміжного середовища є мінімальним. Але особливістю багатоканальної пірометрії є зростання інструментальної похибки вимірювання температури, що накладає вимоги до елементної бази самих термометрів випромінювання.

1. Pyatt E.C. *Some consideration of the errors of brightness and two-colour types of spectral radiation pyrometer*//*Brit.J.Appl.Phts.*1954.V.5, 7.P.264-268. 2. Снопко В.Н. *Основы методов пиromетрии по спектру теплового излучения*. Минск: Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с. 3. Свет Д.Я. *Оптические методы измерения истинных температур*. – М: Наука, 1982. – 296 с. 4. Жугалло О.М. *Метод пиromетрии двойного спектрального отношения*// *Теплофизика высоких температур*. 1972. – Т.10. – С. 622–628. 5. *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: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1. *Основы метрологии*. – 532 с. 6. Hots N. *Badania symulacyjne błędów bezkontaktowego pomiaru temperatury*//*Materialy VII Konferencji Krajowej TERMOGRAFIA I TERMOMETRIA W PODCZERWIENI, Ustron-Jaszowiec, Polska, 2006.*