

УДК 535.08; 681.7.08

В. Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, г. Киев,

А. А. КОРОГОД

Киевский национальный университет технологий и дизайна

**ИЗБЫТОЧНАЯ ПИРОМЕТРИЯ: ИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
РАДИАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА, ОПИСЫВАЕМОЙ ПОЛИНОМОМ 3-ГО
ПОРЯДКА**

Рассмотрен подход к решению задачи избыточных измерений температуры нагретых тел при функции преобразования измерительного канала, описываемой полиномом 3-го порядка. Описана сущность предложенного метода, его недостатки и достоинства. Проведен анализ погрешностей описанного метода избыточных измерений радиационной температуры. Показана возможность исключения влияния на результат измерений радиационной температуры постоянной Стефана – Больцмана и параметров нелинейной функции преобразования. Работа представляет интерес для магистров, специалистов и ученых, интересующихся измерениями радиационной температуры.

Ключевые слова: пирометрия, методы избыточных измерений, радиационная температура, функция преобразования, аппроксимация, погрешности.

V. T. KONDRATOV

V.M.Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

A. O. KOROGOD

Kiev national university of technologies and design

**REDUNDANT PYROMETRY: REDUNDANT MEASUREMENTS OF RADIATING TEMPERATURE AT FUNCTION
TRANSFORMATION OF THE MEASURING CHANNEL WHICH IS DESCRIBED BY THE POLYNOM OF 3 TH
ORDER**

Abstract – In paper the definition of the theory of redundant measurements of radiating temperature is made, the subject of its researches is formulated.

Lacks of pyrometers EOP-93 and EOP-66 and new generation of precision stationary pyrometers of series PD-4 are described.

The problem of redundant measurements of the radiating temperature, concerning a category of measuring problems with attributed to object of measurements by the mathematical model described by Stefan – Boltzmann law is considered.

The essence of the offered method, its lacks and advantages is described. The analysis of errors of the described method of redundant measurements of radiating temperature is carried out.

Possibility of an exception of influence on result of measurements of radiating temperature of Stefan – Boltzmann constant is shown.

Work is of interest for masters, experts and scientists, the interested measurements of radiating temperature.

Keywords: radiation pyrometry, methods of redundant measurements, radiating temperature, transformation function, approximation, errors.

Введение

Следуя [1], можно утверждать, что теория избыточных измерений радиационной температуры — это система частных законов, принципов, методов, математических моделей, положений и условий, характеризующая новую стратегию измерений радиационной температуры при нелинейной и нестабильной функции преобразования сенсора или измерительного канала в целом, предлагающая новые пути линейного и нелинейного измерительного преобразования мощности потоков оптического излучения от нагретых тел и предсказывающая достижимые результаты по точности, чувствительности, быстродействию и метрологической надежности.

Предметом исследований теории избыточных измерений радиационной температуры является: познание собственных законов строения, функционирования и развития; новая стратегия избыточных измерений радиационной температуры, ее приращений, температурных зависимостей и характеристик, а также характеристик метрологической надежности микропроцессорных пирометров с неизвестными, в общем случае, и нестабильными параметрами нелинейной функции преобразования измерительного канала, направленная на получение нового качества измерений и знаний о текущем состоянии измерительного канала, а также на развитие и становление избыточной пирометрии и соответствующей эталонной базы, развитие сенсоров и биосенсоров для определения радиационной температуры.

Сердцевину теории избыточных измерений радиационной температуры составляют входящие в нее частные законы развития. Категории образуют каркас теории. Научные принципы, как основные исходные положения, составляют фундамент теории. На сегодняшний день существует достаточное количество работ

и патентов Украины, описывающие методы измерения радиационной температуры и технические решения радиационных пирометров [2].

На сегодняшний день задача повышения точности измерения радиационной температуры по-прежнему остается актуальной. Она лишь частично решена для сенсоров с линейной функцией преобразования (ФП). Практически все сенсоры и фотоприемники имеют нелинейную функцию преобразования, что ограничивает возможность использования прямых методов измерений в широком диапазоне значений температуры.

Так, например, в работе [3] описан оптический пирометр полного излучения типа ЕОП-93, реализующий метод прямых измерений и содержащий оптическую систему, последовательно соединенные фотоприемник, усилитель и вольтметр. Данному пирометру присуща недостаточная точность измерения температуры, обусловленная нелинейностью ФП фотоприемника и нестабильностью ее параметров. В пирометре ЕОП-93 не учитывается влияние среды на интенсивность потока оптического излучения, излучаемого исследуемым объектом, что приводит к дополнительной погрешности измерения, пропускание потока оптического излучения слоем атмосферы на рабочем участке спектра, не исключается влияние запотевания и загрязнения стекол оптических элементов на результат измерений и т.д. В этой связи остаются не полностью исключенными погрешность от нелинейности функции преобразования, аддитивная и мультипликативная составляющие систематической погрешности, обусловленные влиянием внешних дестабилизирующих факторов, а также дополнительные погрешности.

Взамен пирометров ЕОП-93 и ЕОП-66 были разработаны прецизионные стационарные пирометры серии ПД-4 [4, 5]. Они предназначены для высокоточных измерений и регулирования температуры твердых тел в диапазонах +800, ..., +2500°C. Согласно [4, 5], такой пирометр снабжен оптическим видеоискателем и обеспечивает измерение температуры малых объектов, — диаметром до 2,5 мм (+900, ..., +1500°C) и 1,5 мм (+1500, ..., 2500°C). Отмечается, что пирометр серии ПД-4 имеет высокоскоростной процессор, который обеспечивает обработку и передачу на ПЭВМ через интерфейс RS-232 до 100 измерений в секунду. Благодаря использованию высококачественной германиевой оптики и специальных инфракрасных фильтров пирометры данной серии работают в спектральном диапазоне 8...14 мкм, в котором поглощение ИК излучения атмосферой минимально. Оптическая система наведения позволяет наблюдать область измерения температуры на фоне объекта контроля.

Недостатком пирометров серии ПД-4 является «точечные» измерения или измерения температуры малых объектов, а также работа на малых расстояниях, — до 1000 мм. Они не могут быть использованы для определения средней температуры расплава, например, стекломассы, площадь которой существенно больше, чем 2,5 мм. Перекрытие по диапазону температур составляет всего 1,67. В этой связи, по-прежнему актуальна задача разработки новых методов и цифровых пирометров, обеспечивающих высокоточное измерение температуры труднодоступных объектов в широком диапазоне температур.

Объект исследований — процесс измерения температуры нагретых тел оптико-электронными методами.

Предмет исследований — избыточные измерения температуры нагретых тел при нелинейной функции преобразования измерительного канала.

Целью работы является разработка метода избыточных измерений и оценка его погрешности при функции преобразования измерительного канала с фотоприемником, описываемой полиномом 3-го порядка.

Результаты исследований

Ниже рассматривается задача избыточных измерений радиационной температуры, относящаяся к категории измерительных задач с приписываемой объекту измерений математической моделью, описываемой, в данном случае, законом Стефана – Больцмана [6]:

$$\Phi_x = A' \sigma T_x^4, \quad (1)$$

где $A' = A \tau_{\lambda c}$; A — коэффициент использования потока оптического излучения от объекта; $\tau_{\lambda c}$ — коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы на длине волны λ_c ; $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \left[\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4 \right]$ — постоянная Стефана – Больцмана; T_x [К] — измеряемая температура.

Особенностью данной задачи является определение действительного значения физической величины (температуры) ненаправленного действия через измерительное преобразование физических величины направленного действия (— потоков оптического излучения) благодаря существованию фундаментального закона (1).

Бесконтактные измерения температуры нагретых тел с использованием методов избыточных измерений (МИИ) 1-го рода является весьма перспективным, поскольку обеспечивают автоматическое исключение систематических составляющих погрешности результата измерений, вызванных влиянием на него абсолютных значений параметров ФП измерительного канала и их отклонения от номинальных значений. При наличии случайных помех и наводок используются методы избыточных измерений II-го и III-го родов [7].

Все МИИ отличаются от методов прямых измерений структурой математической модели и видом уравнений избыточных измерений. МИИ описываются не одной, а системой математических моделей. Как будет показано ниже, их структура и вид зависят от вида ФП измерительного канала, от числа выбранных

рядов физических величин, подлежащих измерительному преобразованию, а также от вида закономерных связей между размерами входных величин.

Рассмотрим систему нелинейных уравнений величин, которая реализует МИИ при ФП измерительного канала, описываемой многочленом 3-й степени

$$U'_{нх} = S'_{н2}\Phi_x^3 + S'_{н1}\Phi_x^2 + S'_л\Phi_x + \Delta U', \quad (2)$$

где $U'_{нх}$ — выходное напряжение измерительного канала; $S'_{н2}$, $S'_{н1}$, $S'_л$ — крутизна преобразования двух нелинейных и линейной составляющих ФП, значения которых меняются в результате действия внешних дестабилизирующих факторов [В/мВт], причем $S'_{н2} = S_{н2}(1 + \gamma_{н2})$, $S'_{н1} = S_{н1}(1 + \gamma_{н1})$, $S'_л = S_л(1 + \gamma_л)$; $S_{н2}$, $S_{н1}$, $S_л$ — номинальная по значениям крутизна преобразования; $\gamma_{н2}$, $\gamma_{н1}$ и $\gamma_л$ — относительные изменения параметров; Φ_0 и $\Delta\Phi$ — нормированные по значению физические величины, [Вт]; $\Delta U'$ — дрейф нуля с учетом аддитивной составляющей погрешности измерительного преобразования потоков оптического излучения, [В].

Для составления математических моделей и возможности их решения предложено использовать следующие четыре пары рядов входных величин Φ_1 и Φ_2 , Φ_3 и Φ_4 , Φ_5 и Φ_6 , Φ_7 и Φ_8 , размеры которых связаны между собой по законам арифметической прогрессии. При этом $\{\Phi_1\} = \{\Phi_0\} - \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\} - k_2\{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_4\} = \{\Phi_0\} + k_2\{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_5\} = \{\Phi_i\} + \{\Phi_0\} - \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_6\} = \{\Phi_i\} + \{\Phi_0\} - k_2\{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_7\} = \{\Phi_i\} + \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_8\} = \{\Phi_i\} + \{\Phi_0\} + k_2\{\Delta\Phi_0\}$, где $k_2 = 2$ — коэффициент пропорциональности.

В данном случае система из восьми нелинейных уравнений величин примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U'_{н1} &= S'_{н2}(\Phi_0 - \Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_0 - \Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_0 - \Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н2} &= S'_{н2}(\Phi_0 - k_2\Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_0 - k_2\Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_0 - k_2\Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н3} &= S'_{н2}(\Phi_0 + \Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_0 + \Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_0 + \Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н4} &= S'_{н2}(\Phi_0 + k_2\Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_0 + k_2\Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_0 + k_2\Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н5} &= S'_{н2}(\Phi_i + \Phi_0 - \Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_i + \Phi_0 - \Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_i + \Phi_0 - \Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н6} &= S'_{н2}(\Phi_i + \Phi_0 - k_2\Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_i + \Phi_0 - k_2\Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_i + \Phi_0 - k_2\Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н7} &= S'_{н2}(\Phi_i + \Phi_0 + \Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_i + \Phi_0 + \Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_i + \Phi_0 + \Delta\Phi_0) + \Delta U', \\ U'_{н8} &= S'_{н2}(\Phi_i + \Phi_0 + k_2\Delta\Phi_0)^3 + S'_{н1}(\Phi_i + \Phi_0 + k_2\Delta\Phi_0)^2 + S'_л(\Phi_i + \Phi_0 + k_2\Delta\Phi_0) + \Delta U', \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $U'_{ни}$ — напряжение в каждом i -м такте измерительного преобразования физических величин ($i=1, \dots, 8$); k_2 и k_3 — коэффициенты пропорциональности ($k_2 = 2, k_3 = 3$).

Система (3) нелинейных уравнений величин описывает состояние измерительного канала в дискретные моменты времени поочередного измерительного преобразования мощностей потоков оптического излучения Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , Φ_4 , Φ_5 , Φ_6 , Φ_7 и Φ_8 .

Решение системы (3) нелинейных уравнений величин дает возможность получить уравнение избыточных измерений мощности информативного потока оптического излучения от объекта измерений, например, от расплава стекломассы, в виде:

$$\Phi_i = \frac{k_2^2[(U'_{н8} - U'_{н4}) - (U'_{н7} - U'_{н3})] - [(U'_{н7} - U'_{н5}) - (U'_{н3} - U'_{н1})]}{k_3[k_2(U'_{н7} - U'_{н5}) - (U'_{н6} - U'_{н8})]}. \quad (4)$$

Исследования показали, что уравнение измерений (4) описывает линейную зависимость результата измерений от мощности потока оптического излучения. Из (4) видно, что результат измерения мощности потока оптического излучения не зависит от значений параметров ($S'_{н2}$, $S'_{н1}$, $S'_л$ и $\Delta U'$) нелинейной ФП и их отклонений от номинальных значений.

Подставляя (4) в аналитическое выражение закона Стефана – Больцмана (1), получим уравнение избыточных измерений действительного значения радиационной температуры T_x в виде:

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A'\sigma}} = \frac{1}{\sqrt[4]{A'\sigma}} \sqrt[4]{\frac{[(U'_{н7} - U'_{н5}) - (U'_{н3} - U'_{н1})] - k_2^2[(U'_{н8} - U'_{н4}) - (U'_{н7} - U'_{н3})]}{k_3[k_2(U'_{н5} - U'_{н7}) - (U'_{н6} - U'_{н8})]}}}. \quad (5)$$

Одновременно могут быть выведены уравнения избыточных измерений параметров многочлена третьей степени. Установлено, что решение системы (1) дает возможность дополнительно получить уравнения измерений параметров нелинейной ФП в виде:

$$S'_{н2} = \frac{(U'_{н8} - U'_{н6}) - k_2(U'_{н7} - U'_{н5})}{k_3 k_2^2 \Delta\Phi_0^3}, \quad (6)$$

$$S'_{н1} = \frac{k_2 \Delta\Phi_0 [(U'_{н4} + U'_{н2}) - (U'_{н3} + U'_{н1})] - k_3 \Phi_0 [(U'_{н8} - U'_{н6}) - k_2(U'_{н7} - U'_{н5})]}{k_3 k_2^2 \Delta\Phi_0^3}, \quad (7)$$

$$S'_{\text{л}} = \frac{k_2 \Delta \Phi_0^2 (U'_{\text{н3}} - U'_{\text{н1}}) - k_2^2 \Delta \Phi_0 \Phi_0 [(U'_{\text{н4}} + U'_{\text{н2}}) - (U'_{\text{н3}} + U'_{\text{н1}})] - (k_3 \Phi_0^2 - \Delta \Phi_0^2) [k_2 (U'_{\text{н7}} - U'_{\text{н5}}) - (U'_{\text{н8}} - U'_{\text{н6}})]}{k_3 k_2^2 \Delta \Phi_0^2}, \quad (8)$$

Уравнение измерений смещения функции преобразования может быть определено из любого уравнения величин системы (3), например, из первого:

$$\Delta U' = U'_{\text{н1}} - S'_{\text{н2}}(\Phi_0 - \Delta \Phi_0)^3 - S'_{\text{н1}}(\Phi_0 - \Delta \Phi_0)^2 - S'_{\text{л}}(\Phi_0 - \Delta \Phi_0). \quad (9)$$

Подставляя в (9) уравнения измерений для $S'_{\text{н2}}$ (6), $S'_{\text{н1}}$ (7) и $S'_{\text{л}}$ (8), окончательно получим:

$$\Delta U' = U'_{\text{н1}} - \frac{(\Phi_0 - \Delta \Phi_0)}{k_3 k_2^2 \Delta \Phi_0^2} \left[\Phi_0 (\Phi_0 - \Delta \Phi_0) [(U'_{\text{н8}} - U'_{\text{н6}}) - k_2 (U'_{\text{н7}} - U'_{\text{н5}})] - k_2 k_3 \Delta \Phi_0^2 (U'_{\text{н3}} - U'_{\text{н1}}) - \right. \\ \left. - k_2 \Delta \Phi_0 (\Phi_0 + \Delta \Phi_0) [(U'_{\text{н4}} + U'_{\text{н2}}) - (U'_{\text{н3}} + U'_{\text{н1}})] \right]. \quad (10)$$

Определение параметров (6), (7), (8) и (10) нелинейной ФП и отклонений их от значений номинальных в течение заданного календарного времени проведения измерений дают возможность прогнозировать метрологическую надежность средства измерения, реализующего МИИ, в текущие моменты времени его эксплуатации [8 – 10]. Прямые методы измерений такими возможностями не обладают.

Новизна данного метода подтверждена декларационным патентом Украины [11].

При проведении расчетов был использован ППП Mathcad 2001 Professional. Значение коэффициента пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы между объектом и фотоприемником было выбрано равным 0,95. Значение погрешности смещения параметров нелинейной ФП измерительного канала от номинального равно 0,01 В. Было установлено, что значение аддитивной составляющей погрешности измерительного преобразования мощности потока оптического излучения равно $\Delta_{\text{ад}} = 1 \text{ мВ}$, а значение погрешности воспроизведения нормированных по значению мощностей потоков оптического излучения $\Phi_0 = 0,5 \text{ мВт}$ и $\Delta \Phi = 0,1 \text{ мВт}$ равно $\Delta_{\Phi_0} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$. Контролируемый поток оптического излучения изменялся в диапазоне значений мощностей от $\Phi_x = 1 \text{ мкВт}$ до $\Phi_x = 1 \text{ мВт}$. Коэффициент использования потока оптического излучения от объекта измерений установлен равным $A' = 6,743 \cdot 10^{-9}$.

Для описанного выше МИИ был проведен расчет действительного значения температуры при номинальных значениях параметров нелинейной ФП. Полученные результаты сведены в табл. 1. Как видно из табл.1, действующие значения температуры $T_{\text{ми}}$, определенные, согласно описанного метода избыточных измерений, соответствуют действующим значениям температуры $T_{\text{д}}$ исследуемого объекта, т.к. отличаются только в четвертом знаке.

Таблица 1

Результаты измерений температуры

$\Phi_x, \text{Вт}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	$8,86 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$
$T_{\text{ми}}, \text{К}$	229,078	637,560	836,725	1068,313	1129,484	1249,803	1289,485
$T_{\text{д}}, \text{К}$	229,078	637,560	836,725	1068,313	1129,484	1249,803	1289,485

Исследования показали, что при ФП измерительного канала, описываемой полиномом 3-го порядка, отклонения значений параметров $S'_{\text{н2}}$, $S'_{\text{н1}}$, $S'_{\text{л}}$ нелинейной ФП от номинальных значений не влияют на результат избыточных измерений.

Благодаря временному разделению каналов исключается влияние запотевания и загрязнения стекол оптических элементов на результат измерений, поскольку они в одинаковой степени ослабляют поток оптического излучения в каждом такте измерительного преобразования входных потоков оптического излучения.

Известно, что относительная методическая погрешность $\delta_{\text{м}}$ рассчитывается по аналитическому выражению

$$\delta_{\text{м}} = \left| (T_{\text{ми}} - T_{\text{д}}) / T_{\text{д}} \right| \cdot 100\% \quad (10)$$

При подстановке данных из таблицы 1 в (5), получим значение погрешности измерения радиационной температуры не превышающей $0,001^{\circ}\text{К}$.

Исследовано влияние на результат измерений температуры действительного значения мощности образцовых потоков оптического излучения с учетом погрешности их воспроизведения. Установлено, что при уменьшении мощности потоков оптического излучения Φ_0 и $\Delta \Phi_0$ с $0,5 \text{ мВт}$ до $0,5 \text{ мкВт}$, и с $0,1 \text{ мВт}$ до $0,1 \text{ мкВт}$, соответственно, а также погрешности воспроизведения $\pm \Delta_0$ потоков оптического излучения с $1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$ до $0,1 \text{ мкВт}$, приводит к увеличению методической погрешности (см. табл. 2).

Подтвержден тот факт, что результат избыточных измерений радиационной температуры не зависит от значений параметров нелинейной ФП и отклонений их от номинальных значений, а зависит только от погрешности воспроизведения нормированных по значению потоков оптического излучения.

$\Phi_x, \text{Вт}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	$8,86 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$T_{\text{мин}}, \text{К}$	229,078	637,560	836,733	1068,316	1129,492	1249,807	1289,478
$T_d, \text{К}$	229,078	637,560	836,725	1068,313	1129,484	1249,803	1289,485
$\delta_m, \%$	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$2,28 \cdot 10^{-5}$	0,00025	0,00032	0,00078	0,00032	0,00059

Как видно из уравнений избыточных измерений (4), результат измерения радиационной температуры зависит от коэффициента пропорциональности $1/\sqrt[4]{A'\sigma}$, т.е. от коэффициента использования потока оптического излучения от объекта — $A' = A\tau_{\lambda c}$, зависящего, в свою очередь, от коэффициент $\tau_{\lambda c}$ пропускания этого потока слоем атмосферы, и от постоянной $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8}$. Указанный коэффициент может быть учтен при проведении калибровки, т.е. при избыточных измерениях нормированной по значению температуры T_{01} при тех же условиях окружающей среды. На практике в качестве температуры T_{01} могут быть использованы известных реперные точки температурной зависимости вязкости исследуемого расплава стекломассы. Значение выбранной реперной точки должно быть известно с высокой точностью. На основании закона Стефана – Больцмана [1] получим, что $T_{01} = \sqrt[4]{\Phi_{01}/A'\sigma}$, а

$$1/\sqrt[4]{A'\sigma} = T_{01}/\sqrt[4]{\Phi_{01}}, \quad (11)$$

где значение мощности потока оптического излучения Φ_{01} определяется с высокой точностью тем же методом избыточных измерений. При этом уравнение избыточных измерений мощности потока оптического излучения имеет вид:

$$\Phi_{01} = \frac{k_2^2[(U_{n8}'' - U_{n6}'') - (U_{n7}'' - U_{n3}'')] - [(U_{n7}'' - U_{n5}'') - (U_{n3}'' - U_{n1}'')]}{k_3[k_2(U_{n7}'' - U_{n5}'') - (U_{n8}'' - U_{n6}'')]}, \quad (12)$$

где U_{ni}'' — напряжения на выходе измерительного канала в каждом i -том такте измерений ($i = 1, \dots, 8$).

Подставляя (11) в (5), окончательно получим уравнение избыточных измерений в виде:

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A'\sigma}} = T_{01} \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}}. \quad (13)$$

На основе уравнения измерений (13), можно констатировать, что методы избыточных измерений обеспечивают повышение точности избыточных измерений радиационной температуры и расширение снизу и сверху диапазона измеряемых значений температур за счет исключения влияния на результат измерений параметров, характеризующих качество окружающей среды, и текущих значений параметров нелинейной функции преобразования. Все это отличает методы избыточных измерений от прямых методов измерений.

Выводы

Дано определение понятию «теория избыточных измерений радиационной температуры», сформулирован предмет ее исследований.

Указаны основные недостатки пирометров ЕОП-93 и ЕОП-66 и нового поколения прецизионных стационарных пирометров серии ПД-4.

Рассмотрена задача избыточных измерений радиационной температуры, относящаяся к категории измерительных задач с приписываемой объекту измерений математической моделью, описываемой, например, законом Стефана – Больцмана.

Описан частный случай бесконтактного измерения температуры нагретых тел методом избыточных измерений (МИИ) 1-го рода. Показано, что данные методы являются весьма перспективным, поскольку обеспечивают автоматическое исключение систематических составляющих погрешности результата измерений, обусловленных влиянием на него абсолютных значений параметров ФП измерительного канала и их отклонений от номинальных значений. При наличии случайных помех и наводок рекомендовано использовать методы избыточных измерений II-го и III-го родов.

Приведены математические модели метода избыточных измерений: система нелинейных уравнений величин, система уравнений избыточных измерений мощности потоков оптического излучения, радиационной температуры и параметров нелинейной функции преобразования измерительного канала. Отмечены преимущества данного метода перед методами прямых измерений. Новизна данного метода избыточных измерений подтверждена декларационным патентом Украины.

Оценка методической погрешности показала, что по отношению к методам прямых измерений достигается повышение точности избыточных измерений более, чем на порядок, причем во всем диапазоне мощностей входных потоков оптического излучения, который ограничивается видом нелинейной функцией преобразования измерительного канала и возможностями высокоточного аналого-цифрового преобразования выходных напряжений измерительного канала.

Показана возможность исключения влияния на результат избыточных измерений радиационной температуры коэффициента пропорциональности $1/\sqrt[4]{A'\sigma}$. Это достигается путем дополнительных

избыточных измерениях нормированной по значению температуры T_{01} при тех же условиях окружающей среды.

Констатируется, что результат избыточных измерений радиационной температуры зависит от погрешности воспроизведения нормированных по значению потоков оптического излучения Φ_0 и $\Delta\Phi_0$.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность методов избыточных измерений.

Литература

1. Избыточная термометрия. Режим доступа: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-termometrija>
2. Избыточная пирометрия. Режим доступа: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-pirometrija>.
3. Назаренко Л.А., Ромоданов И.С., Кисіль О.М., Сергієнко П.П. Еталонний оптичний пірометр ЕОП-93//Харків: ДНВО «Метрологія» Український метрологічний журнал.-1996.-Вип. 23.- с.46-48
4. Пирометр прецизионный. Режим доступа: http://omskprompribor.narod.ru/katalog/vii/pd_4.htm.
5. Радиационная термометрия. Режим доступа: <http://unimer.by/media/files/upload/-1action=radterm.htm>.
6. Карташова А.Н., Дунин – Барковский И.В. Технологические измерения и приборы в текстильной и легкой промышленности: Учебник для вузов. — М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. — 312с.
7. Кондратов В.Т. Математические модели избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов /В.Т.Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Между-народной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Книга «Приборостроение». — М.: МГУ ПИ, 2007. — С. 134-143.
8. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла/ В.Т.Кондратов//Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008.– № 3. – С. 101-113.
9. Кондратов В.Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности /В.Т.Кондратов //Законо-дательная и прикладная метрология. — 2009. — №2. — С. 21 – 22.
10. Кондратов В.Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности /В.Т.Кондратов //Законо-дательная и прикладная метрология. — 2009. — №3. — С. 15 – 27.
11. Деклараційний патент 66299 А Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури/ В.Т.Кондратов, Г.О.Зарніцина, О.П.Рябов (Україна). — №2003109797; Заявлено 31.10.2003, Опубл. 15.04.2004. Бюл. №4. — 16 с.

References

1. Izbytochnaja termometrija. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-termometrija>
2. Izbytochnaja pirometrija. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-pirometrija>.
3. Nazarenko L.A., Romodanov I.S., Kysil O.M., Sergiienko P.P. Etalonnij optychnij pirometr EOP-93//Kharkiv: DNVO "Metrologiia" Ukrainskii metrologichnyi zhurnal.-1996.-Vup.23.-s.46-48.
4. Pirometr pretsizionnyj. Rezhim dostupa: http://omskprompribor.narod.ru/katalog/vii/pd_4.htm.
5. Radiatsionnaja termometrija. Rezhim dostupa: <http://unimer.by/media/files/upload/-1action=radterm.htm>.
6. Kartashova A.N., Dunin-Barkovskij I.V. Tekhnologicheskie izmereniya i pribory v tekstil'noj i lyogkoj promy'shennosti: Uchebnik dlya vuzov. — M.: Lyogkaya i pishhevaya prom-st', 1984. — 312s..
7. Kondratov V.T. Matematicheskiye vedeli izbytochnykh izmerenij I-go, II-go i III-go rodov /V.T.Kondratov // Nauchnyje trudy X-j Yubilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno-technicheskoy jonferentsii «Fundamentalnyje i prikladnyje problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki». Kniga «Priborostroenije». — M.: MGU PI, 2007. — S. 134-143.
8. Kondratov V.T. Teorija metrologicheskoy nadezhnosti: funksijsija raspredelenija Kondratova – Weibulla/ B.T.Kondratov//Visntk Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. Tekhnichni nauki. — 2008. — № 3. — S. 101 – 113.
9. Kondratov V.T. Novaja era razvitija teorii metrologicheskoy nadezhnosti — funksijsija raspredelenija Kondratova – Weibulla, ee raznovidnosti, svojstva i funksijsionalnyje vozmozhnosti /V.T.Kondratov //Zakonodatel'naja i prikladnaja metrologija. — 2009. — №2. — S. 21 – 22.
10. Kondratov V.T. Novaja era razvitija teorii metrologicheskoy nadezhnosti – funksijsija raspredelenija Kondratova – Weibulla, ee raznovidnosti, svojstva i funksijsionalnyje vozmozhnosti /V.T.Kondratov //Zakonodatel'naja i prikladnaja metrologija. — 2009. — №3. — С. 15 – 27.
11. Deklarac.pat. 66299 A Ukraina. MPK G01J5/00, G01J/10. Optiko-elektronnyj sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury/ V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna, O.P.Rjabov (Ukraina). — №2003109797; Zajavleno 31.10.2003, Opubl. 15.04.2004. Byul. №4. —16s.

Рецензія/Peer review : 24.12.2014 р.

Надрукована/Printed :24.12.2014 р.