

Прикладні аспекти: простежуваність вимірювань

УДК 536.521.2

Н.Є. Гоц

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НЕЛІНІЙНОСТІ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНО-ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕТАЛОННОГО ТЕРМОМЕТРА ВИПРОМІНЕННЯ

В статті представлено метод визначення нелінійності функції перетворення оптично-приймальної системи еталонного термометра випромінювання на основі багатоточкового методу реалізації температурної шкали та запропоновано методику визначення невизначеності нелінійності

Ключові слова: термометр випромінювання, нелінійність оптично-приймальної системи, невизначеність

Вступ

Постановка проблеми. Основним завданням удосконалення температурної шкали є її наближення до термодинамічної температурної шкали (ТШ), яка реалізується через основні закони фізики, що пов'язують температуру з фізичними величинами та універсальними сталими. Тому актуальним є розвиток методу передачі температурної шкали термометрам випромінювання (ТМВ) за основи закону Планка

та випромінювача типу абсолютно-чорного тіла, як еталона-переносника шкали з використанням інтерполяційного рівняння. Це дозволить підвищити точність передачі температурної шкали термометрам випромінювання, а значить і підвищити точність вимірювання температури за випромінюванням в цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. Загальна схема передачі ТШ термометрам випромінювання на основі фундаментального закону Планка з використанням АЧТ, як еталона-переносника, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Загальна схема передачі температурної шкали термометрам випромінювання на основі фундаментального закону Планка з використанням регульованого АЧТ, як еталона-переносника

Для формування рівняння інтерполяції на основі закону Планка при використанні еталонного термометра випромінювання (ТМВ) необхідне забезпечення лінійності оптично-приймальної системи термометра випромінювання. Для забезпечення експоненційної залежності вихідного сигналу $S[T]$ оптично-приймальної системи (ОПС) еталонного термометра випромінювання від температури T (згідно закону Планка) має бути лінійна залежність вихідного сигналу $S[T]$ (напруги, струму або опору) від потоку випромінювання $\Phi[\lambda, T]$, що надходить на оптичну систему термометра випромінювання.

Модель перетворення потоку випромінювання, пропорційного температурі об'єкта дослідження T , у вихідний сигнал оптично-приймальної системи $S[T]$ термометра випромінювання описана системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Phi[\lambda, T] = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot [\exp(C_2 / (\lambda T + B)) - 1]^{-1}; \\ S[T] = k \cdot \Phi(T), \end{cases} \quad (1)$$

де $\Phi[\lambda, T]$ - потік випромінювання, що надходить на оптичну систему ТМВ; k - коефіцієнт перетворення оптично-приймальної системи ТМВ.

Для забезпечення лінійного характеру функції перетворення оптично-приймальної системи ТМВ мають виконуватися дві умови суперпозиції [1,2]:

- умова адитивності: $f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$;
- умова однорідності: $f(Cx) = Cf(x)$, де $C = \text{const}$.

Відхилення реальної функції перетворення вимірювального перетворювача від номінальної є абсолютною похибкою вимірювального тракту:

$$\Delta(x) = f(x, \xi_1, \dots, \xi_m, t) - f_{\text{ном}}(x). \quad (2)$$

В реальності функція перетворення оптично-приймальної системи ТМВ носить нелінійний характер, оскільки залежить від ряду факторів. Сприйняття випромінення приймачем відбувається селективно (вибірково) в певному спектральному інтервалі. В межах цього діапазону приймач має різну чутливість до випромінення з різними довжинами хвиль, що характеризується спектральною чутливістю $R_i(\lambda)$ - функцією, що пов'язує спектральну густину енергії випромінення на даній довжині хвилі та спектральний відгук $G_i(\lambda)$ (напруга, струм, опір) приймача випромінення на сприйняте випромінення. Крім того на чутливість приймача випромінення впливає спектральне попускання оптичної системи термометра випромінення $\varphi(\lambda)$ – лінз, дзеркал та ін. Також використовують різні оптичні фільтри, що характеризуються функціями пропускання $o(\lambda)$, які виділяють випромінення в різних спектральних діапазонах. В результаті спектральна передаточна функція, яка в літературі зустрічається під назвою назва «апаратна функція», визначатиметься наступними факторами [3,4]:

$$\Psi_i(\lambda) = R(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot \varphi(\lambda). \quad (3)$$

Необхідно відмітити, що нелінійність функції перетворення термометра випромінення є домінуючою компонентою невизначеності побудови температурної шкали [5, 6]. Існуючі конструкторсько-технологічні та схемо-технічні методи лінеаризації функції перетворення [7] не дозволяють повністю досягнути необхідного ступеня лінеаризації, оскільки в реальних умовах існує вплив спектральної та температурної залежності потоку випромінення на вихідний сигнал ТМВ. Це визначає необхідність введення поправок на нелінійність.

Мета статті. Отже, розглянуте дає підставу для застосування в еталонному термометрі випромінення методу визначення нелінійності функції перетворення ОПС ТМВ у відповідному температурному діапазоні з метою наступного введення поправки. Тобто в еталонному термометрі випромінення має встановлюватися уточнена на основі експериментальних поправок лінійна функція перетворення ОПС.

Виклад основного матеріалу

Запропонована нами методика оцінювання та врахування нелінійності оптично-приймальної системи термометра випромінення базується на багатоточковому методі передачі температурної шкали з використанням декількох (від 3 та більше) реперних точок. Апроксимуюча пряма будується методом крайніх точок на основі вихідних сигналів $S_{1л}(\Phi)$ та $S_{3л}(\Phi)$ від сприйняття потоків випромінення $\Phi(T_1)$ та $\Phi(T_3)$. За значенням вихідного сигналу оптично-приймальної системи термометра випромінення при сприйнятті випромінення проміжних реперних точок будується функціональна залежність поправки вихідного сигналу на нелінійність. Для кожної з проміжних точок темпе-

ратурної шкали T_i вводиться поправка $p(S_i(\Phi))$ на нелінійність: $S_{iл}(\Phi) = S_{iн}(\Phi) + p(S_i(\Phi))$. Послідовність виконання операцій методики представлена на рис. 2.

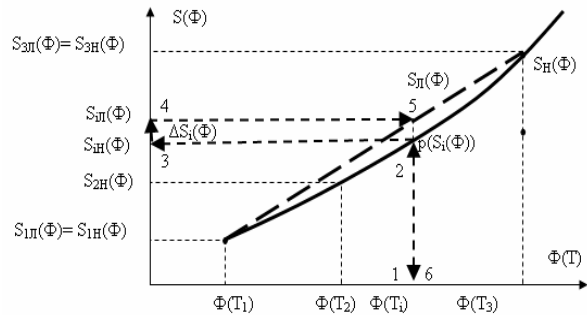


Рис. 2. Загальна послідовність операцій введення поправок на нелінійність функції перетворення ОПС ТМВ

На основі [8, 9] нами запропонована методика оцінювання невизначеності нелінійності функції перетворення оптично-приймальної системи еталонного термометра випромінення для прецизійної передачі температурної шкали. Для оцінювання невизначеності, яку вносить нелінійність функції перетворення ОПС ТМВ доцільно скористатись методом найменших квадратів. Для цього будуємо експериментальну залежність $S = f(\Phi)$, значення записуємо у таблицю. Задаємо лінійну функціональну залежність

$$S = \eta(\Phi_i - \Phi_0) + S_0, \quad (4)$$

де Φ_i – потік випромінення в i -й точці функціональної залежності; Φ_0 - потік випромінення, що відповідає температурі реперної точки.

Визначаємо оцінки параметрів η та S_0 лінійної залежності методом найменших квадратів за експериментальними значеннями. Нормальна система рівнянь має вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_i = nS_0 + \eta \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0); \\ \sum_{i=1}^n [S_i(\Phi_i - \Phi_0)] = S_0 \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0) + \eta \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2. \end{cases} \quad (5)$$

В результаті розв'язування даної системи рівнянь отримуємо наступні вирази для визначення параметрів η та S_0 лінійної залежності:

$$S_0 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2 - \sum_{i=1}^n [S_i(\Phi_i - \Phi_0)] \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0) \right)^2}. \quad (6)$$

$$\eta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n S_i(\Phi_i - \Phi_0) - \sum_{i=1}^n S_i \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0) \right)^2}. \quad (7)$$

Підставляємо значення η та S_0 в лінійну залежність. Значення нев'язок визначаємо з рівняння:

$$\Delta_{pi} = \eta(\Phi_i - \Phi_0) + S_0 - S_i. \quad (8)$$

Значення нев'язок в кожній точці відповідають значенням поправок, які необхідно внести для забезпечення лінійності функції перетворення приймача випромінювання.

Сумарна невизначеність визначається як корінь з оцінки дисперсії згідно виразу:

$$u_c(S) = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial S_0}\right)^2 \cdot s^2(S_0) + \left(\frac{\partial S}{\partial \eta}\right)^2 \cdot s^2(\eta) + 2 \frac{\partial S}{\partial S_0} \cdot \frac{\partial S}{\partial \eta} \cdot u(S_0, \eta)}, \quad (9)$$

де $u(S_0, \eta)$ – коефіцієнт кореляції між параметрами η та S_0 , який визначається як:

$$u(S_0, \eta) = s^2(\Delta_{pi}) \cdot \frac{-\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)\right)^2}. \quad (10)$$

Для лінійної апроксимаційної залежності сумарна невизначеність визначається за формулою:

$$u_c(S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2 + n - 2 \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0) \cdot \sum_{i=1}^n \Delta_{pi}^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_0)\right)^2} \times \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{pi}^2}{n - 2}}. \quad (11)$$

Даний вираз визначає сумарну невизначеність від нелінійності функції перетворення пірометричного перетворювача та пов'язує сумарну невизначеність зі значеннями поправок в залежності від значення температури реперної точки та значеннями потоку випромінювання в точках визначення параметра нелінійності.

Висновок

Запропонована методика визначення не лінійності оптично-приймальної системи термометра

випромінювання дозволяє визначити функціональну залежність значень поправок на нелінійність у всьому температурному діапазоні ТМВ. Ведення поправки дозволяє мінімізувати нелінійність оптично-реєструючої системи термометра випромінювання та конструювати прецизійні еталонні термометри випромінювання для передачі температурної шкали на основі закону Планка.

Список літератури

1. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К.: Вища шк., 1976. – 432 с.
2. Данилов А.А. Методы и средства оценивания нелинейности функции преобразования измерительных преобразователей / А.А. Данилов. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 138 с.
3. Гриневич Б.Ю. Концепція раціонального вибору пірометрів випромінювання для машинобудівної галузі / Б.Ю. Гриневич, В.М. Засименко, Н.С. Гоц // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. – Львів: ВКП "ВМС". - 2000. – Вип.3. – С. 48-52.
4. Засименко В.М. Пірометричні перетворювачі підвищеної точності / Теорія і практика /: Дисертація канд. техн. наук: 05.11.04. – Львів, 1994. – 256 с.
5. Temperature: Measurement and Control / J. Fischer, M. Battuello and so on // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. – 2003. – Vol. 7, ed. by D.C. Ripple (AIP, Melville, New York, 2003. – P. 631–638.
6. P. Saunders D. R. White. Propagation of Uncertainty Due to Non-linearity in Radiation Thermometers. International Journal of Thermophysics, Volume 28, Issue 6. – P. 2098-2110.
7. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин: [Учеб. для вузов электротехн. спец. / М.А. Гаврилюк, Е.С. Полищук, С.С. Обозовский и др.] ; Под ред. Е.С. Полищука. – К/ Вища шк. 1984. – 359 с.
8. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
9. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях. Учеб. пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х.: Консум, 2002. – 256 с.

Надійшла до редколегії 19.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИКО-РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭТАЛОННОГО ТЕРМОМЕТРА ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Е. Гоц

В статье представлен метод определения нелинейности функции преобразования оптико-регистрающей системы эталонного термометра излучения на основе многоточечного метода реализации температурной шкалы и предложена методика оценки неопределенности нелинейности.

Ключевые слова: термометр излучения, нелинейность оптико-регистрающей системы, неопределенность.

THE UNCERTAINTY ESTIMATE METHOD OF NONLINEAR TRANSFER FUNCTION OF REFERENCE RADIATION THERMOMETER'S OPTICAL REGISTRATION SYSTEM

N.E. Hots

In the article the method for determining the nonlinearity of calibration function of radiation thermometer on the basis of the multipoint temperature scale's realization method is submitted and the methodology for determining the uncertainty nonlinearity is suggested.

Key words: radiation thermometer, nonlinearity of calibration function, uncertainty.