МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.21.088

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-5-14

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Т. В. Кепещук, Л. Б. Пастущин

Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»;вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, 76007, Україна; e-mail: ktv.metr77@gmail.com

Метою даної роботи є розроблення процедури калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень (індикаторів), що передбачає, серед іншого, складання модельного рівняння (математичної моделі), формування бюджету та оцінювання невизначеності результатів вимірювання. Забезпечення єдності та метрологічної простежуваності результатів вимірювання – одне з основних завдань калібрувальних лабораторій під час калібрування засобів вимірювальної техніки. Калібрування засобів вимірювальної техніки здійснюється відповідно до методик калібрування. Впровадження міжнародних документів, що регламентують акредитацію та діяльність калібрувальних лабораторій передбачає можливість цими лабораторіями розробляти власні (нестандартизовані) методики калібрування засобів вимірювальної техніки з подальшою їх валідацією (оцінюванням придатності до застосування). Якщо замовник не вказує метод (методику), який необхідно застосовувати під час калібрування засобу вимірювальної техніки, то рекомендується застосовувати відповідні методи (методики), опубліковані у міжнародних, регіональних чи національних стандартах, або видані авторитетними технічними організаціями, або видані у відповідній науковій літературі чи журналах, або ті, що зазначаються виробником обладнання. У роботі наведено методи та засоби, процедуру проведення калібрування мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень, визначення метрологічних характеристик зазначених засобів вимірювальної техніки, складання математичної моделі, формування бюджету та оцінювання невизначеності вимірювання за результатами калібрування. Наведений матеріал надає практичні рекомендації калібрувальним лабораторіям щодо розроблення нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень.

Ключові слова: засіб вимірювальної техніки, мікрометр, індикатор лінійних переміщень, калібрувальна лабораторія, методика калібрування, невизначеність вимірювань.

The purpose of this work is to develop a procedure for calibrating measuring instruments (MI) of geometric quantities, in particular micrometers and linear displacement indicators (indicators), which involves, among other things, compiling a model equation (mathematical model), forming a budget and assessing the uncertainty of measurement results. Ensuring the unity and metrological traceability of measurement results is one of the main tasks of calibration laboratories during the calibration of measuring instruments. Calibration of measuring instruments is carried out in accordance with calibration methods. The introduction of international documents regulating the accreditation and activities of calibration laboratories provides for the possibility for these laboratories to develop their own (non-standardized) methods for calibrating measuring instruments with their subsequent validation (assessment of suitability for use). If the customer does not specify the method (methodology) that must be used during the calibration of a measuring instrument, it is recommended to use the appropriate methods (methodologies) published in international, regional or national standards, or issued by authoritative technical organizations, or published in relevant scientific literature or journals, or those specified by the equipment manufacturer. The work provides methods and means, the procedure for calibrating micrometers and linear displacement indicators, determining the metrological characteristics of the specified measuring instruments, compiling a mathematical model, forming a budget and assessing the measurement uncertainty based on the calibration results. The material provides practical recommendations to calibration laboratories on the development

of non-standardized methods for calibrating measuring instruments of geometric quantities, in particular micrometers and linear displacement indicators.

Keywords: measuring instrument, micrometer, linear displacement indicator, calibration laboratory, calibration method, measurement uncertainty.

Вступ

Забезпечення єдності та метрологічної простежуваності результатів вимірювання – одне з основних завдань калібрувальних лабораторій під час калібрування засобів вимірювальної техніки.

Відповідно до положень Закону України «Про метрологію і метрологічну діяльність» [1], калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології. Калібруванню також підлягають вторинні та робочі еталони.

Загальні вимоги щодо компетентності, неупередженості та стійкого функціонування калібрувальних лабораторій визначаються національним стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [2], який є ідентичним європейському та міжнародному документу EN ISO/IEC 17025:2107 та ISO/IEC 17025:2107. Окрім цього, акредитовані калібрувальні лабораторії при провадженні своєї діяльності також повинні керуватися міжнародними документами: EA-4/02 M, ILAC-G8:09, ILAC-P10:07, ILAC P14:01, ILAC-P14:09 [3, 4, 5, 6, 7] та документами Національного агентства з акредитації України: ЗД-08.00.09, ЗД-08.00.29, ІН-08.02.05 [8, 9, 10].

Калібрування засобів вимірювальної техніки здійснюється відповідно до методик калібрування. Згідно з ДСТУ EN ISO/IEC 17025 якщо замовник не вказує метод (методику), який необхідно застосовувати під час калібрування ЗВТ, рекомендується застосовування відповідних методів (методик), що опубліковані у регіональних, міжнародних або національних стандартах, які видані авторитетними технічними організаціями, у відповідній науковій літературі, журналах або зазначені виробником обладнання. Окрім цього, відповідно до положень вказаного стандарту калібрувальні лабораторії можуть розробляти власні (нестандартизовані) методики калібрування засобів вимірювальної техніки з подальшою їх валідацією (оцінюванням придатності до застосування).

На даний час в Україні для більшості еталонів, засобів вимірювальної техніки відсутні методики калібрування, що встановлені у національних стандартах. Тому досить актуальним є питання щодо розроблення таких методик.

Мета роботи - розроблення процедури (типової методики) калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень, що передбачає, серед іншого, складання математичної моделі, формування бюджету та оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

Основний текст статті

У ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» розроблені методики калібрування ЗВТ геометричних величин, зокрема штангенінструменту, мікрометрів, індикаторів лінійних переміщень, мікроскопів, нутромірів, кутомірів та ін. Вказані методики розроблені з урахуванням вимог EA-4/02 M (в частині процедури оцінювання невизначеності вимірювань), пройшли апробацію, валідацію (оцінюванням придатності до застосування) та застосовуються для калібрування ЗВТ геометричних величин. Основними операціями, які наведені у методиках калібрування, є зовнішній огляд, опробування, визначення метрологічних характеристик ЗВТ, складання математичної моделі вимірювань, опрацювання результатів калібрування та оцінювання невизначеності вимірювань [11].

Процедуру калібрування штангенінструменту, складання модельного рівняння (математичної моделі) вимірювань, формування бюджету та оцінювання невизначеності вимірювань наведено в [11].

Розглянемо основні операції при калібруванні мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень, що можуть бути оснащені цифровим відліковим пристроєм.

Перед проведенням калібрування проводиться контроль умов калібрування. Температура повітря в приміщенні повинна бути (20 ± 2) °С, відносна вологість повітря від 40% до 75%, атмосферний тиск від 93325 Па до 103991Па; зміна температури не повинна перевищувати 0,5 °С за 1 годину. У приміщенні, де виконуються калібрування ЗВТ геометричних величин, не повинно бути повітряних та теплових потоків, а також вібрацій.

Перед проведенням калібрування еталонне та допоміжне обладнання для калібрування повинні бути приведені в робочий стан відповідно з експлуатаційними документами і витримані протягом не менше чотирьох годин на робочому місці. Мікрометри, що підлягають калібруванню, та міри довжини кінцеві плоскопаралельні (еталонні засоби) необхідно брати за допомогою рукавичок або теплоізольованої серветки.

При зовнішньому огляді мікрометрів повинні бути відсутніми: сколи, тріщини і забої на вимірювальних поверхнях та інших дефекти, які погіршують експлуатаційні характеристики і перешкоджають відліку показів.

Під час опробування мікрометрів перевіряють кілька важливих характеристик, які забезпечують точність і надійність роботи інструмента. Зокрема, перевіряють плавність переміщення барабана мікрометра вздовж «стебла», щоб забезпечити рівномірність руху без ривків і заїдань. Також оцінюють відсутність тертя барабана об «стебло», що може призводити до пошкоджень або неточностей у вимірюваннях.

Додатково тестують плавність переміщення мікрометричного гвинта, що є критичним для точного регулювання зазору. У разі наявності стопорного пристрою перевіряють, чи мікрометричний гвинт залишається нерухомим після його закріплення стопорним гвинтом. Завершальним етапом є перевірка правильності установки нульових показів мікрометра, що є основою для точності вимірювань

Для мікрометрів з цифровим відліковим пристроєм перевіряються:

- якість індикації показів мікрометра - індикація повинна бути чіткою, не мати розривів і бути рівномірно заповненою;

- відсутність на дисплеї мікрометра дефектів, що перешкоджають чи спотворюють покази.

Під час зовнішнього огляду індикаторів необхідно забезпечити відповідність засобу вимірювання таким критеріям:

1. Стан зовнішнього вигляду:

- Елементи шкали повинні бути чітко видимі, без будь-яких ознак пошкоджень або спотворень, що можуть ускладнювати зчитування даних.

- Матеріал, що закриває циферблат (наприклад, скло чи інший прозорий матеріал), повинен бути цілим, без тріщин, сколів чи інших дефектів.

- Пристрій для суміщення нульового штриха шкали зі стрілкою має функціонувати коректно та забезпечувати точне налаштування.

- Вказівник кількості обертів стрілки має бути в задовільному стані, без механічних пошкоджень, що можуть впливати на його функціональність.

2. Стан поверхні індикатора:

- Зовнішня поверхня повинна бути чистою, без іржі, бруду або глибоких подряпин, які могли б вплинути на точність вимірювань або ускладнити калібрування пристрою.

- Шкала повинна мати чітко нанесені поділки та цифрові позначки, які не повинні мати розривів, затирань чи інших

пошкоджень, що можуть завадити зчитуванню результатів.

Опробування індикаторів включає наступні етапи:

3. Перевірка вимірювального стержня:

- Проводиться оцінка перевищення загального ходу вимірювального стержня відносно його робочого ходу. Вимірювальний стержень повинен мати відповідність у своїх рухах.

- Стрілка індикатора має повністю перекривати короткі штрихи шкали, забезпечуючи точне відображення значень.

- При вільному переміщенні вимірювального стержня або його різкій зупинці стрілка не повинна здійснювати небажаних проворотів, що можуть вплинути на точність показників.

4. Робота стрілки:

- У крайніх положеннях подвійного ходу вимірювального стержня стрілка повинна переходити за вісь симетрії індикатора.

- Оцифрування шкали вказівника обертів має відповідати прямому ходу вимірювального стержня.

5. Оцінка точності:

- Перевіряється можливість суміщення стрілки з будь-якою поділкою шкали. При цьому не допускається зміщення стрілки з установленого положення.

- Стрілка не повинна відхилятися від напряму осі вимірювального стержня при встановленні індикатора за вказівником обертів на будь-якому числі повних обертів.

6. Додаткові перевірки для цифрових індикаторів:

- Оцінюється справність пристрою «обнулення». Пристрій має забезпечувати коректне встановлення показників на нуль без збоїв чи затримок.

Загальні вимоги до функціональності:

Робота пристрою має бути плавною, без ривків, заїдань чи інших дефектів, які можуть порушити точність вимірювання або знизити зручність експлуатації.

Під час калібрування мікрометрів визначаються основні метрологічні характеристики, зокрема вимірювальне зусилля, відхилення від площинності та паралельності вимірювальних поверхонь, відхилення показів, а також формується бюджет і оцінюється невизначеність результатів вимірювання.

Вимірювальне зусилля визначається за допомогою динамометра, який встановлюють між вимірювальними поверхнями мікрометра. Потім вимірювальні поверхні підводять, використовуючи пристрій для створення контрольованого зусилля, після чого знімають показання за шкалою динамометра. Відхилення від площинності вимірювальних поверхонь оцінюють інтерференційним методом із використанням плоскої скляної пластини, яку накладають на контрольовану поверхню. Досягають такого контакту, за якого спостерігається мінімальна кількість інтерференційних смуг. Величина відхилення визначається за числом інтерференційних смуг, причому відлік проводять, відступивши не менше ніж на 0,5 мм від краю вимірювальної поверхні.

На рис. 1, а) смуги, а і б обмежені колами, при цьому контакт поверхні відбувається в точці а. Коло г не береться до уваги, оскільки воно розташований менше як 0,5 мм від краю поверхні. На рис. 1, б) контакт зі скляної пластини з вимірювальною поверхнею мікрометра відбувається в центральній точці, вимірювальна поверхня являє собою неправильну сферу з різними радіусами кривизни поверхні в перетинах Х-Х і У-У. Контакт поверхні відбувається в точці а, інтерференційна смуга б вважається першою, а смуги д і б приймаються за одну смугу, оскільки при великому розмірі вимірювальної поверхні вони б замкнулися. Смуги г і е до уваги не беруть, оскільки вони розташовані менше як 0,5 мм від краю поверхні. На рис. 1, в) вимірювальна поверхня являє собою циліндр. Контакт поверхні виконується в лінії а, в цьому випадку смуги витягуються в лінії, і кожна пара ліній б-д, в-г, ж-е вважаються за одну смугу, а смуга к до уваги не береться.

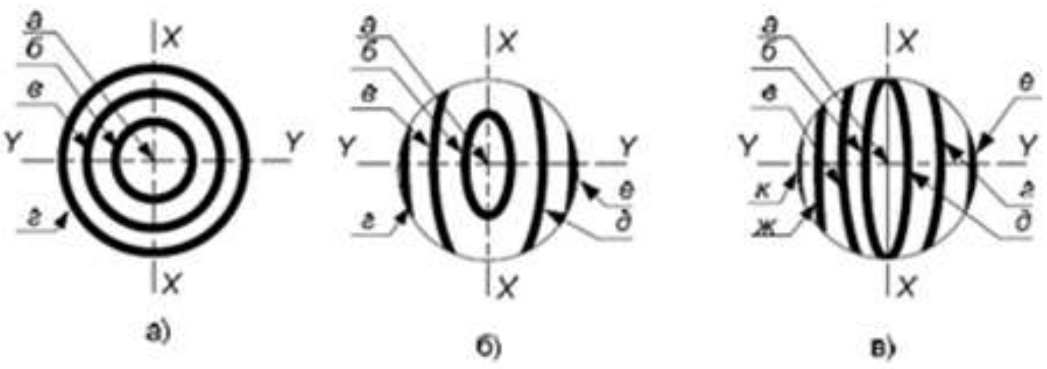

Рисунок 1 – Вимірювання відхилення від площинності вимірювальних поверхонь мікрометра

У випадку, коли по обидві сторони від точки (лінії) контакту буде спостерігатися різна кількість інтерференційних смуг, то відлік смуг виконується по тій стороні де їх більше.

Відхилення від паралельності вимірювальної поверхні мікрометра визначається за допомогою мір довжини кінцевих плоскопаралельних, розміри яких відрізняються один від одної на значення, яке відповідає 1/4 обороту мікрометричного гвинта. Плоскопаралельна кінцева міра довжини послідовно встановлюється між вимірювальними поверхнями в положенні 1,2,3,4 на відстані b від краю вимірювальної поверхні, як показано на рис. 2, і підводяться вимірювальні поверхні мікрометра при використанні пристрою, що забезпечує вимірювальне зусилля.

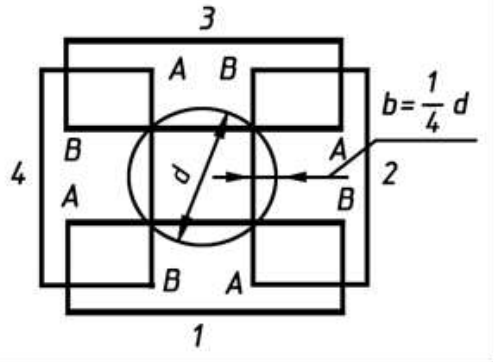

Рисунок 2 - Вимірювання відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь мікрометра

Відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь мікрометра для кожного розміру міри довжини кінцевої плоскопаралельної визначається як найбільша різниця показів мікрометра при чотирьох положеннях міри довжини кінцевої плоскопаралельної.

Визначення відхилення показів мікрометра виконується у не менше як трьох точках рівномірно розташованих по шкалі мікрометра методом безпосереднього порівняння з мірами довжини кінцевими плоскопаралельними. При відліку показів по барабану мікрометра, шкала повинна знаходитися прямо перед очима, щоб уникнути помилки через паралакс. У тому випадку, коли є сумніви в відліку, застосовується лупа.

Відхилення показів мікрометра визначається наступним чином. Міра довжини кінцева плоскопаралельна (кінцева міра довжини) розташовується по центру вимірювальних поверхонь мікрометра, далі підводяться вимірювальні поверхні мікрометра до контакту при використанні пристрою, що забезпечує вимірювальне зусилля. Після чого проводиться відлік за шкалою мікрометра. Для оцінювання невизначеності вимірювання виконується не менше 10 повторних вимірювань для кожної точки калібрування. Визначення показів мікрометра виконується одним і тим же оператором в одних і тих же встановлених умовах калібрування.

Середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, визначається за формулою:

$$\overline{l_0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_{i_0}}{n}, \quad (1)$$

де n – кількість вимірювань;

l_{i_0} – результат i-го вимірювання довжини, зчитаний зі шкали мікрометра, мм.

У кожній точці калібрування обчислюється відхилення показів мікрометра:

$$\Delta l_м = \overline{l_0} - l_{МКП}, \quad (2)$$

де $\overline{l_0}$ – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, мм;

$l_{МКП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, [мм].

Середнє квадратичне відхилення ряду результатів вимірювання обчислюється за формулою:

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(l_{i_0} - \overline{l_0}\right)^2}{n-1}}, \quad (3)$$

де l_{i_0} – результат i-го вимірювання довжини, зчитаний зі шкали мікрометра, мм;

$\overline{l_0}$ – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, мм.

Модельне рівняння (математичну модель) з урахуванням впливових факторів, що складають основні істотні джерела невизначеності вимірювання, можна визначити за наступним виразом:

$$\Delta l_м = \overline{l_0} - l_{МКП} + \delta l_{пл.м} + \delta l_{пр.м} + \delta l_d + \delta l_{МКП} + \delta l_{П\,МКП} + \delta l_{ДМКП}, \quad (4)$$

де $\overline{l_0}$ – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, мм;

$l_{МКП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, мм;

$\delta l_{пл.м}$ – поправка на відхилення від площинності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

$\delta l_{пр.м}$ – поправка на відхилення від паралельності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

δl_d – поправка, що враховує роздільну здатність мікрометра, мм;

$\delta l_{МКП}$ – поправка на відхилення середнього значення довжини міри довжини кінцевої плоско паралельної, мм;

$\delta l_{ПМКП}$ – поправка на відхилення від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної, мм;

$\delta l_{ДМКП}$ – поправка на дрейф довжини міри кінцевої плоско паралельної, мм.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювань, що враховує вплив вхідних величин, визначається за формулою:

$$u_c = \left(u_{\overline{l_0}}^2 + u_{lМКП}^2 + u_{lпл.м}^2 + u_{lпр.м}^2 + u_d^2 + u_{lПМКП}^2 + u_{lДМКП}^2\right)^{1/2}, \quad (5)$$

де $u_{\overline{l_0}}$ – стандартна невизначеність середнього результату вимірювання довжини з допомогою мікрометра, що калібрується, мм;

$u_{lМКП}$ – стандартна невизначеність еталону міри довжини кінцевої плоскопаралельної, мм;

$u_{lпл.м}$ – стандартна невизначеність, викликана відхиленням від площинності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

$u_{lпр.м}$ – стандартна невизначеність, викликана відхиленням від паралельності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

u_d – стандартна невизначеність зчитування показів, викликана дискретністю мікрометра, мм;

$u_{lПМКП}$ – стандартна невизначеність, викликана відхиленням від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної, мм;

$u_{lДМКП}$ - стандартна невизначеність, викликана дрейфом довжини міри кінцевої плоскопаралельної, мм.

Стандартна невизначеність середнього результату вимірювання довжини з допомогою мікрометра, що калібрується, (за типом А), а також стандартні невизначеності інших складових бюджету невизначеностей (за типом В) оцінюються відповідно до алгоритмів, наведених у [11].

Калібрування індикаторів лінійних переміщень проводиться наступним чином. Індикатор встановлюють у рухомий кронштейн стійки, надійно закріплюючи його для забезпечення стабільності під час вимірювань. Потім кронштейн опускають до моменту, коли наконечник вимірювального стержня індикатора торкнеться поверхні вимірювального стола, а стрілка шкали зміститься на кілька поділок (щонайменше на п'ять). Після цього кронштейн фіксують у цьому положенні.

Для перевірки повторюваності показів стержень індикатора тричі піднімають і опускають, а потім нульовий штрих шкали суміщають із положенням стрілки. Далі наконечник індикатора піднімають і на вимірювальний стіл під ним встановлюють еталонну кінцеву міру довжини, після чого вимірювальний стержень обережно опускають на еталон. Важливо, щоб наконечник стержня торкався саме центру робочої поверхні кінцевої міри довжини для уникнення похибок.

Вимірювання проводять 10 разів для кожної кінцевої міри довжини. Визначають зміну показів індикатора при зусиллі 2,5 Н на вимірювальний стержень в напрямку, перпендикулярному до осі стержня. Для цього виконують наступні операції.

Переміщуючи кронштейн стійки вверх чи вниз встановлюють вимірювальний стержень індикатора в положення, що відповідає середині діапазону вимірювання. Суміщають нульовий штрих шкали зі стрілкою, після чого спеціальним динамометричним пристосуванням, відградуйованим на зусилля 2,5 Н (±0,1Н) натискають на вимірювальний наконечник індикатора послідовно з чотирьох сторін по двох взаємно перпендикулярних напрямах і спостерігають зміну показів індикатора. За результат приймають найбільше з отриманих значень.

Середнє значення результату вимірювання довжини індикатором визначається за формулою:

$$\overline{l} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i \ . \qquad (6)$$

Середнє значення різниці показів індикатора та довжини міри довжини кінцевої плоскопаралельної за результатами n вимірювань визначається за формулою:

$$\overline{\Delta l} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i - l_0 \ , \qquad (7)$$

де l_i – *i*-те значення показів індикатора;

l_0 – номінальна довжина еталонної кінцевої міри;

n - число циклів вимірювання (n = 10).

Для побудови математичної моделі вимірювання ідентифікуємо джерела невизначеності вимірювання довжини за допомогою індикатора. З урахуванням цих джерел математична модель вимірювання набуде наступного вигляду:

$$\Delta l_I = \overline{l_0} - l_{МКП} + \Delta l_П + \delta l_d + \delta l_{ДМКП}, \qquad (8)$$

де $\overline{l_0}$ - середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали індикатора, мм;

$l_{МКП}$ - номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, мм;

$\Delta l_П$ - поправка на зміну показів індикатора при зусиллі на вимірювальний стержень в напрямку, перпендикулярному до осі стержня, мм;

δl_d - поправка, викликана дискретністю відліку індикатора, мм;

$\delta l_{ДМКП}$ - поправка на дрейф довжини міри кінцевої плоскопаралельної, мм.

Оцінювання стандартних невизначеностей результату вимірювання довжини з допомогою індикатора, що калібрується, здійснюється за наступними алгоритмами.

Стандартна невизначеність вимірювання довжини (за типом А), зумовлена розкидом значень, визначається як середньоквадратичне відхилення різниці показів індикатора та значення довжини міри кінцевої плоскопаралельної за формулою:

$$u(l_0) = \frac{S(\Delta_{li})}{\sqrt{n}} \ , \qquad (9)$$

де

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності результатів вимірювання при калібруванні мікрометра

Вхідна величина $u_{(x_i)}$	**Закон розподілу**	**Коефіцієнт чутливості** C_i	**Кількість ефективних степенів свободи**	**Стандартна невизначеність**	**Внесок невизначеності,** $(c_i \cdot u_i)^2$**, мм** **Ваговий внесок у невизначеність, %**
$u_{\bar{l}_0}$	Нормальний	1	9	$u_{\bar{l}_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(l_{i_0} - \bar{l}_0\right)^2}{n(n-1)}}$	0,0002 4,8805
$u_{пл.м}$	Прямокутний	1	∞	$u_{пл.м} = \frac{l_{пл.м}}{\sqrt{3}}$	0,0003 7,3270
$u_{пр.м}$	Прямокутний	1	∞	$u_{пр.м} = \frac{l_{пр.м}}{\sqrt{3}}$	0,0006 14,6341
u_d	Прямокутний	1	∞	$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}}$	0,0029 70,7317
$u_{lПМКП}$	Прямокутний	1	∞	$u_{lПМКП} = \frac{l_{ПМКП}}{\sqrt{3}}$	0,00005 1,2195
$u_{lМКП}$	Нормальний	-	∞	$u_{lМКП} = \frac{U_{lМКП}}{2}$	0,000025 0,6097
$u_{lДМКП}$	Прямокутний	1	∞	$u_{lДМКП} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}}$	0,00001 0,2439
u_{sum}	Нормальний	-	-		0,0041
U	Нормальний	-	-	$U = k \cdot u_c$	0,0082

Таблиця 2 – Бюджет невизначеності результатів вимірювання при калібруванні індикаторів лінійних переміщень

Вхідна величина $u_{(x_i)}$	**Закон розподілу**	**Коефіцієнт чутливості** C_i	**Кількість ефективних степенів свободи**	**Стандартна невизначеність**	**Внесок невизначеності,** $(c_i \cdot u_i)^2$**, мм** **Ваговий внесок у невизначеність, %**
$u(\overline{\Delta_l})$	Нормальний	1	9	$u_{\bar{l}_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(l_{i_0} - \bar{l}_0\right)^2}{n(n-1)}}$	0,0002 5,4054
$\Delta l_{П}$	Прямокутний	1	∞	$\frac{MAX(\Delta l_{\tilde{I}})}{2\sqrt{3}}$	0,0006 16,2162
u_d	Прямокутний	1	∞	$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}}$	0,0029 78,1783
$u_{lДМКП}$	Прямокутний	1	∞	$u_{lДМКП} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}}$	0,00001 0,2702
u_{sum}	Нормальний	-	-		0,0037
U	Нормальний	-	-	$U = k \cdot u_c$	0,0074

$$S(\Delta_{l_i}) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta_{l_i} + \overline{\Delta_{l_i}})^2} \quad . \qquad (10)$$

Стандартна невизначеність, викликана зміною показів індикатора при зусиллі на вимірювальний стержень в напрямку, перпендикулярному до осі стержня визначається за формулою:

$$u(\Delta l_{\Pi}) = \frac{MAX(\Delta l_{\Pi})}{2\sqrt{3}}, \qquad (11)$$

де $MAX(\Delta l_{\Pi})$ - максимальне значення відхилення показів індикатора, мм.

Стандартна невизначеність, викликана дискретністю відліку індикатора визначається за формулою:

$$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}}, \qquad (12)$$

де d - ціна поділки індикатора.

Стандартна невизначеність, викликана дрейфом довжини міри кінцевої плоскопаралельної оцінюється за типом *B* і обчислюється за формулою:

$$u_{lДМКП} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}} \ , \qquad (13)$$

де Δ_1 - відхилення довжини від номінальної міри кінцевої плоскопаралельної, отримане за результатами останнього калібрування, мм;

Δ_2 - відхилення довжини від номінальної міри кінцевої плоскопаралельної, отримане за результатами передостаннього калібрування, мм.

Сумарна стандартна невизначеність результатів калібрування індикатора оцінюється виходячи з виразу для некорельованих вхідних величин та визначається за формулою:

$$u_c = \sqrt{u_{l_0}^2 + u_{lМКП}^2 + u_{\Delta L\,П}^2 + u_d^2 + u_{lДМКП}^2} \ . \qquad (14)$$

Розширена невизначеність вимірювання (U , мм) обчислюється за формулою:

$$U = k \cdot u_c \ , \qquad (15)$$

де k - коефіцієнт охоплення (k =2 при рівні довіри 95%).

За результатами калібрувань засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема, мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень визначено їх метрологічні характеристики, сформовано складові бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювань (таблиці 1 і 2, відповідно).

Висновки

Відповідно до вимог міжнародних документів, що регламентують акредитацію і діяльність калібрувальних лабораторій вказані лабораторії можуть розробляти нестандартизовані методики калібрування, що є невід'ємною частиною забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів калібрування.

Розроблені методичні матеріали надають практичні рекомендації калібрувальним лабораторіям щодо розроблення методик калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень.

Основою для розроблення методик калібрування є складання модельного рівняння (математичної моделі), формування бюджету і оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» №1314-VII від 05.06.2014р.

2. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT)

3. ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic andgeneral concepts and associated terms (VIM) (Міжнародний словник з метрології - Основні і загальні поняття і відповідні терміни (VIM)).

4. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. (Вираження невизначеності вимірювання при калібруванні).

5. ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (Керівництво з правил ухвалення рішення та декларацій відповідності)

6. ILAC-P10:07/2020 ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. (Політика ILAC щодо метрологічної простежуваності результатів вимірювання

7. ILAC P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration (Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні)

8. ЗД-08.00.09 Політика НААУ щодо метрологічної простежуваності вимірювання, що проводять органи з оцінки відповідності відповідно до заявленої сфери акредитації

9. ЗД-08.00.29 Політика НААУ щодо участі органів з оцінки відповідності у перевірках професійного рівня та міжлабораторних порівняннях, відмінних від перевірок професійного рівня

10. ІН-08.02.05 Інструкція «Формування сфери акредитації калібрувальної лабораторії»

11. Кепещук Т.В., Пастущин Л.Б., Пташенчук В.В. Типова методика калібрування штангенінструменту. *Перспективні технології та прилади*. 2023. №23. С. 30-37.

References

1. Zakon Ukrainy «Pro metrolohiiu ta metrolohichnu diialnist» №1314-VII vid 05.06.2014r. [in Ukrainian]

2. DSTU EN ISO/IEC 17025:2109 Natsionalnyi standart Ukrainy. Zahalni vymohy do kompetentnosti vyprobuvalnykh ta kalibruvalnykh laboratorii. (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT). [in Ukrainian]

3. ISO/IES GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic andgeneral concepts and associated terms (VIM) (Mizhnarodnyi slovnyk z metrolohii - Osnovni i zahalni poniattia i vidpovidni terminy (VIM)).

4. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. (Vyrazhennia nevyznachenosti vymiriuvannia pry kalibruvanni).

5. ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (Kerivnytstvo z pravyl ukhvalennia rishennia ta deklaratsii vidpovidnosti)

6. ILAC-P10:07/2020 ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. (Polityka ILAC shchodo metrolohichnoi prostezhuvanosti rezultativ vymiriuvannia

7. ILAC P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration (Polityka ILAC shchodo nevyznachenosti vymiriuvan v kalibruvanni)

8. ZD-08.00.09 Polityka NAAU shchodo metrolohichnoi prostezhuvanosti vymiriuvannia, shcho provodiat orhany z otsinky vidpovidnosti vidpovidno do zaiavlenoi sfery akredytatsii. [in Ukrainian]

9. ZD-08.00.29 Polityka NAAU shchodo uchasti orhaniv z otsinky vidpovidnosti u perevirkakh profesiinoho rivnia ta mizhlaboratornykh porivnianniakh, vidminnykh vid perevirok profesiinoho rivnia [in Ukrainian]

10. IN-08.02.05 Instruktsiia «Formuvannia sfery akredytatsii kalibruvalnoi laboratorii». [in Ukrainian]

11. Kepeshchuk T.V., Pastushchyn L.B., Ptashenchuk V.V. Typova metodyka kalibruvannia shtanheninstrumentu. Perspektyvni tekhnolohii ta prylady. 2023. №23. S. 30-37. [in Ukrainian]

METHODOLOGICAL ASPECTS OF TOOL CALIBRATION MEASURING TECHNIQUES OF GEOMETRIC QUANTITIES

T. V. Kepeshchuk, L. B. Pastushchyn

State Enterprise "Ivano-Frankivsk Scientific and Production Center for Standardization, Metrology and Certification"; 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, 61002, Ukraine; e-mail: *ktv.metr77@gmail.com*