

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ТЕРМОМЕТРІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В.О. Кондратенко, О.А. Новосолов

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна,

Анотація

У статті розглянуто процедуру оцінки невизначеності вимірювань під час калібрування термометрів інфрачервоного випромінювання (пірометрів) методом безпосереднього вимірювання температури, використовуючи робочий еталон – випромінювач типу АЧТ. Проведено аналіз найкращих калібрувальних та вимірювальних можливостей акредитованих калібрувальних лабораторій з калібрування пірометрів. Описано методи оцінки джерел невизначеності. Наведено процедуру оцінювання невизначеності вимірювань, яка включає: запис моделі вимірювань, оцінювання вхідних величин та їх стандартні невизначеності, оцінювання розширеної невизначеності. Складено бюджет невизначеності вимірювань.

Ключові слова: невизначеність вимірювань; робочий еталон; єдність вимірювань; методика калібрування; пірометр; метрологічна простежуваність.

1. Вступ

Термометри інфрачервоного випромінювання (пірометри) призначені для безконтактного вимірювання температури поверхні об'єктів. Розвиток термометрії за інфрачервоним випромінюванням спричинив появу на ринку широкого асортименту пірометрів, які зазвичай заявлені виробниками як засоби вимірювання з високою інструментальною точністю, порядку від 0,3 до 1%.

Наявність великої кількості пропозицій від виробників різних країн та цінова доступність пірометрів (у порівнянні з початком 2000-х років), особливо китайських виробників, призвело до збільшення сфер їх використання.

Зокрема в металургійній промисловості в останні роки зросла кількість вимірювальних параметрів де використовуються безконтактні засоби вимірювання температури. Тому є актуальним розроблення нових та удосконалення існуючих методів калібрування пірометрів.

Згідно ДСТУ 3194:2005 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання температури». Безконтактні засоби вимірювання температури [1] при повірці та калібруванні пірометрів використовуються еталонні пірометри. Таким чином, відповідно до статті 1 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [2], пірометри є робочими еталонами та підлягають калібруванню згідно статті 27 [2]. Калібрування робочих еталонів проводиться в порядку, встановленому нормативно-правовим актом центрального органу виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності. Таким нормативно-правовим актом є «Порядок калібрування вторинних та робочих еталонів» [3], затверджений Міністерством економіки України наказом від 10.08.2020

за номером № 1518. Відповідно до [3] калібрування робочих еталонів проводиться:

- науковими метрологічними центрами, які мають міжнародно визнані калібрувальні та вимірювальні можливості за відповідними видами та підвидами вимірювань із застосуванням національних еталонів;
- науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, акредитованими національним органом України з акредитації.

Але, [3] установлює процедуру та умови калібрування тільки робочих еталонів, які використовують під час повірки засобів вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології. Робочі еталони, які використовують під час калібрування ЗВТ, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, калібруються згідно частині третьої статті 27 [2] відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології.

У той же час, за [3] калібрування робочих еталонів проводиться за методиками калібрування, які містяться в національних стандартах або розроблені виконавцями з урахуванням національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології. Таким чином, у [3] допускається проводити калібрування за методиками калібрування, які розроблені виконавцями, про що у [2] мова не йдеться.

Згідно ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [4], лабораторія може використовувати методи, розроблені або модифіковані

лабораторією, якщо замовник не зазначає метод для використання. Тож, міжнародний стандарт [4], що встановлює вимоги до компетентності калібрувальних лабораторій, дозволяє використовувати методи калібрування, розроблені виконавцями.

Але, [2] має вищу юридичну силу, яка полягає у тому, що всі підзаконні нормативно-правові акти приймаються на його основі та за своїм змістом не повинні суперечити [2]. Для подолання розбіжності між [2] та [3] треба вносити зміни до одного з цих нормативно-правових актів.

Відсутність стандартизованих методик калібрування, що визначають оцінювання невизначеності вимірювань, складання рівняння вимірювань при калібруванні, бюджету невизначеності вимірювань, не відповідає вимогам статті 27 [2], та може привести до порушення єдності вимірювань у метрологічній діяльності, тому, розробка національних стандартів (гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами), які визначатимуть методи калібрування є гарантією забезпечення єдності вимірювань.

Мета статті – розробка процедури оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні термометрів інфрачервоного випромінювання (пірометрів) методом безпосереднього вимірювання температури, використовуючи робочий еталон – випромінювач типу «абсолютне чорне тіло» (далі – АЧТ).

2. Виклад основного матеріалу

2.1. Забезпечення єдності вимірювань у сфері безконтактної термометрії.

Для забезпечення єдності вимірювання температури в області безконтактної термометрії, згідно [1] в Україні створені державні первинні еталони ДЕТУ 06-07-04 та ДЕТУ 06-03-96, що охоплюють діапазон від 692,67 К до 2800 К, які зберігаються у Національному науковому центрі «Інститут метрології» м. Харків.

Діапазони значень відтворюваної одиниці температури та розширені невизначеності ДЕТУ 06-07-04 становлять наступні значення:

- діапазон: від 692,67 К до 1234,93 К;
- невизначеність за типом А (u_A): 0,8 °С;
- невизначеність за типом В (u_B): 0,21 °С;
- сумарна стандартна невизначеність (u_C): 0,83 °С;
- розширена невизначеність (U): 1,65 °С.

Діапазони значень відтворюваної одиниці температури та розширені невизначеності ДЕТУ 06-03-96 становлять наступні значення:

- діапазон: від 1084,62 °С до 2526,85 °С;
- невизначеність за типом А (u_A): 1,9 °С;
- невизначеність за типом В (u_B): 0,37 °С;
- сумарна стандартна невизначеність (u_C): 1,94 °С;
- розширена невизначеність (U): 3,87 °С.

Вимірювальні можливості Національного наукового центру «Інститут метрології» в області безконтактної термометрії опубліковано в базі даних ключових звірень (Kcdb) на сайті Міжнародного бюро з мір і ваг (BIPM).

На цей час, зазначені вимірювальні можливості Національного наукового центру «Інститут метрології» не охоплюють вимірювання температури у діапазоні вимірювань нижче 0 °С.

Таким чином, калібрувальні лабораторії не можуть забезпечити метрологічну простежуваність результатів своїх калібрувань робочих еталонів в області низьких температур в Україні, та вимушені калібрувати робочі еталони за кордоном у організаціях, що мають докази метрологічної простежуваності до Міжнародної системи одиниць SI у діапазоні вимірювань нижче 0 °С. Наразі відсутні національні стандарти з калібрування пірометрів, тому, кожна калібрувальна лабораторія розробляє методики калібрування за своїм розумінням, що не сприяє забезпеченню єдності вимірювань.

Це наочно видно, якщо ознайомитися зі «Сферами акредитації» калібрувальних лабораторій, акредитованих Національним агентством з акредитації України на калібрування пірометрів (таблиця 1).

Аналіз «Сфер акредитації» показує наступне:

1) деякі лабораторії у графі «Устаткування (об'єкт вимірювань)» вказують крім пірометрів інші засоби вимірювання температури, для яких наведені одні й ті самі значення розширеної невизначеності вимірювань, що характеризує калібрувальні та вимірювальні можливості (Calibration and Measurement Capability – CMC) лабораторії; подання такої інформації про CMC не дає змоги замовникам послуг визначити дійсні CMC лабораторії з калібрування пірометрів;

2) усі калібрувальні лабораторії проводять калібрування згідно зі своїми розробленими методами калібрування;

3) деякі калібрувальні лабораторії застосували метод для вираження CMC - діапазон вимірювання. Згідно ILAC-P14:09/2020 «Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні» [5], у випадку, коли вимірювана величина охоплює значення або ряд значень, та застосовано діапазон вимірювання для вираження CMC, калібрувальна лабораторія повинна забезпечити належну лінійну інтерполяцію, щоб знайти невизначеність при середніх значеннях.

У деяких публікаціях про оцінку невизначеності вимірювань при калібруванні ЗВТ, наприклад у [6], можна виявити, що відома поправка на систематичний ефект не застосована до звітного результату калібрування, а замість цього зроблена спроба використання цього ефекту для збільшення розширеної невизначеності вимірювань.

Автори [6] вважають, якщо кінцевий користувач ЗВТ, не використовує зсув, а оперує значеннями, що показує безпосередньо ЗВТ, без використання адитивної або мультиплікативної поправки, тоді на цій підставі, складову стандартної невизначеності, що «обумовлена зсувом показів ЗВТ» треба вносити до загального бюджету невизначеності, що нібито дозволить використовувати ЗВТ без додаткових обчислень результату вимірювання.

Це хибне твердження може привести до того, що власник пірометра, який буде аналізувати результати калібрування щодо відповідності пірометра технічній специфікації, може прийняти помилкове рішення про його непридатність, враховуючи заявлену збільшену розширену невизначеність.

Тому, власнику пірометрів - замовнику калібрування потрібно обов'язково вказувати у своїй заявці, вимоги щодо необхідності зазначення виконавцем у сертифікаті калібрування висновку про відповідність пірометра технічній специфікації.

Також, з причини відсутності стандартизованих методик калібрування, замовнику калібрування

потрібно вказувати у своїй заявці, вимоги щодо необхідності надання виконавцем модельного рівняння та бюджету невизначеності вимірювань, за якими виконувалось калібрування еталонного пірометра або еталонного випромінювача типу АЧТ.

Це необхідно замовнику калібрування для правильного складання власного бюджету невизначеності під час калібрування робочих пірометрів і для врахування усіх можливих поправок, що стосуються еталонного пірометра або АЧТ, чи навпаки виключення цих поправок із власного бюджету, якщо вони вже були враховані виконавцем калібрування.

Таблиця 1 – Виписка зі «Сфер акредитацій» калібрувальних лабораторій з калібрування пірометрів

№	Найменування КЛ	Устаткування (об'єкт вимірювань)	Діапазон або точка вимірювань, у яких проводиться калібрування	Розширена невизначеність вимірювань $U(k=2)$	Позначання нормативних документів на методи калібрування та метод (принцип) вимірювання
1	ДП «Укрметртест-стандарт»	Пірометри, тепловізори	(мінус 30 – 150) °C (260 – 1000) °C	(0,75 – 2) °C (3 – 20) °C	МКУ 520-24/06 Прямі вимірювання
2	ДП «Дніпро-стандартметрологія»	Пірометри інфрачервоного випромінювання та тепловізори	(мінус 30 – 500) °C	(0,6 – 3,0) °C	МК Д 15/62-2021 Прямі вимірювання Звірення з еталоном
3	ДП «Харків-стандартметрологія»	Пірометри інфрачервоного випромінювання, тепловізори	мінус 30 – 100 °C > 100 – 200 °C > 200 – 300 °C > 300 – 400 °C > 400 – 500 °C > 500 – 600 °C > 600 – 700 °C > 700 – 800 °C > 800 – 900 °C > 900 – 1000 °C > 1000 – 1100 °C > 1100 – 1200 °C > 1200 – 1700 °C	0,7 °C 1,1 °C 1,6 °C 2,1 °C 2,5 °C 3,0 °C 3,5 °C 4,0 °C 4,6 °C 5,2 °C 5,7 °C 6,3 °C 8,8 °C	СОУ РУ 74.3-04725906-0092:2013; СОУ РУ 74.3-04725906-0085:2013
4	Криворізька філія ДП «Дніпро-стандартметрологія»	Пірометри інфрачервоні, медичні та тепловізори	(мінус 10 – 300) °C (32 – 43) °C	(0,30 – 0,31) °C 0,13 °C	МК-06/05 Прямі вимірювання
5	Черкаська філія ДП «Полтава-стандартметрологія»	Термометри безконтактні	мінус 10 – 100 °C	0,61 °C	МК 06-06-09
6	ПП «Науково-виробничий центр оцінки відповідності «ЮГ»	Пірометри	(30 – 600) °C	(0,6 – 2,0) °C	МК-19
7	ТОВ «РІВНЕ-СТАНДАРТ»	Термометри безконтактні, пірометри інфрачервоні, тепловізори, термометри безконтактні медичні	мінус 20 - 15 °C 15 - 30 °C 30 - 300 °C	0,1 °C 0,12 °C 0,14 °C	МК-Т-04-2021
8	ТОВ «ТЕСТМЕТР-СТАНДАРТ»	Термометри інфрачервоні, термометри безконтактні	Від мінус 50 °C до 60 °C Від 60 °C до 1500 °C	Від 0,5 °C до 1,65 °C Від 0,5 °C до 1,65 °C	МК 06-01 від 20.03.2023 Безпосереднє звірення

2.2 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні пірометрів методом безпосереднього вимірювання температури, використовуючи робочий еталон – випромінювач типу АЧТ.

Калібрування пірометрів методом безпосереднього вимірювання проводиться відповідно до схеми, наведеною на рис. 1.

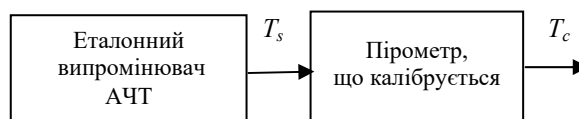


Рис. 1 – Схема калібрування пірометра

Складання модельного рівняння калібрування пірометра.

Відхилення показів пірометра, що калібрується T_x складається з:

$$T_x = (T_c + \delta_c + \delta_f) - (T_s + \delta_s + \delta_{dr} + \delta_{bb}), \quad (1)$$

де: T_c – температура виміряна пірометром, що калібрується; δ_c – поправка, що враховує роздільну здатність пірометра, що калібрується; δ_f – поправка, що враховує вплив оптичної роздільної здатності пірометра, що калібрується; T_s – температура задана еталонним випромінювачем типу АЧТ; δ_s – поправка, що враховує точність еталонного випромінювача типу АЧТ із сертифіката калібрування; δ_{dr} – поправка на дрейф еталонного випромінювача типу АЧТ з часу його попереднього калібрування; δ_{bb} – поправка, що враховує температурну стабільність еталонного випромінювача типу АЧТ.

Оцінювання вхідних величин.

Оцінкою температури, виміряної пірометром, що калібрується, є середнє арифметичне його n_c показань $\bar{T}_c$, °С:

$$\bar{T}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ci}. \quad (2)$$

Оцінювання стандартних невизначеностей вхідних величин.

Стандартна невизначеність за типом А, пов'язана з розсіянням показань пірометра, що калібрується, обумовлена джерелами невизначеності, що мають випадковий характер, визначається за формулою:

$$u_A(\bar{T}_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (T_{ci} - \bar{T}_c)^2}. \quad (3)$$

Стандартна невизначеність за типом В, обумовлена джерелами, які мають системний характер, визначається за формулою:

$$u_B = \sqrt{u_B^2(\delta_c) + u_B^2(\delta_s) + u_B^2(\delta_{dr}) + u_B^2(\delta_{bb}) + u_B^2(\delta_f)}. \quad (4)$$

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовлена роздільною здатністю пірометра, що калібрується, характеризується прямокутним розподілом і розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_c) = \frac{b}{2\sqrt{3}}, \quad (5)$$

де b – роздільна здатність пірометра, що калібрується.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, що враховує точність випромінювача типу АЧТ розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_s) = \frac{U_s}{k_s}, \quad (6)$$

де: U_s – розширена невизначеність випромінювача типу АЧТ, взята з сертифіката про калібрування для

точки калібрування пірометра, що калібрується (якщо значення U_s для точки калібрування безпосередньо не зазначено у сертифікаті, його визначають шляхом лінійної інтерполяції між двома відомими сусідніми значеннями невизначеності для відповідного діапазону вимірювань випромінювача типу АЧТ); k_s – коефіцієнт покриття, взятий із сертифіката калібрування випромінювача типу АЧТ.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовленої дрейфом випромінювача типу АЧТ, характеризується прямокутним розподілом та розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_{dr}) = \frac{\Theta_{dr}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

де Θ_{dr} – поправка, обумовлена зміною значення робочого еталону з моменту його останнього калібрування із-за дрейфу:

$$\Theta_{dr} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) \frac{t_2}{t_1}; \quad (8)$$

ΔT_2 – відхилення показів еталона з діючого сертифікату калібрування; ΔT_1 – відхилення показів еталона з попереднього сертифікату калібрування; t_1 – час між калібруваннями; t_2 – час від останнього калібрування до поточної дати.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовленої температурною стабільністю еталонного випромінювача типу АЧТ, характеризується прямокутним розподілом та розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_{bb}) = \frac{S_{bb}}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

де S_{bb} – температурна стабільність еталонного випромінювача типу АЧТ з технічної специфікації.

Стандартна невизначеність оцінки поправки, обумовленої впливом оптичної роздільної здатності пірометра розраховується за формулою:

$$u_B(\delta_f) = \frac{\bar{T}_{d_{\max}} - \bar{T}_{d_{\min}}}{\sqrt{3}}, \quad (10)$$

де: $\bar{T}_{d_{\max}}$ – середнє арифметичне значення десяти вимірювань температури при максимальному діаметрі діафрагми; $\bar{T}_{d_{\min}}$ – середнє арифметичне значення десяти вимірювань температури при мінімальному діаметрі діафрагми.

Метод визначення поправки, обумовленої впливом оптичної роздільної здатності пірометра.

В площину пірометра, перед апертурою АЧТ, встановлюється діафрагма з круглим отвором змінного діаметру, центр якого збігається з оптичною віссю. Відстань від діафрагми до переднього краю пірометра повинна забезпечувати мінімальний розмір поля зору пірометра (точка фокуса) який розраховується згідно встановленого виробником показника візування (зазначається в інструкції з експлуатації). На діафрагмі виставляється максимальний

діаметр, який дорівнює (або більше) діаметру апертури АЧТ та виконуються десять вимірювань температури $\bar{T}_{d_{\max}}$. Потім на діафрагмі виставляється мінімальний діаметр, який дорівнює мінімальному діаметру поля зору пірометра у точці його фокуса та виконуються десять вимірювань температури $\bar{T}_{d_{\min}}$.

Обчислення сумарної стандартної невизначеності.

Оскільки модель вимірювань носить лінійний характер, а вклади всіх вхідних величин не корелюють один з одним, сумарна невизначеність вимірюваної при калібруванні пірометра розраховується за формулою:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (11)$$

Оцінювання розширеної невизначеності вимірювань.

Розширена невизначеність вимірювань для кожної точки калібрування визначається як:

$$U = k \cdot u_c \quad (12)$$

де k – коефіцієнт покриття.

У випадках, коли нормальний (гаусівський) розподіл можна віднести до вимірюваної величини і стандартна невизначеність, пов'язана з оцінкою вихідної величини, є достатньо надійною, використовують стандартний коефіцієнт покриття $k = 2$, що відповідає ймовірності охоплення приблизно 95%.

Ці умови виконуються в більшості випадків, які зустрічаються під час калібрування.

Бюджет невизначеності вимірювань для розглянутої процедури наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Бюджет невизначеності вимірювань при калібруванні пірометра

Вхідна величина	Значення вхідної величини	Стандартні невизначеності вхідних величин	Коефіцієнти чутливості	Вклади невизначеності, °C
T_c	$\bar{T}_c$	$u_A(\bar{T}_c)$	1	(3)
δ_C	0	$u_B(\delta_C)$	1	(5)
δ_S	U_S	$u_B(\delta_S)$	- 1	(6)
δ_{dr}	0	$u_B(\delta_{dr})$	- 1	(7)
δ_{bb}	0	$u_B(\delta_{bb})$	- 1	(9)
δ_f	0	$u_B(\delta_f)$	1	(10)
Вихідна величина	Оцінка результату вимірювання, °C	Стандартна сумарна невизначеність, °C	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність, °C
T_X	(2)	(11)	k	(12)

3. Висновки

1. Описано аналіз та методи оцінки можливих джерел невизначеності при калібруванні термометрів інфрачервоного випромінювання.

2. Наведено процедуру оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні термометрів

інфрачервоного випромінювання методом зв'язання з випромінювачем типу АЧТ.

3. Складено бюджет невизначеності вимірювань калібрування термометрів інфрачервоного випромінювання методом зв'язання з випромінювачем типу АЧТ.

Список літератури

- ДСТУ 3194:2005 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювання температури».
- Закон України від 05.06.2014 № 1314–VII «Про метрологію та метрологічну діяльність».
- Наказ Мінекономіки України від 10.08.2020 № 1518 «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів».
- ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій».
- ILAC-P14:09/2020 «Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні».
- Kolobrodov V., Sokol B. Development of a polarimetric thermal imager calibration method. *Measurements infrastructure*. 2024, vol. 4 MI_38_080633.

Надійшла (Received) 06.08.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 16.09.2025

Відомості про авторів / About the authors

Кондратенко Вадим – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: vakond@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3833-1467>

Kondratenko Vadym – post-graduate student of the Department of Information and Measurement Technology of the Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: vakond@ukr.net, Number ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3833-1467>

Новосьолов Олег – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, E-mail: oanovoselov@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

Novoselov Oleg – post-graduate student of the Department of Information and Measurement Technology of the Kharkiv National University of Radio Electronics, E-mail: oanovoselov@ukr.net, Number ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

Measurement uncertainty evaluation at infrared thermometers calibration

V.O. Kondratenko, O.A. Novosyolov

Abstract

The article considers the procedure for measurement uncertainty evaluation at calibration of infrared thermometers (pyrometers) by direct temperature measurement using a working standard – blackbody type emitter. An analysis of the best calibration and measurement capabilities of accredited calibration laboratories for pyrometer calibration is carried out. Methods for estimating uncertainty sources are described. A procedure for estimating measurement uncertainty is presented, which includes: recording the measurement model, estimating input quantities and their standard uncertainties, estimating expanded uncertainty. A measurement uncertainty budget is compiled.

Key words: measurement uncertainty; working standard; ensuring the unity of measurements; calibration method; pyrometer; metrological traceability.