

УДК 006.91+536.5

Н. Є. Гоц, докт. техн. наук,
М. М. Микийчук, докт. техн. наук
 Національний університет
 «Львівська політехніка»,
 м. Львів, вул. С. Бандери 12

МОДЕЛЬ МЕТОДОЛОГІЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРМОМЕТРІЇ ЗА ВИПРОМІНЕННЯМ

Актуальність. В останні десятиліття значно розширився попит промисловості на засоби вимірювання температури за випромінення в діапазоні температур від - 50 до 1500°C, що зумовлено такими їх перевагами як дистанційність, висока швидкодія, можливість реалізації вимірювань складнодоступних та рухомих об'єктів в агресивному середовищі під високим електричним потенціалом. Тому значного розвитку набула термометрія за інфрачервоним випроміненням, яка знайшла широке застосування в металургії, електроенергетиці, транспортних технологіях, військовій техніці, електронній промисловості та ін. Тому зростає виробництво різних модифікацій термометрів випромінення, які вимірюють температуру в діапазоні від - 50°C до 1500°C в інфрачервоній області спектру від 1 до 14 мкм.

На сьогодні розвиток термометрії за випроміненням спричинений зростанням потреб промисловості в засобах вимірювання температури, підвищенням вимог щодо точності вимірювань температури за випроміненням в науці та промисловості, розвитком всієї міжнародної системи забезпечення єдності вимірювань.

Ці факти роблять актуальним розвиток та вдосконалення різних аспектів метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням, що дозволить підвищити точність безконтактного вимірювання температури в діапазоні від -50°C до +1500°C та розширити застосування термометрів інфрачервоного випромінення у промисловості. Тому метою даної статті є формування моделі вдосконалення та шляхів розвитку системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням.

Аналіз літератури. Згідно з міжнародною метрологічною термінологією під поняттям метрологічне забезпечення розуміють сукупність правил, технічних засобів та методів, застосування яких необхідне для забезпечення єдності результатів вимірювань у метрології [1]. На основі [2, 3] нами сформовано загальну структуру системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням (МЗ ТВ), яка складається із законодавчої, організаційної, наукової, технічної та нормативної основ (таблиця 1.4).

Система МЗ ТВ складається з комплексу елементів – від визначення одиниці термодинамічної температури Кельвін, засобів та методів її передавання робочим засобам вимірювання, методів та засобів вимірювань, методів опрацювань результатів, нормативно-методичних документів з ТВ тощо [4].

Визначення шляхів розвитку системи МЗ ТВ для потреби термометрії за інфрачервоним випроміненням має базуватися на дослідженні та аналізуванні окремих елементів системи, оскільки кожен з них чинить відповідний вплив на інші елементи системи та на точність вимірювання температури цим методом. Для цього доцільним є виділення окремих елементів-підсистем та аналізування кожного з них окремо та у взаємозв'язку. Це дасть інтегровану картину досліджуваної системи МЗ ТВ, покаже вплив окремих елементів та їх взаємозв'язків на точність вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням, а головне – визначить елементи, вдосконалення яких необхідне для розвитку термометрії за інфрачервоним випроміненням та дасть змогу сформулювати завдання дослідження.

Таблиця 1

Структура системи МЗ ТВ

Елементи системи МЗ	Структура системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням
Законодавча основа	Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»
Організаційна основа	Діяльність метрологічної служби України, яка складається з державної та відомчих служб
Наукова основа	Термометрія за випроміненням як розділ метрології, що вивчає вимірювання температури за електромагнітним випроміненням, а саме: <ul style="list-style-type: none"> • метод визначення одиниці термодинамічної температури • методи відтворення та передавання температурної шкали • методи вимірювання температури за випроміненням • методи опрацювання результатів вимірювання температури
Технічна основа	<ul style="list-style-type: none"> • еталонні засоби відтворення, зберігання та передавання температурної шкали термометрам випромінення • система робочих еталонів одиниці температури, за допомогою яких здійснюється передавання розмірів одиниць термодинамічної температури робочим термометрам випромінення • робочі засоби вимірювання температури за випроміненням, які використовуються під час розроблення, виробництва, випробувань та експлуатації продукції та наукових досліджень
Нормативна основа	<ul style="list-style-type: none"> • державні стандарти на термометри випромінення • способи подання та оцінювання їх метрологічних характеристик • методики проведення державних випробувань, метрологічної перевірки, атестації та калібрування термометрів випромінення • методики виконання вимірювань температури за випроміненням

Необхідно відмітити, що законодавча та організаційна основи МЗТВ мають загальнодержавний характер, належать до сфери діяльності Державного органу

виконавчої влади в галузі метрології, стандартизації та сертифікації та стосуються усіх видів вимірювань, а не тільки до термометрії за інфрачервоним випроміненням. На нашу думку, розвиток метрологічного забезпечення термометрії за інфрачервоним випроміненням, як складової системи МЗ ТВ повинен ґрунтуватися на вдосконаленні та розвитку саме наукових і технічних засад та їх нормативного забезпечення, як теоретичної та практичної бази цього виду вимірювання.

Для вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням необхідно виявити складові елементи МЗ термометрії за випроміненням, які потребують вдосконалення і розвитку та, внаслідок тих чи інших причин, мають істотний вплив на точність вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням. Для цього доцільно використати комплексний підхід до аналізу системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням, який реалізує принцип врахування властивостей усіх елементів системи та їх складових, які впливають на результат [5].

Нами запропонована структурна модель вдосконалення системи МЗ термометрії за випроміненням [6], показану на рисунку 1 у вигляді причинно-наслідкової діаграми Ішікави [7], яка є аналітичним інструментом для дослідження впливу різних чинників, виділення найвагоміших причин, вплив яких призводить до конкретних наслідків та піддається корегуванню. Ця модель показує вплив окремих елементів МЗ термометрії за випроміненням та їх складових на стан метрологічного забезпечення термометрії за інфрачервоним випроміненням та, як наслідок, на точність вимірювання температури цим методом [8].

Ця діаграма показує усі елементи МЗ ТВ та їх складові, взаємозв'язки між ними та вплив на кінцевий результат – якість метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням. З діаграми бачимо, що на кінцевий результат впливає кожен елемент та кожна складова системи МЗ ТВ, а значить вдосконалення хоча б одного з них призведе до вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням та покращення точності. Вдосконалення елементів МЗ ТВ та їх складових для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням дасть змогу розвинути метрологічне забезпечення цього виду вимірювань та підвищити точність вимірювання температури цим методом.

Для опису цієї структурної моделі пропонуємо математичну модель методології вдосконалення системи МЗ ТВ, яка розкриває залежність процесу вдосконалення системи МЗ ТВ від окремих елементів цієї системи.

Структуру системи МЗ ТВ, яка складається з окремих елементів E_i згідно з рисунком 1 можна описати рівняннями (1) та (2):

$$MZ = W(E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8, E_9) = \bigcup_{i=1}^n E_i, \quad (1)$$

де MZ – вихідний стан системи МЗ ТВ; W – оператор системи, що визначає зв'язки між елементами моделі; i – номер елемента системи МЗ ТВ; E_i – елемент системи МЗ; E_1 – формування одиниці термодинамічної температури; E_2 – методи та засоби передання температурної шкали; E_3 – еталонні засоби вимірювання; E_4 – математичне

моделювання об'єкта, процесу та умов ВТВ; E_5 – методи вимірювання температури за випроміненням; E_6 – засоби вимірювання температури за випроміненням; E_7 – методи опрацювання результатів вимірювання; E_8 – нормативно-методичне забезпечення; E_9 – законодавче забезпечення.

Оцінювання рівня якості елемента системи МЗ ТВ може мати як кількісний, так і якісний характер. Елементи $E_1 \div E_7$ можуть бути піддані якісній та кількісній оцінці, а елементи E_8 E_9 лише якісній оцінці за результатами аналізу фахівців. Стан окремого елемента системи МЗ ТВ, який піддається кількісній оцінці, визначається точністю його реалізації, що може бути охарактеризовано такою характеристикою точності, як непевність. За умови, що кожен елемент системи МЗ ТВ містить непевність, то непевності сукупності елементів системи та їх взаємовплив впливають на сумарну непевність МЗ ТВ та на результати вимірювання температури [9].

Кожен елемент системи МЗ ТВ формується з окремих складових згідно рис. 1. Взаємозв'язок окремих складових різних елементів МЗ ТВ описано системою рівнянь:

$$\begin{cases} E_1 = e_{11} \cup e_{12}, \dots \cup e_{1j} \\ E_2 = e_{21} \cup e_{22}, \dots \cup e_{2j} \\ E_i = e_{i1} \cup \dots \cup e_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

де j – номер складової елемента системи МЗ ТВ; e_{ij} – складові елементів системи МЗ ТВ, а саме — засоби, методи та методики реалізації кожного з елементів.

Процес вдосконалення системи МЗ ТВ описується рівняннями (3) – (7). Стан системи МЗ ТВ описується рівнянням регресії у вигляді моделі [10]:

$$u(MZ) = \sum_{i=1}^n [K_i \cdot u(E_i)], \quad (3)$$

де MZ – стан системи МЗ ТВ; $u(E_i)$ – сумарна непевність i -го елемента системи МЗ термометрії за випроміненням згідно з причинно-наслідковою діаграмою 1; K_i – коефіцієнти регресії, які являють собою коефіцієнти вагомості елементів системи МЗ ТВ.

Для складних організаційно-технічних систем, таких як система МЗ ТВ, важко забезпечити визначення коефіцієнтів регресії K_i – показників впливу окремих елементів МЗ на ефективність усієї системи. Значення коефіцієнтів вагомості елементів системи МЗ ТВ є змінними та повинні визначатися шляхом експертної оцінки у процесі щорічного коригування за умови:

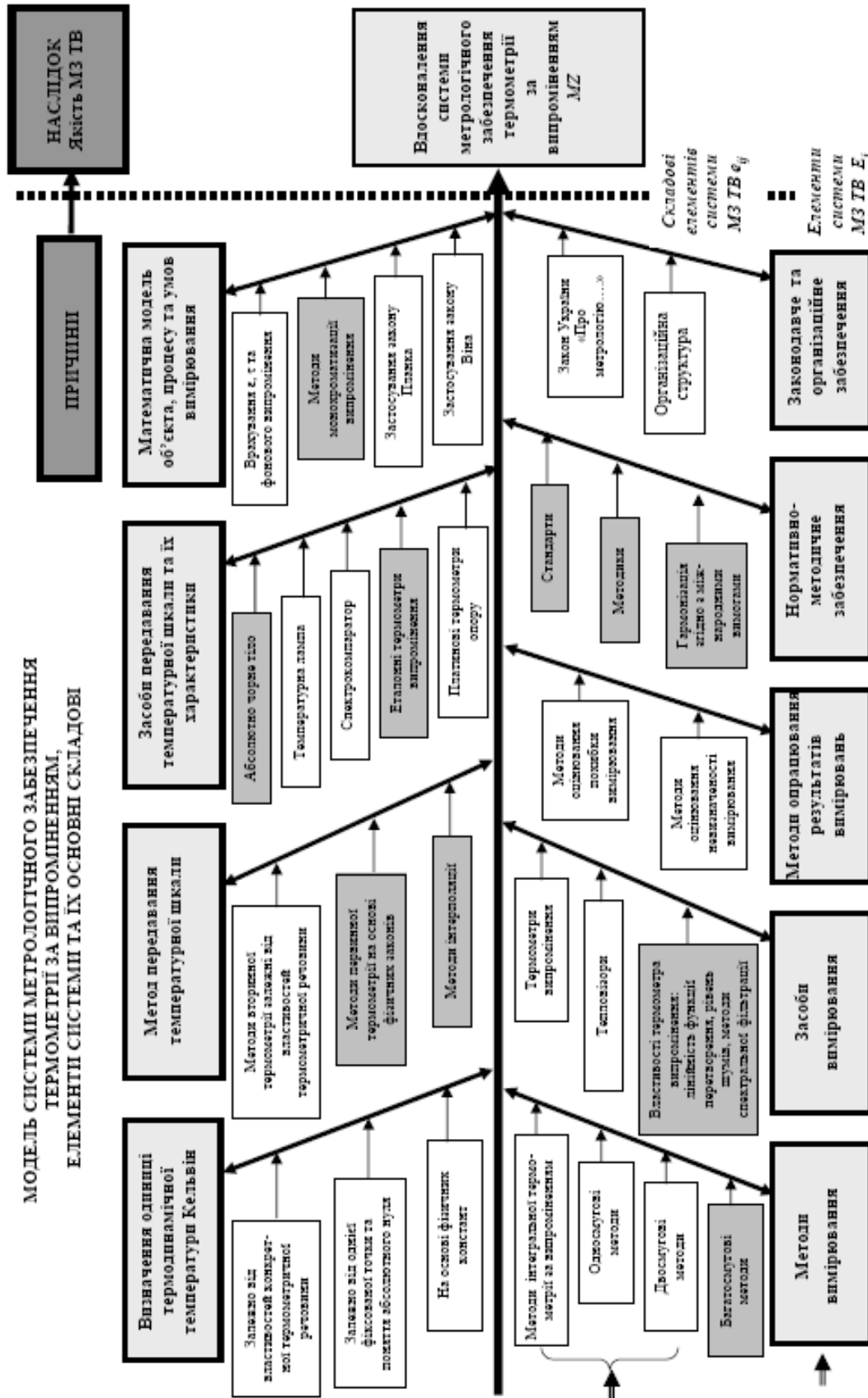


Рис. 1 – Модель методології вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випромінюванням

$$\sum_{i=1}^n K_i = 1. \quad (4)$$

Стан елементів системи, які можуть бути описані у кількісний спосіб може бути охарактеризований сумарною непевністю $u_c(MZ)$ [10]:

$$u_c(MZ) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u(E_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{m=i+1}^n u(E_i) u(E_m) r(E_i, E_m)}, \quad (5)$$

де $u(E_i)$, $u(E_m)$ – сумарна непевність i -го елемента системи МЗ термометрії за випроміненням згідно з причинно-наслідковою діаграмою 1; $r(E_i, E_m)$ – коефіцієнти взаємовпливу непевностей елементів системи МЗ.

Сумарна непевність $u(E_i)$ кожного i -го елемента системи МЗ ТВ залежить від непевностей окремих його складових та визначається як:

$$u(E_i) = \sqrt{\sum_{p=1}^P c_{ip}^2 u(e_{ip})^2 + 2 \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{k=p+1}^P u(e_{ip}) u(e_{ik}) r(e_{ip}, e_{ik})}, \quad (6)$$

де $u(E_i)$ – сумарна непевність i -го елемента системи МЗ ТВ; c_{ij} – коефіцієнти впливу j -ї складової i -го елемента системи МЗ ТВ; $u(e_{ip})$, $u(e_{ik})$ – непевності окремих складових елементів; $r(e_{ij}, e_{ik})$ – коефіцієнт кореляції, який визначає взаємозалежність між елементами системи МЗ; p, k – складові елементів.

Тому для забезпечення можливого адекватного оцінювання ефективності МЗ доцільно вводити обмеження на область можливих змін показників ефективності окремих елементів та складових системи МЗ.

Показником вдосконалення системи МЗ ТВ є зменшення непевності її окремого елемента при розробленні нових методів його реалізації. Обмеженнями для математичної моделі служать значення непевностей окремих елементів системи, які за вдосконалення системи МЗ ТВ для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням повинні бути не меншими від заданих або існуючих $u_{icn}(E_i)$:

$$u(E_i) \leq u_{icn}(E_i). \quad (7)$$

Математична модель показує, що сумарна непевність ВТВ залежить від непевностей окремих елементів МЗ термометрії випроміненням та непевностей їх складових. Модель враховує взаємовплив непевностей окремих елементів системи МЗ термометрії випромінення та вказує, що удосконалені елементи МЗ для термометрії за інфрачервоним випромінення повинні мати непевність, не більшу, ніж у існуючих

методів. Отже, математичну модель методології вдосконалення метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням можна подати у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} MZ = \bigcup_{i=1}^n E_i \\ E_i = e_{i1} \bigcup e_{i2} \dots \bigcup e_{ij} \\ u(MZ) = \sum_{i=1}^n [K_i \quad u(E_i)] \\ \sum_{i=1}^n K_i = 1 \\ u(E_i) = \sqrt{\sum_{p=1}^P c_{ip}^2 u(e_{ip})^2 + 2 \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{k=p+1}^P u(e_{ip}) u(e_{ik}) r(e_{ip}, e_{ik})} \\ u(E_i) \leq u_{\text{ич}}(E_i) \end{array} \right. \quad (8)$$

На основі запропонованої моделі можна стверджувати, що зменшення непевності окремої складової МЗ ТВ зменшить непевність окремого елемента системи МЗ термометрії випромінення та, як результат, зменшить сумарну непевність вимірювання температури за випроміненням загалом, що призведе до підвищення точності вимірювання температури за випроміненням.

Методологія вдосконалення системи МЗ ТВ для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням полягає у вдосконаленні окремих складових системи МЗ та реалізації таких дій: формування докладної структури системи МЗ термометрії за випроміненням з виділенням окремих елементів та їх складових; проведення аналізу елементів системи МЗ термометрії за випроміненням з позиції її застосування для термометрії за інфрачервоним випроміненням; визначення окремих складових МЗ ТВ, що потребують вдосконалення для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням; дослідження тенденцій розвитку та визначити шлях вдосконалення кожної з цих складових; формування вимог щодо методів вдосконалення складових МЗ термометрії за інфрачервоним випроміненням; розроблення методів вдосконалення складових системи МЗ термометрії за інфрачервоним випроміненням. Отже, застосування цієї методології дозволяє на основі комплексного аналізу елементів системи МЗ виявити складові елементів МЗ ТВ, які є недосконалими з позиції термометрії за інфрачервоним випроміненням, визначити та розробити методи їх вдосконалення.

У результаті це уможливило сформування та розвиток МЗ термометрії за інфрачервоним випроміненням, та вдосконалення системи МЗ ТВ загалом та, як наслідок дає змогу підвищити точність та розширити можливості ВТВ в інфрачервоній області спектра. Вдосконалення МЗ ТВ для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням має базуватися на інформаційних можливостях комп'ютерної та мікропроцесорної техніки, сучасних видах приймачів випромінення, розвинутих методах перетворення сигналів та накопичених в світі наукові дослідження в галузі термометрії за випроміненням.

Комплексний аналіз системи МЗ ТВ показав, що на точність вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням впливає не лише такий загальновідомий факт, методична похибка самого процесу вимірювання, але й ряд чинників, які є складовими наукових, технічних та нормативних засад метрологічного забезпечення термометрії випромінення. На рис. 1 складові системи МЗ ТВ, які необхідно вдосконалювати для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням, що визначено на основі аналізування МЗ ТВ, виділені сірим кольором.

З метою вдосконалення системи МЗ ТВ було проведено аналіз таких елементів системи МЗ: у галузі наукового забезпечення – методів визначення одиниці термодинамічної температури, методів реалізації та передавання температурної шкали (ТШ) для ТМІЧВ, методів ВТВ; у галузі технічного забезпечення – засобів передавання температурної шкали, технічних засад реалізації різних методів ВТВ; у галузі нормативного забезпечення – українських нормативних та методичних документів з ТВ, узгодженості їх щодо міжнародних вимог.

В результаті вдосконалення системи МЗ ТВ було реалізовано таке: розроблено метод передавання температурної шкали термометрам інфрачервоного випромінення на основі фундаментального закону Планка, що дозволило наблизити температурну шкалу до термодинамічної температурної шкали та підвищити точність передавання одиниці температури в 2 рази; розвинуто багатоканальні методи термометрії випромінення, що дозволяють зменшити методичну похибку вимірювання температури за випроміненням, та сформовані засади їх практичної реалізації в термометрах випромінення; вдосконалено нормативне забезпечення термометрії випромінення шляхом гармонізації з міжнародними нормативними вимогами в галузі формування термінологічної бази, методик атестації та метрологічної перевірки, оцінювання точності методів передавання температурної шкали та опрацювання результатів температури. Таким чином, реалізація запропонованої методології дало змогу вдосконалити систему метрологічного забезпечення термометрії за інфрачервоним випроміненням та, як наслідок, підвищити точність безконтактного вимірювання температури в діапазоні від -50°C до $+1500^{\circ}\text{C}$.

Література

1. OIML Vocabulary. International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML) [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.oiml.org/en/technical-work/committee-drafts/files/tc1-viml-3cd.pdf/>. – Назва з екрана.
2. Бичківський Р. В. Основи метрологічного забезпечення / Р. В. Бичківський, В. І. Зорій, П. Г. Столярчук. – Львів: Видавництво ДУ «Львівська політехніка», 1999. – 180 с.
3. Бичківський Р.В. Метрологія, стандартизація, управління якістю та сертифікація / Р.В. Бичківський, П.Г. Столярчук, П.Р. Гамула. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 560 с.
4. Енциклопедія термометрії / Я. Т. Луцик, Л. К. Буняк, Ю. К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. – 428с.
5. Гоц Н.Є. Розвиток метрологічного забезпечення багатоканальних методів вимірювання температури за випроміненням / Н.Є. Гоц // Методи і засоби вимірювань фізичних величин. Температура 2012: Тези доп. ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., Львів, Україна, 2012 р. – Л., 2012. – С. 117–118.
6. Гоц Н.Є. Формування методології розвитку системи метрологічного забезпечення термометрії випромінення / Н.Є. Гоц // Метрологія та прилади. – 2013. – № 2(40). – С. 37–40.
7. Исикава К. Японские методы управления качеством / К. Исикава – М: Экономика, 1988. – 214 с.
8. Гоц Н.Є. Системний підхід до характеризування точності процесу вимірювання температури за випромінення / Н.Є. Гоц // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 06(82). – С. 89–94.

9. Гоц Н. Бюджет неопределенности на различных этапах измерения температуры излучения / Н. Гоц // Температура-2011 : тезисы 4-ой Всерос. и стран-участниц КОOMET конф. по пробл. термометрии, Санкт-Петербург, Россия, 19–21 апреля 2011 г. – СПб., 2011. – С. 52–53.

10. Hots N. Uncertainty budget of radiation thermometry / N. Hots // Termografia i termometria w podczewieni : materialy VII konf. krajowej TTP-20011, Ustroń-Jaszowiec, Polska, 2011 r. – Ustroń-Jaszowiec, 2011 – P.69–71.

МОДЕЛЬ МЕТОДОЛОГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРМОМЕТРИ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ

Н. Е. Гоц, Н. Н. Микийчук

В статье представлена методология развития системы метрологического обеспечения термометрии по излучению, сформирована математическая модель ее реализации. На основе предложенной методологии усовершенствована метрологическое обеспечение термометрии по инфракрасному излучению

METHODOLOGY MODEL OF RADIATION THERMOMETRY METROLOGICAL ASSURANCE

N. Hots, M. Mykyjtchuk

This paper proposed a methodology of development of metrological support for radiation thermometry, formed a mathematical model of implementation. Based on the proposed methodology improved metrological support for infrared radiation thermometry