

УДК 621.307.13

ДОДАТКОВІ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ТЕЛЕВІЗІЙНІЙ ПІРОМЕТРІЇ

В.А. Порєв, О.С. Томашук*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, e-mail: prof@barvinok.net*

Розглянуто проблему оцінки додаткових похибок при вимірюванні температури телевізійним пірометром. Запропоновано методики оцінки додаткових похибок вимірювання температури, обумовлених геометричним шумом та мікрозміними коефіцієнта випромінювальної здатності і коефіцієнта пропускання середовища в ході неперервного технологічного процесу. Отримано аналітичні вирази для розрахунку додаткових відносних похибок вимірювання температури засобами телевізійної пірометрії.

Ключові слова: температура, телевізійний пірометр, похибки вимірювання, коефіцієнт пропускання, коефіцієнт випромінювальної здатності, геометричний шум.

Рассмотрено проблему оценки дополнительных погрешностей при измерении температуры телевизионным пирометром. Предложены методики оценки дополнительных погрешностей, обусловленных микроизменениями коэффициента излучаемой способности, изменениями коэффициента пропускания и геометрическим шумом.

Получены формулы для расчета относительных погрешностей измерения температуры средствами телевизионной пирометрии.

Ключевые слова: температура, телевизионный пирометр, погрешность измерения, коэффициент пропускания, коэффициент излучательной способности, геометрический шум.

The pyrometry problem of the estimation of the additional errors while measuring the temperature by television pyrometer are reviewed. A new method is proposed that will allow for estimation of additional errors caused by the micro-changes in the radiation ratio, transparency ratio and geometric noise. The algorithms for the calculation of the relative errors in the temperature measurements are substantiated.

Keywords: temperature, television pyrometer, measurement errors, transparency ratio, radiance ratio, geometric noise.

Вступ. Технічний розвиток (отже, і життєвий рівень) суспільства визначається не тільки наявністю досконалих технологій отримання нових речовин, матеріалів та виробів, але й відповідних методів і засобів контролю цих технологій, тобто інформаційно-вимірювальних технологій.

При цьому суттєвою відмінністю сучасного етапу науково-технічного прогресу є та обставина, що в технологічно розвинених країнах значна частка операцій контролю в високих технологіях здійснюється за допомогою засобів формування і аналізу зображень, серед яких особливе місце належить комп'ютеризованим телевізійним інформаційно-вимірювальним системам, які надають унікальну можливість провадити вимірювання геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів у реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням шляхом аналізу як власного випромінювання, так і того,

що відбилося або пройшло через об'єкт.

Надзвичайно перспективною виявилася ідея використання телевізійних засобів для вимірювання високих температур. Телевізійна пірометрія має загальну з традиційною пірометрією випромінювання теоретичну базу і, в той же час, завдяки особливостям формування сигналу дозволяє вирішувати сучасні наукові та технологічні задачі на якісно новому рівні [1].

Така властивість телевізійних пірометрів (ТП) створює умови для підвищення ефективності контролю, а, отже, для підвищення якості продукції в багатьох провідних технологіях, таких як електронно-променева технологія очищення та напилення в вакуумній камері, зварювання, лазерна обробка матеріалів, високотемпературне відпалювання труб складної конфігурації, гаряче штампування, виробництво металів, сплавів, прокату, дроту, порцелянових та скляних ізоляторів, спеціального склопосуду тощо. Можливості

телевізійних приладів дозволяють реалізувати будь-який із методів традиційної чи нетрадиційної пірометрії із врахуванням обмежень щодо діапазону спектральної чутливості.

Спектральні можливості ТП дозволяють реалізувати вимірювання яскравісної температури чи температури спектрального відношення, базуючись на законі Планка, який встановлює залежність спектральної щільності випромінювання від температури.

Вибір методу вимірювання (яскравісного чи спектрального відношення) обумовлюється аналізом очікуваних методичних похибок методу спектрального відношення та яскравісного методу. Відомо, що пірометри спектрального відношення характеризуються потенційно більшою точністю в широкому діапазоні температур і випромінювальної здатності, але методична похибка яскравісних пірометрів, які використовуються для вимірювання температури одного і того ж об'єкту в порівняно вузькому діапазоні, може бути меншою [2].

Постановка задачі. При дослідженні проблеми точності вимірювання температури, а також похідної від неї проблеми вибору методу та засобу вимірювання, необхідно врахувати не тільки традиційні (принципові) джерела методичних похибок, які визначають особливості пірометрії випромінювання, зокрема, домінування методичної похибки, але й аналізувати можливі джерела додаткових похибок.

Не підлягає сумніву, що головними джерелами методичних похибок в пірометрії випромінювання, крім похибок, пов'язаних з використанням умовних температур, є похибки визначення коефіцієнту випромінювальної здатності, та похибки, обумовлені впливом випромінювання сторонніх джерел.

Найскладнішою, на нашу думку, є ситуація з впливом випромінювання сторонніх джерел. Справа в тому, що в потоці випромінювання, який потрапляє на світлоелектричний перетворювач ТП, може бути також і випромінювання сторонніх джерел, відбите від поверхні об'єкту. За певних умов, наприклад, коли температура стороннього джерела вища за температуру об'єкта або об'єкт характеризується великим коефіцієнтом відбиття, частка стороннього випромінювання може бути досить значною. Вплив випромінювання сторонніх джерел на результати досліджень температурних полів та можливі методи його врахування частково

розглядалися в [3]. Складність практичного використання аналітичних методів врахування впливу випромінювання сторонніх джерел на результати досліджень температурних полів полягає в тому, що вони розраховані, як правило, для конкретних простих випадків. До того ж, використання розрахункових методів може бути пов'язане ще з одним джерелом похибок — зміною коефіцієнта пропускання середовища протягом технологічного циклу.

Змінами значень коефіцієнтів пропускання середовища чи компонентів оптичної схеми в більшості важливих випадків (науково-дослідна лабораторія, чисті виробництва, робота у так званих вікнах прозорості) можна знехтувати. В інших випадках для компенсації впливу змін коефіцієнта пропускання в пірометрії широкого застосування набув метод поправок, але його застосування виправдане тільки тоді, коли коефіцієнт пропускання має постійне значення протягом технологічного циклу або прогнозовано змінюється. Це припущення не відповідає, наприклад, задачі контролю параметрів зони плавки в вакуумній камері, коли зміни коефіцієнту пропускання ілюмінатора протягом циклу визначаються типом та розподілом концентрації домішок, які частково випаровуються, параметрами електронного пучка та магнітного поля тощо. Отже, зміни коефіцієнту пропускання в ході плавки є потенційним джерелом додаткових похибок вимірювання температури.

Проблема визначення коефіцієнта випромінювальної здатності має загальний характер для всіх пірометричних задач і для їх вирішення, як правило, застосовуються універсальні методи [2]. Теоретично у методі пірометрії спектрального відношення невизначеність коефіцієнту випромінювальної здатності має бути скомпенсованою, що і спостерігається для більшості прикладних задач. В той же час в деяких випадках застосування методів біспектральної пірометрії не дає можливості позбутися похибок, обумовлених змінами коефіцієнта випромінювальної здатності одного і того ж об'єкту в процесі вимірювання. Отже, мікрозміни коефіцієнта випромінювальної здатності можуть бути потенційним джерелом додаткових похибок.

Концепція використання ТП для аналізу оптичних полів враховує колосальний потенціал елементної бази телевізійних засобів вимірювання і базується на уявленні про світлоелектричний перетворювач як про упорядковану сукупність ідентичних і незалежних мікроперетворювачів. Зрозуміло, що в реальності всі зазначені умови, крім

упорядкованості, можуть виконуватися тільки з деякими обмеженнями.

Якщо ідентичність означає, що всі мікроперетворювачі формують однаковий сигнал за умови рівної освітленості, то неідентичність полягає в тому, що сигнали, утворені різними пікселями при однаковій освітленості можуть бути різними. Наприклад, за умови $E'_{kl}=E'_{mn}$, тобто при однаковій освітленості пікселів (kl) і (mn), ними можуть бути сформовані неоднакові сигнали $A_{kl}\neq A_{mn}$. Навпаки, при неоднаковій освітленості тих же пікселів $E'_{kl}\neq E'_{mn}$ будуть сформовані однакові сигнали $A_{kl}=A_{mn}$. На практиці оперують також термінами «нерівномірність сигналу», «геометричний шум», що фактично означає неідентичність властивостей елементів розкладу зображення з точки зору перетворення освітленості в електричний сигнал, яка визначається за формулою

$$N_C = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де A_{\max} , A_{\min} — максимальне і мінімальне значення сигналу в межах поля зображення чи ділянки, яка розглядається.

Якщо концепція використання телевізійних засобів накладає обов'язкову умову врахування або компенсації нерівномірності сигналу в межах поля зображення, яка в тій чи іншій мірі властива всім без винятку світлоелектричним перетворювачам, то це не означає, що при цьому можна оминати проблему оцінки додаткових похибок, обумовлених нескомпенсованим геометричним шумом при вимірюванні температури за допомогою ТП.

Метою даної роботи є вдосконалення методик оцінки додаткових похибок вимірювання температури, обумовлених мікрозміними коефіцієнта випромінювальної здатності, змінами коефіцієнта пропускання та геометричним шумом.

Результати досліджень

Поняття коефіцієнта випромінювальної здатності є одним із базових понять пірометрії випромінювання, оскільки яскравість реального тіла, яка, власне, і несе інформацію про температуру його поверхні, кількісно визначається добутком коефіцієнта випромінювальної здатності та яскравості абсолютно чорного тіла (АЧТ). В задачах, пов'язаних з аналізом температурного поля, значні ускладнення виникають при встановленні точного значення коефіцієнта випромінювальної

здатності, який є складною функцією не тільки довжини хвилі випромінювання, температури, чистоти та фазового стану поверхні, а й кута між нормаллю та напрямком випромінювання, а також величини тілесного кута, в якому поширюється випромінювання. При цьому коефіцієнт випромінювальної здатності залежить від ширини спектрального інтервалу, тому визначають монохроматичний та інтегральний (повний) коефіцієнт випромінювальної здатності. Можливе визначення коефіцієнта випромінювальної здатності для заданого спектрального діапазону, де його значення буде відрізнятися як від монохроматичного так і від інтегрального. Розрізняють також напівсферичний коефіцієнт випромінювальної здатності — для випромінювання в напівсфері, нормальний та направлений — для випромінювання в вузькому тілесному куті нормально до поверхні та під кутом до нормалі (для дифузних поверхонь ці значення співпадають). Іноді ця проблема своєю складністю перевершує власне проблему аналізу температурного поля.

Для визначення коефіцієнта випромінювальної здатності застосовуються як розрахункові, так і експериментальні методи. Розрахункові методи базуються на певних припущеннях відносно характеру поверхні, що може бути джерелом похибки.

В експериментально отриманих значеннях крім інструментальної похибки завжди є похибка, пов'язана із неможливістю повного відтворення умов експерименту, стану та чистоти поверхні, впливу зовнішнього середовища тощо, а спектральна характеристика приладу, який використовувався при визначенні коефіцієнта випромінювальної здатності практично ніколи не відзначається в довідниках.

Отже, неповнота даних при неможливості точного відтворення умов, за яких вони були отримані, роблять будь-яку методику безконтактного аналізу температурного поля, що використовує як розрахункові, так і експериментальні значення коефіцієнта випромінювальної здатності, основним джерелом похибок. Оскільки ця проблема є спільною для пірометрії випромінювання в цілому, то для її вирішення в телевізійній пірометрії можна застосовувати достатньо розвинені методи мультиспектрального аналізу.

Зокрема, відомо, що метод біспектральної пірометрії дозволяє підвищити точність вимірювання температури завдяки виключенню впливу можливої неоднозначності коефіцієнта випромінювальної здатності, оскільки вимірювання виконується одразу у двох

спектральних діапазонах, а пірометричний сигнал ε часткою монохроматичних пірометричних сигналів $A(\lambda_1)$, $A(\lambda_2)$ на різних довжинах хвилі. Якщо $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$, то формула для обчислення температури матиме наступний вигляд [4]:

$$T = \frac{C_2}{\lambda_{ек}} \frac{1}{\ln(A(\lambda_1)/A(\lambda_2))}, \quad (2)$$

де $\lambda_{ек} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ – еквівалентна довжина хвилі.

Якщо коефіцієнти неоднакові і зберігають постійні значення протягом всього циклу вимірювання, то формула для визначення температури поверхні буде такою [4]:

$$T = \frac{C_2}{\lambda_{ек}} \frac{1}{\left[\ln(A(\lambda_1)/A(\lambda_2)) - \ln(\varepsilon(\lambda_1)/\varepsilon(\lambda_2)) \right]}. \quad (3)$$

При цьому може мати місце додаткова похибка внаслідок невеликих і непрогнозованих змін коефіцієнта випромінювальної здатності одного і того ж об'єкту в процесі вимірювання.

Наприклад,

$$\varepsilon(\lambda_1) = (\lambda_2) + \Delta\varepsilon. \quad (4)$$

Якщо $\Delta\varepsilon \ll \varepsilon(\lambda_2)$, то

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)} = 1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (5)$$

Після логарифмування отримаємо

$$\ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right). \quad (6)$$

Оскільки $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)} \ll 1$, то функція

$\ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right)$ може бути представлена рядом Маклорена:

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right) = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (7)$$

Підставивши (7) в (3), отримаємо:

$$T = \frac{C_2}{\lambda} \frac{1}{\left[\ln\left(\frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)}\right) - \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)} \right]}. \quad (8)$$

Після диференціювання (8) і переходу до скінчених приростів отримаємо формулу, яка встановлює зв'язок між значенням $\Delta\varepsilon$ і абсолютною похибкою вимірювання температури ΔT , а саме:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{C_2} T^2 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (9)$$

Відносна похибка вимірювання температури δ_T обумовлена мікрозміними коефіцієнта випромінювальної здатності:

$$\delta_T = \frac{\lambda}{C_2} T \delta_\varepsilon, \quad (10)$$

де δ_ε – відносна зміна коефіцієнта випромінювальної здатності.

Для визначення додаткової похибки, обумовленої геометричним шумом, що є основним фактором, який формує інструментальну похибку в телевізійній пірометрії, можна скористатися формулою [5]:

$$T = \frac{C_2}{\lambda} [\ln B - \ln A]^{-1}, \quad (11)$$

де $C_2 = 14400$ мкм·К; λ – ефективна довжина хвилі; B – параметр, який враховує умови роботи і характеристики телевізійного пірометра; A – сигнал на виході.

Після диференціювання та переходу до скінчених приростів отримаємо аналітичний вираз для похибки, обумовленої геометричним шумом:

$$\Delta T = \frac{\Delta A}{A} T^2 \frac{\lambda}{C_2}, \quad (12)$$

де ΔA – різниця максимального і мінімального значень сигналів в межах поля зображення чи ділянки, яка розглядається, A – їх сума.

Використаємо очевидне співвідношення, яке впливає з формули (1), для нерівномірності чутливості сигналу, сформованого при однаковій освітленості в межах поля зображення чи певної його ділянки:

$$\Delta A/A = 2N. \quad (13)$$

Підставивши (13) в (12), отримаємо відносну похибку вимірювання температури в методі моноспектральної пірометрії δ_T , обумовлену геометричним шумом:

$$\delta_T = T \frac{\lambda}{C_2} 2N. \quad (14)$$

Зрозуміло, що і в методі біспектральної пірометрії нерівномірність чутливості впливатиме на точність вимірювання, оскільки сигнали $A(\lambda_1)$ і $A(\lambda_2)$, отримані незалежно один від одного.

Для оцінки впливу нерівномірності чутливості в методі біспектральної пірометрії продиференціюємо вираз (8), а після переходу до скінчених приростів отримаємо

$$\Delta T = 4 \frac{\lambda_{ек}}{C_2} T^2 N, \quad (15)$$

де $\lambda_{ек} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ – еквівалентна довжина хвилі.

Відносна похибка методу біспектральної телевізійної пірометрії, обумовлена нерівномірністю чутливості СЕП буде такою:

$$\delta_T = 4 \frac{\lambda_{ек}}{C_2} TN. \quad (16)$$

Як зазначалось вище, може виникнути ситуація, коли коефіцієнт пропускання середовища чи оптичної системи змінюється в ході неперервного технологічного процесу. Наприклад, частина домішок в процесі зонної плавки, яка проходить у вакуумній камері, випаровується, що супроводжується їх осадженням на внутрішній поверхні ліюмінатора.

За умови, що коефіцієнт пропускання під час технологічного процесу змінюється, формула (11) матиме такий вигляд:

$$T_2 = \frac{C_2}{\lambda} [\ln B - \ln \tau(t) - \ln A]^{-1}. \quad (17)$$

Після диференціювання та переходу до скінчених приростів отримаємо, що

$$\Delta T = \frac{\lambda}{C_2} T_1 T_2 \ln \tau_{oc}(t). \quad (18)$$

При великих значеннях вимірюваної температури, наприклад, розглядається зонна плавка, врахуємо, що значення температур T_1 та T_2 знаходяться в діапазоні від 1685 до 1715 К, а середнє значення температури при цих умовах близько 1700 К. Отже, для подальших розрахунків приймемо середнє значення температури, а формулу (18) можна переписати у наступному вигляді:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{C_2} T^2 \ln \tau_{oc}(t). \quad (19)$$

Відносна похибка вимірювання температури δ_T , обумовлена змінами коефіцієнта пропускання

$$\delta_T = \frac{\lambda}{C_2} T \ln \tau_{oc}(t). \quad (20)$$

ВИСНОВКИ

Показано, що при дослідженні проблеми точності вимірювання температури, а також похідної від неї проблеми вибору методу та засобу вимірювання, необхідно враховувати не тільки традиційні (принципові) джерела методичних похибок, які обумовлені особливостями пірометрії випромінювання, але й аналізувати можливі джерела додаткових похибок.

Запропоновано методики оцінки додаткових похибок вимірювання температури, обумовлених геометричним шумом та мікрозмінами коефіцієнта випромінювальної здатності і коефіцієнта пропускання середовища в ході неперервного технологічного процесу.

Отримано аналітичні вирази для розрахунку додаткових відносних похибок вимірювання температури засобами телевізійної пірометрії.

1. Порєв В.А. Телевізійні інформаційно-вимірювальні системи [Текст] / В.А. Порєв. – К.: 2015. – 218 с. 2. Киренков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии [Текст] / И. И. Киренков. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 140 с. 3. Ранцевич В.Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения.—Мн.: Наука и техника, 1989.— 104 с. 4. Маркін М. О. Біспектральний телевізійний прилад контролю високо-температурних технологій / М. О. Маркін, В. А. Порєв // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – №23. – С. 102-105. 5. Порєв Г. В. Інформаційна технологія контролю перегріву рідкої фази у процесі зонної плавки кремнію [Текст] / Г. В. Порєв // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – № 2. – С. 93-97. 5.

Поступила в редакцію 07.12.2015р.

Рекомендували до друку: докт. фіз.-мат. наук, проф. Галушак М. О., докт. техн. наук, проф. Заміховський Л. М.