

УДК 536.521.2

Н.Є. Гоц, канд. техн. наук

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ХАРАКТЕРИЗУВАННЯ ТОЧНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Сформульовано концепцію аналізу окремих складових різних етапів вимірювання температури за випромінюванням. Проведено дослідження бюджету невизначеності процесу вимірювання температури за випромінюванням. Запропоновано методику аналізу бюджету невизначеності процесу вимірювання температури та методику оцінювання невизначеності функції нелінійності оптично-реєструючої системи термометра випромінювання.

Ключові слова: температура випромінювання, бюджет невизначеності, точність вимірювання температури за випромінюванням.

N.J. Hots, PhD.

SYSTEMATIC APPROACH TO CHARACTERIZATION ACCURACY OF TEMPERATURE RADIATION MEASUREMENT

The paper formulates the concept of analyzing the individual components of the various phases of temperature measurement by radiation. The research budget of uncertainty of the process temperature measurement by radiation. Formulated the method for analysis of radiation thermometry budget uncertainty and methods for uncertainty estimation function is linear-optical recording system radiation thermometer.

Key words: radiation thermometry, budget uncertainty, the accuracy of temperature radiation measurement.

Н.Е. Гоц, канд. техн. наук

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ХАРАКТЕРИСТИКЕ ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ

Сформулирована концепция анализа отдельных составляющих различных этапов измерения температуры по излучению. Проведено исследование бюджета неопределенности процесса измерения температуры по излучению. Предложены методика анализа бюджета неопределенности процесса измерения температуры и методика оценки неопределенности функции нелинейности оптически регистрирующей системы термометра излучения.

Ключевые слова: температура излучения, бюджет неопределенности, точность измерения температуры по излучению.

Актуальність проблеми. Як і кожний процес вимірювання певної фізичної величини, процес вимірювання температури за випромінюванням складається з комплексу етапів – від визначення одиниці термодинамічної температури, побудови та передачі температурної шкали, перетворення вимірювальної інформації, опрацювання даних і т.д. до візуалізації результату вимірювання [1].

У процесі вимірювання температури за випромінюванням на різних його етапах різноманітні фактори впливу, дійсні значення яких невідомі, накладаються на значення вимірюваної величини, що спричиняє недостатньо високу точність вимірювання температури об'єкта за випромінюванням. Тому проблема виявлення цих факторів, їх аналіз та оцінка з метою розроблення методів підвищення точності є актуальною.

© Гоц Н.Є., 2012

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для характеристики точності вимірювання в світову метрологічну практику поряд з поняттям «похибка вимірювання» все ширше вводиться поняття «невизначеність вимірювання».

На відміну від поняття похибки вимірювання, яке характеризує відхилення результату від дійсного значення фізичної величини, невизначеність – це параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, що характеризує розсіювання значень, які б могли бути приписані вимірюваній величині [2,3].

Невизначеність – це статистичний параметр, на формування статистичних параметрів якого впливає значна кількість випадкових факторів, які все ж таки можна сформулювати в окремі групи за ознаками місця впливу на формування результату вимірювання. Аналіз впливу різних факторів на різних етапах вимірювання температури за випромінюванням

нюванням доцільно провести шляхом формування та аналізу бюджету невизначеності.

Формулювання мети статті. Автором був проведений аналіз процесу вимірювання температури за випромінюванням та визначено чинники, які мають найсуттєвіший вплив на точність результату вимірювання температури та потребують вдосконалення. Аналіз бюджету невизначеності проведено з використаннями методу причинно-наслідкової діаграми Ісікави (рисунок), яка показує вплив окремих етапів вимірювання та їх складових на точність вимірювання температури за випромінюванням. Кожен процес вимірювань складається з ряду етапів (процесів), представлених на слайді, які в свою чергу формуються з окремих складових. Аналіз бюджету невизначеності згідно з даною діаграмою на основі [4] дасть змогу виявити основні складові, що мають найсуттєвіший вплив на точність вимірювання температури за випромінюванням та її основну характеристику — сумарну стандартну невизначеність.

Виклад основного матеріалу. Оскільки на процес вимірювання температури за випромінюванням одночасно впливає значна кількість джерел невизначеності різних етапів, то доцільно говорити про комбіновану

(сумарну) стандартну невизначеність визначення температури. Сумарна невизначеність процесу вимірювання температури за випромінюванням залежатиме від стандартних невизначеностей окремих етапів згідно з рисунком з урахуванням їх вагових коефіцієнтів та можливого кореляційного зв'язку між ними.

Якщо нема взаємної кореляції між невизначеностями окремих етапів очікувана, сумарна невизначеність процесу вимірювання температури випромінювання $u_c(T)$ визначається як середньоквадратичне значення складових сумарних невизначеностей окремих етапів відповідно до рис. 1:

$$u_c(T) = [C_1^2 u_K^2(T) + C_2^2 u_{Ш}^2(T) + C_3^2 u_{ЕЗВТ}^2(T) + C_4^2 u_{ММ}^2(T) + C_5^2 u_{МВ}^2(T) + C_6^2 u_{ЗВ}^2(T) + C_7^2 u_{МОР}^2(T) + C_8^2 u_{НД}^2(T) + C_9^2 u_{Ін}^2(T)]^{1/2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 u_{ci}^2(T)}, \quad (1)$$

де $u_K(T)$ – сумарна невизначеність визначення одиниці термодинамічної температури Кельвін; $u_{Ш}(T)$ – сумарна невизначеність методу побудови температурної шкали та методу інтерполяції; $u_{ЕЗВТ}(T)$ – сумарна невизначеність передачі температурної шкали з використанням еталонних засобів вимірювання; $u_{ММ}(T)$ – сумарна невизначеність від



Рис. 1 Причинно-наслідкова діаграма впливу окремих етапів вимірювання на точність вимірювання температури за випромінюванням

Температурні вимірювання

неадекватності математичної моделі об'єкта, процесу та умов вимірювання температури за випромінюванням; $u_{MB}(T)$ – сумарна невизначеність методу вимірювання; $u_{зв}(T)$ – сумарна невизначеність засобу вимірювання; $u_{мор}(T)$ – сумарна невизначеність методу опрацювання результатів вимірювання; $u_{нд}(T)$ – сумарна невизначеність від впливу недосконалості нормативної документації в галузі ВТВ (методик виконання вимірювань, методик повірки і т.д.); $u_{ін}(T)$ – сумарна невизначеність впливу інших чинників; C_1, \dots, C_9 – вагові коефіцієнти складових не-

визначеності з врахуванням можливого кореляційного зв'язку між ними на окремих етапах процесу вимірювання температури за випромінюванням.

Дійсно, між окремими етапами і складовими етапів процесу вимірювання температури за випромінюванням існує зв'язок, що виражається їхньою кореляційною залежністю. Дослідження наявності кореляційних зв'язків між окремими етапами вимірювання температури за випромінюванням наведено в таблиці.

1. Аналітичне дослідження наявності кореляційних зв'язків між окремими етапами вимірювання температури за випромінюванням

Етапи вимірювання температури випромінювання	Визначення одиниці термодинамічної температури	Метод побудови температурної шкали	Засоби та методи передачі температурної шкали	Математична модель об'єкта, процесу та умов	Властивості методу вимірювання	Властивості засобу вимірювання	Метод опрацювання результатів вимірювання	Нормативно-методичне забезпечення
Визначення одиниці термо динамічної температури	1	+	+	—	—	—	—	—
Метод побудови шкали	+	1	+	—	—	—	—	—
Засоби та методи передачі температурної шкали	+	+	1	—	+	+	—	+
Математична модель об'єкта, процесу та умов	—	—	—	1	+	+	+	+
Властивості методу вимірювання	—	—	+	+	1	+	+	+
Властивості засобу вимірювання	—	—	+	+	+	1	+	+
Метод опрацювання результатів вимірювання	—	—	—	+	+	+	1	+
Нормативно-методичне забезпечення	—	—	+	+	+	+	+	1

За наявності кореляції між окремими джерелами впливу – етапами процесу вимірювання температури за випромінюванням – вираз очікуваної сумарної невизначеності вимірювання згідно з таблицею визначатиметься

$$u_c(T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_i^2(T) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i c_j u_i(T) u_j(T) r(u_i(T), u_j(T))}, \quad (2)$$

де $r(u_i(T), u_j(T))$ – коефіцієнти кореляції між окремими джерелами впливу.

За умови $r(u_i(T), u_j(T)) = 0$ нема впливу одного етапу вимірювання на інший.

Отже, виявлення та усунення джерел максимальної невизначеності складових окремого етапу вимірювання позитивно відобразиться на всьому процесі вимірювання і дасть змогу підвищити точність вимірювання температури за випромінюванням.

В свою чергу, сумарна невизначеність окремого і-го етапу процесу вимірювання температури за випромінюванням залежатиме від стандартних невизначеностей незалежних складових окремих джерел впливу. Кожен і-й етап вимірювання можна охарактеризувати залежність вимірюваної температури від ряду факторів – джерел невизначеності

$$T = f(x_1, x_2, \dots, x_q). \quad (3)$$

Ознаки, за якими можна класифікувати фізичні джерела невизначеності кожного етапу процесу вимірювання:

зміни характеристик засобів вимірювання температури за випромінюванням;

репрезентативність вибірки при багаторазових вимірюваннях температури;

зміна умов навколишнього середовища, зокрема пропускання атмосферного та зміна повітря випромінювання фону;

динамічні зміни властивостей об'єкта вимірювання;

використання наближень, припущень та апроксимацій у методі та процедурі вимірювання;

невідповідність математичних моделей реальним властивостям об'єкта вимірювання, зокрема коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта;

недосконалість методів обчислень;

суб'єктивні похибки оператора і т.п.

Сумарна стандартна невизначеність і-го етапу вимірювання складається з невизначеності типу А та невизначеності типу В цього етапу:

$$u_{ci}(T) = \sqrt{u_{Ai}^2(x) + u_{Bi}^2(x)}. \quad (4)$$

Невизначеності типу А даного і-го етапу вимірювання визначається на основі статистичного опрацювання результатів визначення температури даними засобами та методами відповідного етапу вимірювання

$$u_{Ai}(T) = \sqrt{\frac{1}{r(r-1)} \sum_{m=1}^r (T_m - \bar{T})^2}, \quad (5)$$

де T_m – m-й результат визначення температури; \bar{T} – середнє значення результатів вимірювань; r – кількість вимірювань.

Невизначеність типу В і-го етапу вимірювань за умови відсутності кореляції між складовими визначається на основі невизначеностей q окремих складових впливу цього етапу

$$u_{Bi}(T) = \sqrt{\sum_{q=1}^t b_q^2 u_q^2(x)}, \quad (6)$$

де b_q – вагові коефіцієнти окремих складових невизначеності; $u_q(x)$ – стандартні невизначеності аргументів; t – кількість складових невизначеності окремого етапу вимірювання температури за випромінюванням.

Значення вагових коефіцієнтів окремих складових етапу вимірювань визначаються як часткові похідні функціональної залежності температури від ряду параметрів $T = f(x_1, x_2, \dots, x_q)$:

$$b_q = \frac{\partial f(x)}{\partial x_q}. \quad (7)$$

Для оцінювання невизначеності на етапі побудови та передачі температурної шкали автором запропоновано методику оцінювання невизначеності не лінійності функції перетворення приймача випромінювання на основі методу найменших квадратів згідно з [3]. Для цього будуємо експериментальну залежність $S = f(\Phi)$, значення записуємо у таблицю. Задаємо лінійну функціональну залежність

$$S = \eta(\Phi_i - \Phi_o) + S_o, \quad (8)$$

де Φ_i – потік випромінювання в i -й точці функціональної залежності; Φ_o – реперна температурна точка.

Визначаємо оцінки параметрів η та S_o лінійної залежності методом найменших квадратів за експериментальними значеннями. Для цього знаходимо значення сум Гауса

$$\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o), \quad \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2, \quad \sum_{i=1}^n S_i, \quad \sum_{i=1}^n [S_i (\Phi_i - \Phi_o)]. \quad (9)$$

Нормальна система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_i = nS_o + \eta \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \\ \sum_{i=1}^n [S_i (\Phi_i - \Phi_o)] = \\ = S_o \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) + \eta \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2. \end{cases} \quad (10)$$

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

$$S_o = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \sum_{i=1}^n [S_i (\Phi_i - \Phi_o)] \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \right)^2}$$

$$\eta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n S_i (\Phi_i - \Phi_o) - \sum_{i=1}^n S_i \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \right)^2}. \quad (11)$$

Підставляємо значення η та S_o у лінійну залежність. Значення нев'язок визначаємо з рівняння

$$\Delta_{pi} = \eta(\Phi_i - \Phi_o) + S_o - S_i. \quad (12)$$

Ці значення в кожній точці відповідають значенням поправок, які необхідно внести для забезпечення лінійності функції перетворення приймача випромінювання.

Для визначення стандартних відхилень параметрів η та S_o використовуємо вираз

$$s(\Delta_{pi}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{pi}^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\eta(\Phi_i - \Phi_o) + S_o - S_i]^2}{n-2}}. \quad (13)$$

Тоді стандартні відхилення параметрів η та S_o – $s(S_o)$ та $s(\eta)$ – визначаються так:

$$s(S_o) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \right)^2}} \cdot s(\Delta_{pi}),$$

$$s(\eta) = \sqrt{\frac{n}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \right)^2}} \cdot s(\Delta_{pi}). \quad (14)$$

Розширену невизначеність параметрів η та S_o знаходимо з виразів

$$u(S_o) = ks(S_o) \quad \text{та} \quad u(\eta) = ks(\eta), \quad (15)$$

де k – коефіцієнт обхвату, який визначається з розподілу Стюдента за числом ступенів свободи $k = n - m - 1$ при заданому рівні довіри p , наприклад $p = 0,95$.

Сумарна невизначеність є коренем з оцінки дисперсії згідно з виразом

$$u_c(S) = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial S_o} \right)^2 \cdot s^2(S_o) + \left(\frac{\partial S}{\partial \eta} \right)^2 \cdot s^2(\eta) + 2 \frac{\partial S}{\partial S_o} \cdot \frac{\partial S}{\partial \eta} \cdot u(S_o, \eta)}, \quad (16)$$

де $u(S_o, \eta)$ – коефіцієнт кореляції між параметрами η та S_o ,

$$u(S_o, \eta) = \frac{- \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \right)^2} \cdot s^2(\Delta_{pi}). \quad (17)$$

Для лінійної апроксимаційної залежності сумарна невизначеність від нелінійності функції перетворення оптично-реєструючої системи визначатиметься за формулою

$$u_c(S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 + n - 2 \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \cdot \sum_{i=1}^n \Delta_{pi}^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_o) \right)^2} \times \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{pi}^2}{n-2}}. \quad (18)$$

Даний вираз пов'язує сумарну невизначеність з поправками в залежності від температури реперної точки та потоку випромінювання в точках визначення параметра нелінійності.

Висновок. Кожен процес вимірювань складається з ряду етапів, які, в свою чергу, формуються з окремих складових. Основною характеристикою результату вимірювання є точність. На сьогодні вона характеризується непевністю вимірювань. Невизначеністю

кожного етапу вимірювання формується з невизначеностей окремих складових даного етапу і впливає невизначеність як даного етапу, так і інших етапів вимірювання, а також на невизначеність результату процесу вимірювання в цілому, що представлено наведеними формулами. Аналіз бюджету невизначеності дає змогу визначати шляхи, які б уможливили зменшення невизначеностей кожного окремого етапу вимірювання і в результаті в цілому підвищували б точність вимірювання температури за випромінюванням.

Список використаної літератури

1. Вимірювання температури: теорія та практика / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник. – Львів: Бескід–Біт, 2006. – 580 с.
2. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань / М. Дорожовець // Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. – 624 с.
3. Захаров И. П. Теория неопределенности в измерениях. / И. П. ахаров, В. Д. Кукуш // Учеб. пособие. – Харьков: Консум, 2002 – 256 с.
4. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Отримано 20.05.2012

References

1. Temperature measurement: Theory and Practice / J. T. Lucyk, O. P. Huk, O. I. Lah, B. I. Stadnyk . – Lviv: Beskid–Bit, 2006. – 580 p. [in Ukrainian].
2. Dorogovec M. Processing of measurement results. Study Guide / M.Dorogovec – Lviv: Edition of Lviv politechnic, 2007. 624 p. [in Ukrainian].
3. Zaharov I.P. Theory of uncertainty in measurement. Study Guide / I.P.Zaharov, V.D. Kukush. – Kharkov: Konsum, 2002 – 256 p. [in Russian].
4. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement [in English].



Гоц Наталія Євгенівна,
канд.техн.наук, доц.каф. Метрології, стандартизації та сертифікації Нац. ун-ту «Львівська політехніка».
Тел.: (038)-032-258-23-94
E-mail: natana@lp.edu.ua