

Н.Є. Гоц<sup>1</sup>, Л.А. Назаренко<sup>2</sup>, М.М. Микийчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет міського господарства, Харків, Україна

## РОЗВИТОК БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ ЗА ВИПРОМІНЕННЯМ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ БАГАТОСМУГОВИХ ТА ТЕСТОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

*Метою роботи є розвиток багатосмугових та тестових методів вимірювання температури за випроміненням (ВТВ), спрямованих на підвищення точності вимірювань температури за рахунок використання спектральної інформації про потік випромінення від об'єкта, а також формування засад створення багатоканальних термометрів випромінення (ТВ) для реалізації цих методів. Для вирішення поставленого завдання нами проведений аналіз точності ВТВ різними методами термометрії за випроміненням; сформувався узагальнений вираз ВТВ багатосмуговими та тестовими методами; розроблено критерії формування спектральних каналів багатоканального ТВ для реалізації цих методів; розроблено структурну схему багатоканального ТВ; сформувано методику калібрування. Впровадження багатосмугових методів в багатоканальних ТВ дає змогу підвищити точність ВТВ та розширити застосування ТВ в промисловості та наукових дослідженнях.*

*The aim of the article is the development of multiband and test methods for multichannel radiation temperature measurements using spectral information about the radiation and radiation property of the object. To solve this problem we analyzed different methods of radiation temperature measurements, the accuracy of these methods; proposed the general equation multiband and test methods; the criteria for the formation of spectral channels of multichannel radiation thermometer; the method of their calibration. The introduction of multiband methods in multichannel radiation thermometer increases the accuracy of radiation temperature measurements and extend their application in industry and scientific research.*

**Ключові слова:** термометрія за випроміненням, багатоканальний термометр випромінення, багатосмугові методи, методична похибка вимірювання температури за випроміненням.

### Постановка проблеми

В останні десятиліття розширився попит промисловості на термометри випромінення (ТВ), при цьому особливо розвитку набула термометрія за інфрачервоним випроміненням. Але значним недоліком цього методу вимірювання температури залишається низька точність вимірювань, а саме значна методична похибка вимірювання, спричинена впливом на результати вимірювання випромінювальної здатності поверхні досліджуваного об'єкта, впливом проміжного середовища та фонового випромінення.

Це є наслідком того, що методи, які практично реалізуються в промислових моделях термометрів випромінення (ТВ), мають низьку точність. Це зумовлює необхідність розвитку багатосмугових та тестових методів ВТВ, спрямованих на підвищення точності ВТВ за рахунок використання спектральної інформації про потік випромінення від об'єкта.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

На основі узагальнення даних про метрологічні характеристики ТВ світових виробників можна

в такий спосіб охарактеризувати сучасні термометри випромінення [1, 2, 3]. Переважно це є одноканальні ТВ і термометри випромінення спектрального відношення, які працюють у ближній, середній та тепловій інфрачервоних ділянках спектра та мають такі метрологічні характеристики:

- загальний діапазон вимірювання температури — від  $-50$  °C до  $+2500$  °C;
- час вимірювання — від  $0,1$  мкс до  $10,0$  с;
- показник візування — від  $1/2$  до  $1/200$ ;
- робочий спектральний діапазон — від  $0,35$  до  $14,0$  мкм;
- границя основної похибки ТВ — від  $0,1$  % до  $2,5$  %.

Але проблемою термометрії за випроміненням залишається висока методична складова похибки. У роботах [4, 5, 6, 7, 8] показаний негативний вплив на точність вимірювання температури за випроміненням методичної складової похибки, а в [9] ми провели дослідження впливу коефіцієнта випромінення, випромінення фону та проміжного середовища на точність вимірювання температури за випроміненням в інфрачервоному діапазоні спектру.

У результаті математичного моделювання, проведеного у цій роботі, та результатів експериментальних досліджень показано, що методична похибка, спричинена вищевказаними чинниками може становити десятки відсотків.

На основі огляду робіт [6, 8, 10, 11, 12] методи термометрії за випроміненням ми пропонуємо класифікувати за такими ознаками:

- вузькосмугові та широкосмугові методи — залежно від ширини робочих спектральних смуг;
- односмугові та багатосмугові методи — залежно від кількості спектральних смуг, що використовуються для опрацювання вимірювальної інформації;
- методів паралельного одночасного вимірювання однієї й тієї ж самої температури в декількох спектральних смугах та тестових методів, суть яких полягає у визначенні значення температури за допомогою тестів — вимірювальних процедур, кожна з яких функціонально пов'язана зі значенням вимірюваної температури та дозволяє визначати значення не тільки температури, але й впливних факторів.

Тому, в результаті огляду різних методів термометрії за випроміненням, можна сказати таке:

- оскільки використання багатосмугової інформації про потік випромінення від об'єкта сприяє підвищенню точності вимірювання, то необхідним є розвиток вимірювань температури за випроміненням одночасно в декількох спектральних каналах ТВ;
- багатосмугові та тестові методи спрямовані на зменшення методичної похибки вимірювання температури за випроміненням, тому їх розвиток, а також розвиток багатоканальних ТВ є актуальним;
- кожен з цих методів має свої особливості використання, тому необхідний оптимальний вибір методу залежно від умов вимірювання та властивостей об'єкта;
- оптимальний вибір методу може бути здійснений на основі дослідження похибок вимірювання температури цим методом.

### Формулювання мети статті

Тому метою нашої роботи є розвиток засад розвитку та впровадження багатосмугових та тестових методів вимірювання температури за випроміненням та багатоканальних термометрів випромінення. Для реалізації цього нами проведений аналіз точності ВТВ різними методами термометрії за випроміненням; сформований узагальнений вираз ВТВ багатосмуговими та тестовими методами; розроблено критерії формування спектральних каналів багатоканального ТВ для реалізації багатосмугових та тестових методів; розроблено структурну схему багатоканального ТВ; сформовано методику калібрування багатоканального ТВ.

### Викладення основного матеріалу

Нами сформована на модель системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням та досліджені її окремі елементи [13]. Аналіз моделі дав змогу визначити перелік робіт, які необхідно провести для вирішення поставленої мети.

Був проведений аналіз точності ВТВ різними методами; сформований узагальнений вираз ВТВ багатосмуговими та тестовими методами; розроблені критерії формування спектральних каналів багатоканального ТВ для реалізації багатосмугових та тестових методів; розроблена структурна схема багатоканального ТВ; сформована методика калібрування багатоканального ТВ.

Проаналізувавши різні методи ТВ, ми отримали узагальнені математичні моделі умовної  $T_{\text{ум}}$  та термодинамічної  $T$  температури [9, 13]:

$$T_{\text{ум}} = \frac{C_2}{\Lambda_{\text{ум}} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \ln(S_i))},$$

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

де —  $a_i$  та  $b_i$  коефіцієнти, які залежать від вибраного методу ТВ;  $i$  — кількість робочих спектральних каналів ТМВ;  $\Lambda_{\text{ум}}$  — еквівалентна довжина хвилі відповідного методу ТВ;  $k_i = \pm 1$  залежно від методу ТВ;  $S_i$  — вихідний сигнал.

Застосування цих узагальнених моделей уможливує одночасну реалізацію декількох методів ТВ при наявності у ТВ декількох спектральних вимірювальних каналів; оптимальний вибір методу ТВ та алгоритму обчислення термодинамічної температури залежно від умов вимірювання та властивостей об'єкту.

Сформована загальна класифікація складових похибки ВТВ, а також визначені чинники та фактори, що спричинюють відповідні складові [14, 15]. Отримано вирази методичної та інструментальної складових похибок ВТВ та проведено моделювання похибок ВТВ різними методами ТВ, досліджений характер їх змін в різних температурних та спектральних діапазонах.

За результатами моделювання зроблено такі висновки. Максимальна кількість робочих спектральних смуг багатосмугового методу не повинна перевищувати чотирьох, інакше точність визначення температури стрімко падає на окремих температурних ділянках. При реалізації багатосмугового методу збільшення кількості спектральних каналів ТВ веде до зменшення методичної складової похибки, але зростає інструментальна складова похибки ВТВ, через що необхідно створювати ТВ з низьким значенням основної похибки до 0,3 %. Для конкретних температурних та спектральних діапазонів,

умов вимірювання та властивостей об'єкта доцільно використовувати відповідні методи ТВ, що дасть змогу визначати температуру з вищою точністю.

Реалізація багатосмугових методів ТВ потребує розроблення вимог для формування окремих спектральних каналів. Доцільно розробляти багатоканальні ТМВ, які можуть реалізовувати декілька методів ТВ. Отже, ТВ може мати надлишкову кількість спектральних каналів для вибору спектральних смуг при реалізації одночасно декількох багатосмугових методів. Оптимальний вибір методу ТВ та алгоритму обчислення здійснюється залежно від переваг їх використання в конкретних умовах вимірювання та властивостей об'єкта, а перехід на різні методи ТВ відбувається зміною алгоритму обчислення та значень коефіцієнтів  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $A_{ум}$  виразу (1) та робочих спектральних каналів. Запропоноване можна реалізувати за структурною схемою багатоканального ТВ, наведеною на рисунку 1.

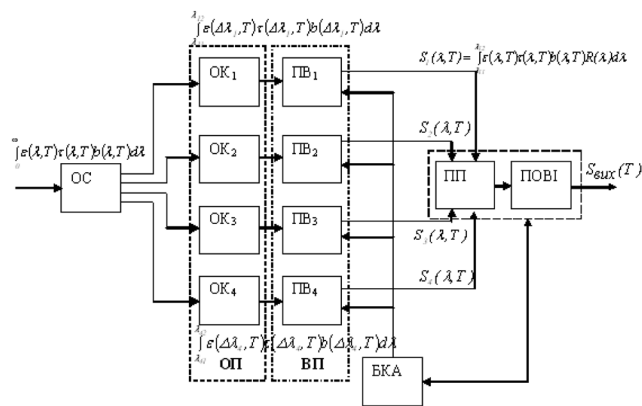


Рис. 1. Базова структурна схема багатоканального ТВ:

ОС — оптична система, ОК — оптичні канали, ОП — оптичний перетворювач, ПВ — приймач випромінення, ВП — вимірювальний перетворювач, БКА — блок керування алгоритмом, ПП — проміжний перетворювач, ПОВІ — пристрій опрацювання вимірювальної інформації

Максимальна кількість робочих спектральних смуг, яку доцільно застосовувати для реалізації багатосмугових методів багатоканальним ТВ, не має перевищувати чотирьох. Але доцільне застосування і надлишку спектральних каналів ТВ з оптимальним їх вибором залежно від методу, який доцільніше використовувати для конкретних умов, та випромінювальних властивостей об'єкта.

Концепція оптимального вибору параметрів робочих спектральних каналів ТВ передбачає розроблення ряду критеріїв для їх формування у разі реалізації різних багатосмугових методів. Запропоновано систему критеріїв для формування спектральних каналів багатоканального ТВ (рис. 2) [16].

Запропоновані критерії та вимоги щодо формування спектральних каналів ТВ дають змогу визначити параметри спектральних каналів для реалізації

багатосмугових методів вимірювання температури в термометрах інфрачервоного випромінення.

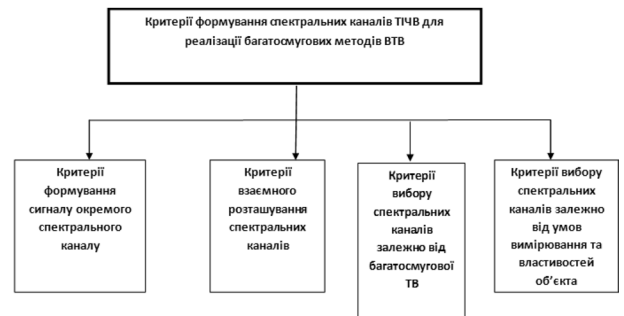


Рис. 2. Система критеріїв формування спектральних каналів багатоканального ТВ для реалізації багатосмугових методів ТВ

З метою визначення придатності багатоканального ТВ до застосування відповідно до міжнародних метрологічних вимог, запропоновано методику оцінювання результатів метрологічної перевірки (МП) ТВ на основі оцінювання непевності, яка реалізується у такій послідовності [17, 18].

Проводять експериментальне оцінювання абсолютної похибки  $\Delta T_{ij}$  вимірювання температури під час МП ТВ в умовах конкретної повірочної (калібрувальної) лабораторії та встановлення доцільності подальшого оцінювання точності ВТВ цим ТВ. Проводять оцінювання непевності типу А  $u(T_j)$  серії вимірювань температури за випроміненням під час МП у визначеній точці температури. Формують бюджет різних джерел непевності та оцінювання сумарної стандартної непевності  $u_{cj}(T)$ , що вносить окремі складові бюджету. Визначають сумарну стандартну непевність  $u_{cj}(T)$  МП ТВ для кожної температури повірки. Розраховують сумарну розширену непевність  $U_j$  МП ТВ для кожного значення температури, що перевіряється. Рішення про результат МП приймають за сукупністю критеріїв, представлених системою нерівностей:

$$\begin{cases} -\Delta T_{ocj} \leq \Delta T_{ij} \leq \Delta T_{ocj} \\ u(T_j) \leq 0,2\Delta T_{oc} \\ -\Delta_{доп} \leq (T_i - T_{ij}) + U_j \leq \Delta_{доп}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $i$  — номер вимірювання в серії вимірювань,  $i=1...10$ ;  $j$  — номер точки температури, в якій відбувається МП ТВ,  $j=1...5$ ;  $T_{ij}$  — результат ВТВ в серії вимірювань відповідної точки температури;  $\Delta_{доп}$  — допустиме значення похибки згідно із ДСТУ 3170–95;  $\Delta T_{ocj}$  — граничне значення основної похибки для цього значення температури;  $u(T_j)$  — непевність типу А результатів МП.

При застосуванні багатоканального ТВ ця методика має бути застосована окремо для перевірки кожного робочого спектрального каналу ТВ.

## Висновки

Проведені нами дослідження показали, що практична реалізація багатосмугових та тестових методів в ТВ має базувати на таких принципах:

1. Збільшення кількості спектральних каналів веде до зменшення методичної складової похибки ВТВ, але при цьому зростає інструментальна складова похибки. Тому спектральні вимірювальні канали багатоканального ТВ мають мати низьке значення основної похибки до 0,3 %. Також максимальна кількість спектральних смуг, які використовують для реалізації методу, не має перевищувати чотирьох, інакше значення похибок ВТВ стрімко зростають на окремих температурних діапазонах.

2. При реалізації різних багатосмугових методів точність ВТВ значним чином залежить від певних умов: температурних та спектральних діапазонів, умов вимірювання та випромінювальних властивостей об'єкта. Отже необхідно використовувати відповідні методи для конкретних умов, що дасть змогу визначити температуру з заданою точністю. Тому доцільним є реалізація багатоканальних ТВ з надлишковою кількістю спектральних каналів. Це дає можливість одночасної реалізації декількох методів одним багатоканальним ТВ.

3. Запропонований узагальнений математичний вираз визначення термодинамічної температури різними методами дає можливість розроблення та побудови багатоканальних термометрів випромінювання з використанням одночасно декількох алгоритмів обчислення умовної і термодинамічної температури, а також оптимального вибору методу в залежності умов вимірювання та властивостей об'єкта. Перехід на різні методи може здійснюватися шляхом зміни коефіцієнтів математичного виразу.

Для реалізації багатоканальних методів доцільне застосування багатосмугових приймачів випромінювання (до 4 спектральних смуг) або акустооптичної фільтрації, що дає змогу реалізувати багатосмугове сприйняття випромінювання приймачем випромінювання та надлишковість спектральних каналів. Також розроблено систему критеріїв формування спектральних каналів ТВ в залежності від параметрів окремого спектрального каналу, їх взаємного розташування та реалізованих багатосмугових методів ВТВ.

### Список літератури

- [1] Minkina W. Podstawy pomiarow termowizyjnych / W. Minkina, P. Rutkowski, W. Wild // *Pomiary, automatyka, kontrola: miesiecznik naukowo-techniczny*. — 2000. — № 1. — Р. 7–14.
- [2] Wiecek B. Termowizja w podczerwieni podstawy i zastosowania / B. Wiecek, G. De Mey. — W: Wydawnictwo PAK, 2011. — Р. 372.
- [3] Noncontact Infrared Temperature Measurement. Industry Applications [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/IndustryApplications>. — Назва з екрана.
- [4] Ранцевич В.Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения / В.Б. Ранцевич. — Мн.: Наука и техника, 1989. — 104 с.
- [5] Гаррисон Т.Г. Радиационная пирометрия / Т.Г. Гаррисон. — М.: Мир, 1964. — 248 с.
- [6] Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения / Д.Я. Свет. — М.: Наука, 1968. — 236 с.
- [7] Гордов А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. — М.: Металлургия, 1971. — 446 с.
- [8] Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
- [9] Гоц Н.Е. Сравнительная характеристика методов пирометрии / Н.Е. Гоц // *Приборы + Автоматика*. — 2007. — № 7(85). — С. 35–50.
- [10] Снопко В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности / В.Н. Снопко. — Минск: Наука и техника, 1988. — С. 248.
- [11] Снопко В.Н. Широкоспектральная оптическая пирометрия: Часть 1 / В.Н. Снопко. — Минск, 1993. — 26 с. (Препринт / Ин-т физики АН Беларуси, 679).
- [12] Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. // Ж. Госсорг. / М.: Мир, 1988. — 399 с.
- [13] Гоц Н.Є., Микійчук М.М. Модель методології вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випромінюванням / Н.Є. Гоц // *Світлотехніка*. — 2014. — № 3–4. — С. 35–43.
- [14] Гоц Н.Є. Моделювання похибок вимірювання температури за випромінюванням багатоканальними методами / Н.Є. Гоц // *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: [зб. наук. пр.]*. — Л.: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». — 2011. — С. 107–112. (Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», № 710).
- [15] Hots N. Analiza czynników składowych błędów pirometrii radiacyjnej / N. Hots, T. Piątkowski // *Termografia i termometria w podczerwieni: materiały VII konf. krajowej TTP-2009, Ustroń-Jaszowiec, Polska, 22–24 października 2009 r.* — Ustroń-Jaszowiec, 2009. — S. 81–8.
- [16] Гоц Н.Є. Система критеріїв формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінювання / Н.Є. Гоц // *Технологический аудит и резервы производства*. — 2015. — № 2/3(22). — С. 34–38.
- [17] Назаренко Л.А. Методика визначення та оцінювання нелінійності оптично-реєструючої системи термометра випромінювання / Л.А. Назаренко, Н.Є. Гоц // *«Український метрологічний журнал»*. — 2012. — № 4. — С. 14–18.
- [18] Гоц Н.Є. Розвиток методу передавання температурної шкали інфрачервоним термометром випромінювання / Н.Є. Гоц, Г.І. Петриченко // *Метрологія та прилади*. — 2013. — № 1(33). — С. 19–25.