

АНАЛІЗ МЕТОДИК ВЕРИФІКАЦІЇ ТА КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

ANALYSIS OF VERIFICATION AND CALIBRATION METHODOLOGIES OF MEASURING INSTRUMENTS

Мотало В. П., д-р техн. наук, проф.,

Національний університет “Львівська політехніка”, Україна

e-mail: vp.motalo@gmail.com

Vasyl Motalo, Dr. Sc., Prof.,

Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: vp.motalo@gmail.com

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.051>

Анотація. Проаналізовано проблематику реалізації метрологічного підтвердження засобів вимірювальної техніки відповідно до міжнародних вимог і можливі напрями їх вирішення. Розглянуто як спільні характеристики, так і певні відмінності основних методик метрологічного підтвердження ЗВТ – верифікації і калібрування, а також сфери їх застосування. Проаналізовано методи верифікації та калібрування ЗВТ, а також точність та достовірність результатів метрологічного підтвердження ЗВТ.

Ключові слова: метрологія, засоби вимірювальної техніки, метрологічне підтвердження, верифікація, калібрування, похибка, непевність.

Abstract. The article focuses on the main problems of metrological confirmation of measuring instruments in accordance with international requirements and considers possible directions of their solution. One of the main tasks of metrology is assurance of the uniformity of measurements, that is, the state of measurements, in which their results are expressed in the legal units, and the characteristics of errors or uncertainty of measurements are known with a certain probability and do not exceed the established limits. The uniformity of measurements is ensured by the conformity of methods of measurements and measuring instruments to use for their intended purpose. In turn, the suitability of the measuring instruments to use for their intended purpose is determined by the conformity of their metrological characteristics with the established norms. Conformity assessment is the process of proving that the established requirements for a product, process, service, system, entity or body have been met.

Metrological confirmation is a set of operations required to ensure that measuring equipment conforms to the requirements for its intended use. Metrological confirmation of measuring instruments generally includes their verification and calibration. Verification and calibration procedures of measuring instruments have both common features and certain differences.

The procedure of the experimental part of the metrological confirmation of measuring instruments, both their verification and calibration, consists in comparing the indication $x_{ind}, 1_x$ of the measuring instrument, which is being verified, whether indication $x_c, 1_x$ of the measuring instrument, which is being calibrated, with the standard (reference) quantity value $x_{st}, 1_x$. Consequently, in both procedures there is a common research object: in the verification procedure it is the indication $x_{ind}, 1_x$ of the measuring instrument, which needs to be verified; in the calibration procedure it is the indication $x_c, 1_x$ of the measuring instrument, which needs to be calibrated. Accordingly, the methods for implementing the verification and calibration procedures are practically identical.

One of the key issues in the measuring instruments verification and calibration procedures is the question of estimating the accuracy and reliability of the obtained results. The error $\Delta x_{ind}, 1_x$ of the measuring instrument indication $x_{ind}, 1_x$, which is being verified, is the *measurand* in the verification procedure, and it is determined as the result of indirect measurements. The combined standard uncertainty $u_c(\Delta x_{ind}), 1_x$ of the found error value $\Delta x_{ind}, 1_x$ is the accuracy estimate of the verification result. The actual quantity value $x_{act}, 1_x$, that corresponds to the measuring instrument indication $x_c, 1_x$, which is being calibrated, is the *measurand* in the calibration procedure. The expanded uncertainty $U_p(x_{act}), 1_x$ of the found actual value $x_{act}, 1_x$ with confidence level p is the accuracy estimate of the calibration result. The obtained values $x_{act}, 1_x$ and $U_p(x_{act}), 1_x$ with confidence level p are indicated in the calibration certificate of the measuring instrument.

Key words: Metrology, Measuring instruments, Metrological confirmation, Verification, Calibration, Error, Uncertainty.

Вступ

Ключовим завданням метрології є забезпечення “єдності вимірювань” – стану вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених одиницях, а характеристики похибок або невизначеності вимірювань відомі з певною ймовірністю і не виходять за встановлені границі [1, 2]. Із завданням забезпечення “єдності вимірювань” тісно

пов’язане завдання забезпечення “метрологічної простежуваності вимірювань”, коли отриманий результат вимірювання можна пов’язати зі значенням величини, яке відтворюється національними або міжнародними еталонами через неперервний ланцюг зв’язів, для кожного з яких зазначено характеристики невизначеності (непевності) [3]. Єдність та метрологічна простежуваність вимірювань

забезпечуються відповідністю методів вимірювань і засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) до застосування за призначенням. Придатність ЗВТ до застосування за призначенням відіграє важливу роль у досягненні цілей щодо якості продукції, зокрема, цілей міжнародної “Програми 2030 для сталого розвитку” [4], яка містить 17 завдань і являє собою всеосяжний світовий план дій щодо соціальної інтеграції, економічного розвитку та забезпечення стійких моделей споживання та виробництва.

Своєю чергою, придатність ЗВТ до застосування за призначенням визначається відповідністю їх метрологічних характеристик встановленим нормам. Вимоги щодо встановлення відповідності ЗВТ регламентуються чинними нормативними документами (НД) – законами України [1, 5], технічними регламентами та чинними стандартами [6–10]. *Оцінювання відповідності* – процес доведення того, що встановлені вимоги, які стосуються продукції, процесу, послуги, системи, особи чи органу, виконано (Закон України “Про технічні регламенти та оцінку відповідності” [5]). Згідно із ISO 10012:2003 [6], *метрологічне підтвердження ЗВТ* – це сукупність операцій, необхідних для гарантування того, що вимірювальне обладнання відповідає встановленим метрологічним вимогам щодо його використання за призначенням. Вимірювальне обладнання – це вимірювальні прилади, програмні засоби, еталони одиниць величин, стандартні зразки або допоміжні засоби чи їх комбінація, необхідні для виконання процесу вимірювання.

Метрологічне підтвердження передбачає *верифікацію та калібрування* вимірювального обладнання. Процедури верифікації та калібрування ЗВТ мають як спільні риси, так і певні відмінності. Верифікації підлягають засоби вимірювань, які використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології [7–9]. Засоби вимірювань, які не використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, підлягають калібруванню [10]. Однак на добровільних засадах для них може здійснюватися і верифікація.

Встановлення єдності методології процедур метрологічного підтвердження ЗВТ, зокрема, аналізу точності та достовірності отриманих результатів верифікації та калібрування ЗВТ, є однією із ключових умов забезпечення єдності вимірювань. Це питання, поза всяким сумнівом, актуальне, що і зумовило тематику цієї роботи.

1. Аналіз проблеми оцінювання точності й достовірності результатів верифікації та калібрування засобів вимірювальної техніки

Одним із ключових питань верифікації та калібрування ЗВТ є питання оцінювання точності та

достовірності отриманих результатів [11]. Проблематика цього питання пов’язана із використанням у метрологічній практиці теорії непевності результатів вимірювань відповідно до ISO/IEC Guide 98-3:2008 [12], EA-4/02 M:2013 [13] та OIML V 2:2012 (VIM3) [3]. Зазначимо, що питання оцінювання точності результатів практично виконаних вимірювань за допомогою знаходження їх непевності сьогодні досліджене доволі глибоко. Про це свідчить велика кількість публікацій, серед яких достатньо виділити монументальну книгу професора М. Дорожовця “Опрацювання результатів вимірювань” [14].

Однак питання оцінювання точності та достовірності отриманих результатів верифікації і калібрування ЗВТ зі знаходженням їх непевності поки що досліджене недостатньо [15, 16]. Це пов’язано передусім із недостатнім і не завжди коректним використанням теорії непевності вимірювань у чинних НД. Наприклад, у чинному ДСТУ ГОСТ 8.237:2008 [17] вимоги до точності вимірювання електричного опору міри опору R_m ґрунтовані на співвідношенні похибок міри, яку перевіряють, та еталонних ЗВТ (цифрових омметрів і мостів), що не відповідає сучасним вимогам щодо метрологічної простежуваності результатів вимірювань згідно з [1, 3]. У ДСТУ OIML R 111-1:2008 [18] вказано, що розширена непевність $U_p(m_c)$, г, вимірюного значення маси гирі m_c , г, за коефіцієнта розширення $k_p = 2$ не повинна перевищувати 1/3 максимальної допустимої похибки гирі $\Delta m_{\text{доп}}$, г. Також у чинному НД “Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів” [8] вказано, що співвідношення між непевністю вимірювань, що забезпечує еталон, та максимально допустимою похибкою ЗВТ, який перевіряють, повинно становити не менше ніж один до трьох. Однак зазначимо, що ці трактування необхідної точності верифікації ЗВТ не цілком коректні, оскільки похибка і непевність тієї самої величини мають різний зміст.

Отже, забезпечення єдності методології оцінювання точності та достовірності результатів верифікації і калібрування ЗВТ через знаходження їх непевності є актуальним метрологічним завданням, що і зумовило тематику та актуальність цієї роботи.

2. Мета роботи та основні завдання досліджень

Метою роботи є аналіз і дослідження методик оцінювання точності та достовірності результатів верифікації і калібрування ЗВТ шляхом знаходження їх непевності. *Основні завдання* досліджень для досягнення цієї мети такі:

- аналіз методів верифікації та калібрування ЗВТ;
- аналіз методик верифікації та калібрування ЗВТ;
- аналіз точності та достовірності результатів верифікації та калібрування ЗВТ.

3. Методи верифікації та калібрування засобів вимірювальної техніки

Процедура експериментальної частини метрологічного підтвердження ЗВТ – як їх верифікації, так і калібрування, полягає у порівнянні показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, чи показу $x_c, 1_x$ ЗВТ, який калібрують, із еталонним значенням величини $x_{em}, 1_x$ [6]. Отже, в обох процедурах є спільний об'єкт дослідження: у процедурі верифікації – це показ $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють; у процедурі калібрування – показ ЗВТ $x_c, 1_x$ який калібрують [8, 13, 19]. Відповідно, методи реалізації процедур верифікації і калібрування практично ідентичні.

Залежно від наявності чи відсутності еталонних ЗВТ методи верифікації та калібрування ЗВТ поділяють на дві групи [15, 16, 19, 20]:

- ◆ методи з використанням еталонних ЗВТ;
- ◆ методи без використання еталонних ЗВТ (в такому разі реалізується так звана *автономна верифікація*).

Методи верифікації і калібрування ЗВТ, в яких застосовують еталонні ЗВТ, за способом їх використання розділено на такі групи:

- ◆ безпосереднє порівняння ЗВТ, який перевіряють чи калібрують, із еталонним ЗВТ;
- ◆ порівняння ЗВТ, який перевіряють чи калібрують, із еталонним ЗВТ за допомогою компаратора;
- ◆ пряме вимірювання ЗВТ, який перевіряють чи калібрують, величини, що відтворюється еталонною мірою (однозначною або багатозначною);
- ◆ пряме вимірювання еталонним ЗВТ величини, що відтворюється мірою, яку перевіряють чи калібрують;
- ◆ непряме вимірювання величини, що вимірюється або відтворюється ЗВТ, який перевіряють чи калібрують.

Автономну верифікацію та калібрування засобів вимірювань, тобто без використання еталонних засобів вимірювань, застосовують під час розроблення нових прецизійних засобів вимірювань. Такі засоби вимірювань неможливо перевірити чи калібрувати жодним із відомих методів через відсутність точніших ЗВТ із відповідними метро-

логічними характеристиками. Наприклад, калібрування прецизійних подільників напруги методом вимірювання відношення опорів, що описано у [21].

Показом $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, чи $x_c, 1_x$ ЗВТ, який калібрують, залежно від його типу може бути:

- ◆ показ вимірювального приладу $x_n, 1_x$, наприклад, показ I_A, A амперметра, який перевіряють чи калібрують тощо;
- ◆ номінальне значення міри $x_{mi}, 1_x$, наприклад, номінальне значення опору $R_n, \text{Ом}$, міри опору R_x , яку перевіряють чи калібрують; номінальне значення маси m_n , кг міри маси m_x , яку перевіряють чи калібрують тощо;
- ◆ номінальне значення коефіцієнта перетворення вимірювального перетворювача k_{pi} , наприклад, номінальне значення коефіцієнта поділу $k_{pi, n}$ подільника напруги, який перевіряють чи калібрують тощо.

Еталонним значенням величини $x_{em}, 1_x$ залежно від методу верифікації та калібрування ЗВТ може бути:

- ◆ показ еталонного вимірювального приладу, наприклад, показ еталонного амперметра I_{em}, A ;
- ◆ значення $x_{m, em}, 1_x$, відтворене еталонною мірою, наприклад, номінальне $R_n, \text{Ом}$, або дійсне $R_o, \text{Ом}$, значення опору еталонної міри опору R_{em} , номінальне $m_n, \text{кг}$ або дійсне $m_o, \text{кг}$ значення маси еталонної міри маси m_{em} ;
- ◆ значення $x_{em, in}, 1_x$, отримане як результат непрямих вимірювань $x_{em, in}, 1_x$, наприклад, еталонне значення сили струму I_{em}, A , знайдене за значенням спаду напруги U_{em}, B на еталонній мірі опору $R_{em}, \text{Ом}$, – $I_{em} = U_{em} / R_{em}, A$.

У метрологічній практиці значення відповідного параметра, отримане у результаті процедури верифікації чи калібрування засобу вимірювань, називають *дійсним* значенням величини $x_o, 1_x$ (англ. *conventional true quantity value or actual quantity value* $x_{act}, 1_x$ [19, 20]).

4. Аналіз процедури верифікації засобів вимірювальної техніки

4.1. Означення та сфера застосування процедури верифікації засобів вимірювальної техніки

Сьогодні у чинних НД [1, 3, 6–8, 22] є декілька різних означень поняття “*верифікація ЗВТ*” та сутності процедури верифікації засобів вимірювань.

Узагальнене означення поняття “верифікація” наведене у Міжнародному словнику з метрології VIM3 [3]: *верифікація* – надання об’єктивних свідощів того, що даний об’єкт повністю відповідає встановленим вимогам. Встановленими вимогами можуть бути, наприклад, такі, які задовольняють специфікації виробника. Об’єктом може бути, наприклад, процес, методика вимірювань, матеріал, речовина або вимірювальна система. У Міжнародному словнику термінів у законодавчій метрології OIML V 1:2013 [22] наведено таке означення: *верифікація засобів вимірювань* – це процедура оцінювання відповідності (крім оцінювання типу), що відображається нанесенням маркувального знака та/або виданням сертифіката про верифікацію. Згідно із ДСТУ ISO 10012:2005 [6] у процедурі верифікації засобів вимірювань передбачено порівнянням знайденої похибки $\Delta x_n, 1_x$ засобу вимірювань, який перевіряють, із максимальним допустимим значенням похибки $\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$. На основі цього порівняння приймають рішення про відповідність певного засобу вимірювань встановленим вимогам і можливість його використання для вимірювання.

У чинних в Україні НД для означення процедури встановлення відповідності ЗВТ використано пострадянський термін “*повідка*” [1, 8]. Згідно із Законом України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [1], *повідка* (англ. *verification*; рос. *поверка*) засобів вимірювальної техніки – сукупність операцій, що включає перевірку та маркування та/або видачу документа про повірку засобу вимірювальної техніки, які встановлюють і підтверджують, що зазначений засіб відповідає встановленим вимогам.

У цій роботі для означення процедури встановлення відповідності ЗВТ використано міжнародний термін “*верифікація*”, а саме: *верифікація ЗВТ* – це сукупність операцій щодо встановлення придатності ЗВТ до застосування на основі експериментального визначення його метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим нормам. Встановлення придатності ЗВТ до застосування відображається маркуванням та/або виданням сертифіката про верифікацію.

Відповідно до Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [1] верифікації підлягають засоби вимірювань, що перебувають у сфері законодавчо регульованої метрології, тобто законодавчо контрольовані засоби вимірювань. Згідно із ДСТУ OIML D 3:2008 [7] законодавчо контрольований ЗВТ – це ЗВТ, що відповідає встановленим вимогам, зокрема, законодавчо регульованим метрологічним вимогам. Верифікація засобів вимірювальної техніки, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології

та перебувають в експлуатації, здійснюється на добровільних засадах.

4.2. Визначення основної похибки ЗВТ, який перевіряють

4.2.1. Узагальнена методика визначення похибки ЗВТ. Основною операцією верифікації ЗВТ є визначення похибки $\Delta x_n, 1_x$ його показу $x_n, 1_x$. Згідно із OIML V 1:2013 [22] її знаходять як різницю між показом $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, та опорним значенням величини $x_{\text{оп}}, 1_x$, тобто $\Delta x_n = x_n - x_{\text{оп}}, 1_x$. У процедурі метрологічного підтвердження ЗВТ, як їх верифікації, так і калібрування, *опорне* значення величини $x_{\text{оп}}, 1_x$ є *прийнятим еталонним* значенням величини $x_{\text{ет}}, 1_x$, яке, за означенням VIM3 [3], використовується як основа для зіставлення зі значеннями величин того самого роду і має достатньо малу для цього аналізу невизначеність, тобто $x_{\text{оп}} = x_{\text{ет}}, 1_x$.

Отже, у процедурі верифікації ЗВТ його похибка $\Delta x_n, 1_x$ є *вимірюваною величиною* і її знаходять як *результат непрямих вимірювань* за формулою:

$$\Delta x_n = x_n - x_{\text{ет}}, 1_x. \quad (1)$$

Примітка 4.1 Еталонне значення величини $x_{\text{ет}}, 1_x$, яке використовують у формулі (1) для знаходження похибки $\Delta x_n, 1_x$ засобу вимірювань, який перевіряють, залежить від методу верифікації засобу вимірювань та виду вимірювання. Значення $x_{\text{ет}}, 1_x$ може бути результатом прямого чи непрямого вимірювання, результатом вимірювання за методом заміщення, виконання якого може здійснюватися за схемами X1-St1-St2-X2 чи St1-X-St2, тощо [12–14, 20, 21]. Загалом, значення $x_{\text{ет}}, 1_x$ є певною функцією ряду еталонних величин $y_{\text{ет}}, 1_y, z_{\text{ет}}, 1_z, \dots$, значення яких $y_{\text{ет}}, 1_y, z_{\text{ет}}, 1_z, \dots$ отримують у процедурі верифікації засобу вимірювань

$$x_{\text{ет}} = f(y_{\text{ет}}, 1_y, z_{\text{ет}}, 1_z, \dots), 1_x. \quad (2)$$

Моделна функція f представляє процедуру вимірювання та методику опрацювання отриманих результатів. Здебільшого це аналітичний вираз, але також може бути група таких виразів, які містять поправки та коригувальні коефіцієнти для корекції систематичних ефектів [13].

4.2.2. Способи здійснення верифікації засобів вимірювальної техніки. Найпростіший спосіб здійснення верифікації ЗВТ – проведення вимірювань із одноразовими спостереженнями і знаходження похибки $\Delta x_n, 1_x$ за формулою (1). Якщо похибка $\Delta x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, або похибка $\Delta x_{\text{ет}}, 1_x$ еталонного значення величини містять великі

випадкові складові $\Delta x_{n,g}, 1_x$ і $\Delta x_{em,g}, 1_x$, наприклад, як у цифрових вольтметрів чи омметрів, то для збільшення достовірності результатів верифікації виконують вимірювання із багаторазовими спостереженнями. У такому разі отримують ряд показів $x_{n,i}, i = 1, \dots, n$ засобу вимірювань, який перевіряють, і ряд відповідних еталонних значень величини $x_{em,i}, i = 1, \dots, n$, де n – кількість спостережень, однак процедури їх опрацювання різні.

Залежно від співвідношення систематичної $\Delta x_{n,c}, 1_x$ і випадкової $\Delta x_{n,g}, 1_x$ складових похибки $\Delta x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, від співвідношення систематичної $\Delta x_{em,c}, 1_x$ і випадкової $\Delta x_{em,g}, 1_x$ складових похибки $\Delta x_{em}, 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, а також від методу верифікації можливі різні узагальнені випадки здійснення вимірювань у процедурі верифікації (див. табл. 1).

Таблиця 1

Способи здійснення верифікації засобів вимірювальної техніки

Table 1

Methods of measuring instruments verification

№ з/п	Показ $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють		Еталонне (опорне) значення величини $x_{em}, 1_x$		Похибка показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють
1	$\Delta x_{n,g} \ll \Delta x_{n,c}, 1_x$	$x_n = const$	$\Delta x_{em,g} \ll \Delta x_{em,c}, 1_x$	$x_{em} = const$	$\Delta x_n = x_n - x_{em}, 1_x$
2	$\Delta x_{n,g} \ll \Delta x_{n,c}, 1_x$	$x_n = const$	$\Delta x_{em,g} \approx \Delta x_{em,c}, 1_x$	$x_{em,i}, i = 1, \dots, n$	$\Delta x_n = x_n - \bar{x}_{em}, 1_x$; $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$
3	$\Delta x_{n,g} \approx \Delta x_{n,c}, 1_x$	$x_{n,i}, i = 1, \dots, n$	$\Delta x_{em,g} \ll \Delta x_{em,c}, 1_x$	$x_{em} = const$	$\Delta x_{n,i} = x_{n,i} - x_{em}, i = 1, 2, \dots, n, 1_x$
4	$\Delta x_{n,g} \approx \Delta x_{n,c}, 1_x$	$x_{n,i}, i = 1, \dots, n$	$\Delta x_{em,g} \approx \Delta x_{em,c}, 1_x$	$x_{em,i}, i = 1, \dots, n$	$\Delta x_{n,i} = x_{n,i} - \bar{x}_{em}, 1_x$; $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$

1. За умови, що $\Delta x_{n,g} \ll \Delta x_{n,c}, 1_x$ і $\Delta x_{em,g} \ll \Delta x_{em,c}, 1_x$, для сталого показу $x_n = const$ ЗВТ, який перевіряють, отримують відповідне еталонне значення величини $x_{em} = const$ і знаходять одне значення його похибки $\Delta x_n = x_n - x_{em}, 1_x$. Наприклад, у процедурі верифікації міри електричного опору R_n використовують міст постійного струму як еталонний ЗВТ із несуттєвою випадковою складовою похибки [17]. У такому разі для знаходження дійсного значення опору міри $R_0, \text{Ом}$ здійснюють одне вимірювання мостом її опору $R_x, \text{Ом}$, а похибку міри $\Delta R_n, \text{Ом}$ знаходять як різницю між номінальним значенням опору $R_n, \text{Ом}$, міри опору і вимірним (дійсним) значенням $R_0, \text{Ом}$, тобто $\Delta R_n = R_n - R_0, \text{Ом}$.

2. За умови, що $\Delta x_{n,g} \ll \Delta x_{n,c}, 1_x$, а $\Delta x_{em,g} \approx \Delta x_{em,c}, 1_x$, для сталого показу $x_n = const$ ЗВТ, який перевіряють, отримують ряд еталонних значень величини $x_{em,i}, i = 1, \dots, n$. Обчислюють середнє значення отриманих значень $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$, яке приймають за опорне еталонне значення $x_{em} = \bar{x}_{em}, 1_x$, і знаходять одне значення похибки $\Delta x_n = x_n - \bar{x}_{em}, 1_x$

ЗВТ, який перевіряють. Наприклад, у процедурі верифікації міри електричного опору R_n використано цифровий омметр як еталонний ЗВТ, в якого істотна випадкова складова похибки [17]. В такому разі омметром здійснюють n вимірювань опору міри $R_x, \text{Ом}$, наприклад, $n=10$, і отримують n показів цифрового омметра $R_{om,i}, i = 1, \dots, n, \text{Ом}$. Тоді знаходять середнє значення одержаних показів омметра $\bar{R}_{om} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{om,i}, \text{Ом}$, що приймають як дійсне значення опору міри $R_0 = \bar{R}_{om}, \text{Ом}$. Похибку $\Delta R_n, \text{Ом}$, міри R_n , яку перевіряють, знаходять як різницю між номінальним значенням опору міри $R_n, \text{Ом}$, і вимірним (дійсним) значенням $R_0, \text{Ом}$, тобто $\Delta R_n = R_n - R_0 = R_n - \bar{R}_{om}, \text{Ом}$.

3. За умови, що $\Delta x_{n,g} \approx \Delta x_{n,c}, 1_x$, а $\Delta x_{em,g} \ll \Delta x_{em,c}, 1_x$, для сталого еталонного значення величини $x_{em} = const$ отримують ряд показів $x_{n,i}, i = 1, \dots, n$ ЗВТ, який перевіряють, і знаходять n можливих значень його похибки $\Delta x_{n,i} = x_{n,i} - x_{em}, i = 1, \dots, n, 1_x$. Наприклад, у процедурі верифікації цифрового омметра, в якого істотна випадкова складова похибки [23], як еталонний засіб вимірювання із несуттєвою випадковою складовою

похибки використовують еталонну міру опору R_{em} з номінальним значенням опору R_n , Ом. У такому разі омметром здійснюють n вимірювань опору еталонної міри опору [24], отримують n показів омметра $R_{om,i}, i=1, \dots, n$, Ом, і знаходять n значень похибки омметра $\Delta R_{om,i} = R_{om,i} - R_n, i=1, \dots, n$, Ом.

4. За умови, що $\Delta x_{n,6} \approx \Delta x_{n,c}, 1_x$ і $\Delta x_{em,6} \approx \Delta x_{em,c}, 1_x$, для певного показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, отримують ряд його значень $x_{n,i}, i=1, \dots, n$ і ряд відповідних еталонних значень величини $x_{em,i}, i=1, \dots, n$. Обчислюють середнє значення отриманих еталонних значень $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$, яке приймають як опорне еталонне значення $x_{em} = \bar{x}_{em}, 1_x$, і знаходять n можливих значень похибки $\Delta x_{n,i} = x_{n,i} - \bar{x}_{em}, i=1, \dots, n, 1_x$ показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють. Наприклад, для верифікації цифрового вольтметра постійного струму, в якого суттєва випадкова складова похибки, як еталонний ЗВТ використовують калібратор напруги, якому також притаманна суттєва випадкова складова похибки [24]. У такому разі для перевірки показу вольтметра $U_V, В$ n разів встановлюють відповідну напругу калібратора $U_{K,i}, i=1, \dots, n$, В, отримують n значень показу вольтметра $U_{V,i}, i=1, \dots, n$, В. Обчислюють середнє значення отриманих значень

напруги калібратора $\bar{U}_K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{K,i}$, В і знаходять n значень похибки показу вольтметра U_V , В: $\Delta U_{V,i,j} = U_{V,i} - \bar{U}_K, i=1, \dots, n$, В.

В усіх випадках за результат вимірювання приймають найбільшу за модулем похибку $|\Delta x_{n,i}|, i=1, \dots, n, 1_x$, за якою і встановлюють відповідність ЗВТ, який перевіряють, визначеним вимогам.

4.3. Встановлення відповідності ЗВТ за результатами його верифікації

4.3.1. Обчислення максимального допустимого значення похибки $\Delta x_{don}, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють. За результатами верифікації ЗВТ встановлюють відповідність його метрологічних характеристик нормованим значенням. Зокрема, встановлюють відповідність знайденої похибки $\Delta x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, максимальному допустимому (граничному) значенню $\Delta x_{don}, 1_x$.

Максимальне допустиме (граничне) значення похибки $\Delta x_{don}, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, знаходять із урахуванням його класу точності та інших метрологічних характеристик (границі вимірювання $x_k, 1_x$ і показу $x_n, 1_x$ вимірювального приладу, номінального значення міри $x_{mn}, 1_x$, номінального значення коефіцієнта перетворення вимірювального перетворювача k_{nn} тощо) згідно із ДСТУ OIML R 34:2014 [25] (див. табл. 2).

Таблиця 2

Максимально допустимі значення похибок основних типів засобів вимірювальної техніки

Table 2

Maximal permissible values of errors of the main types of measuring instruments

Форма вираження основної допустимої похибки	Форма вираження класу точності	Максимально допустима абсолютна похибка	Максимально допустима відносна похибка
Стала максимально допустима зведена похибка $\gamma_{don}, \%$	$\gamma_{don} = \pm \frac{\Delta x_{don}}{x_N} \cdot 100\% = \pm p, \% = \text{const}$	$\Delta x_{don} = \pm \frac{\gamma_{don} \cdot x_k}{100}, 1_x$	$\delta_{don} = \pm \gamma_{don} \cdot \frac{x_k}{x_{in}}, \%$
Стала максимально допустима відносна похибка $\delta_{don}, \%$	$\delta_{don} = \pm c, \% = \text{const}$	$\Delta x_{don} = \pm \frac{\delta_{don} \cdot x_n}{100}, 1_x$	$\delta_{don} = \pm \frac{ \Delta x_{don} }{x_n} \cdot 100\%$
Відносна похибка $\delta_{don}, \%$ збільшується зі зменшенням показу $x_n, 1_x$	c/d	$\Delta x_{don} = \pm \frac{d \cdot x_k + (c-d) \cdot x_n}{100}, 1_x$	$\delta_{don} = \pm \left[c + d \left(\frac{x_k}{x_n} - 1 \right) \right], \%$

Примітки: 1. $x_k, 1_x$ – верхня межа діапазону вимірювання приладу або діапазону зміни вхідної величини вимірювального перетворювача. 2. $x_n, 1_x$ – показ вимірювального приладу. 3. У формулах, пов'язаних зі зведеною похибкою γ_{don} , нормувальне значення x_N дорівнює значенню верхньої межі діапазону вимірювання вимірювального приладу $x_k, 1_x$.

4.3.2. Встановлення відповідності знайденої похибки $\Delta x_{n,1_x}$ ЗВТ, який перевіряють, максимальному допустимому (граничному) значенню $\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$. Насамперед, згідно із ISO/IEC Guide 98-3:2008 [12] та EA-4/02 M:2013 [13], обчислюють комбіновану стандартну непевність $u_c(\Delta x_n), 1_x$ знайденої похибки $\Delta x_n, 1_x$. Методика знаходження $u_c(\Delta x_n), 1_x$ залежить від методу верифікації ЗВТ і метрологічних характеристик використаних еталонних ЗВТ (див. нижче п. 4.4). Потім обчислюють розширену невизначеність (непевність) вимірювання похибки $U_p(\Delta x_n), 1_x$:

$$U_p(\Delta x_n) = u_c(\Delta x_n) \cdot k_p, 1_x, \quad (3)$$

де k_p – коефіцієнт охоплення (розширення), значення якого залежить від рівня довіри p (у процедурах верифікації та калібрування засобів вимірювань зазвичай $p=0,95$ [8, 13, 18]).

На основі нормованого максимального допустимого значення похибки $\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$ і знайденого експериментально значення похибки $\Delta x_n, 1_x$ показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, обчислюють нижню $\Delta x_{n,n}, 1_x$ і верхню $\Delta x_{n,s}, 1_x$ межі інтервалу непевності вимірюваної похибки $\Delta x_n, 1_x$, тобто $\{\Delta x_{n,n}; \Delta x_{n,s}\}, 1_x$:

$\Delta x_{n,n} = \Delta x_n - U_p(\Delta x_n), 1_x$; $\Delta x_{n,s} = \Delta x_n + U_p(\Delta x_n), 1_x$, (4)
де $\Delta x_n, 1_x$ – значення знайденої за формулою (1) похибки ЗВТ із урахуванням знака.

Рішення про *позитивний результат* верифікації засобу вимірювань приймають у тому разі, якщо інтервал непевності $\{\Delta x_{n,n}; \Delta x_{n,s}\}, 1_x$ вимірюваної похибки $\Delta x_n, 1_x$, повністю міститься всередині області допустимих значень похибки $\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$ [8, 26, 27]:

$$\begin{aligned} \Delta x_{n,n} &= \Delta x_n - U_p(\Delta x_n) \leq |\Delta x_{\text{доп}}|, 1_x; \\ \Delta x_{n,s} &= \Delta x_n + U_p(\Delta x_n) \leq |\Delta x_{\text{доп}}|, 1_x \end{aligned} \quad (5)$$

Тобто нижня межа інтервалу непевності $\Delta x_{n,n}, 1_x$ не менша від від'ємної межі допустимої похибки засобу вимірювань ($-\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$), а верхня межа цього інтервалу невизначеності $\Delta x_{n,s}, 1_x$ не перевищує додатної межі допустимої похибки засобу вимірювань ($+\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$).

Примітка 4.2. В окремих випадках, якщо розширена непевність $U_p(\Delta x_n), 1_x$ результату вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$ є нехтовно малою порівняно з максимальною допустимою похибкою ЗВТ $\Delta x_{\text{доп}}, 1_x$, наприклад, $U_p(\Delta x_n) < \frac{1}{3} \cdot |\Delta x_{\text{доп}}|, 1_x$ [18,

28], *позитивний результат* верифікації засобу вимірювань встановлюють за спрощеною умовою:

$$|\Delta x_n| \leq |\Delta x_{\text{доп}}|, 1_x. \quad (6)$$

4.4. Встановлення достовірності результатів верифікації засобів вимірювальної техніки

4.4.1. Аналіз модельних рівнянь верифікації засобів вимірювальної техніки. Повні модельні рівняння верифікації ЗВТ, а саме вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$ певного показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, загалом залежать від виду вимірювань (із одноразовими чи багаторазовими спостереженнями) та поправок на невилучені систематичні похибки (НСП) як показу $x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, так і еталонного значення величини $x_{\text{ем}}, 1_x$ [11, 13, 19]. Основні чотири їх типи, із урахуванням рівнянь, поданих у табл. 1, наведено у табл. 3.

У табл. 3 позначено: $\Delta x_{n, \text{кв}}$ – поправка на НСП квантування ЗВТ, який перевіряють, 1_x ; $\Delta x_{\text{ем}, o}$ – поправка на основну інструментальну НСП еталонного значення величини $x_{\text{ем}}, 1_x$; $\Delta x_{\text{ем}, \text{кв}}$ – поправка на НСП квантування еталонного значення величини, 1_x ; $\sum_{j=1}^m \Delta x_{\text{ем}, \text{доп}, j}$ – сума поправок на додаткові інструментальні НСП еталонного значення величини $x_{\text{ем}}, 1_x$, до яких входять температурна похибка $\Delta x_{\text{ем}, \theta}, 1_x$, похибка часової нестабільності $\Delta x_{\text{ем}, \text{нест}}, 1_x$, магнітна похибка $\Delta x_{\text{ем}, H}, 1_x$, частотна похибка $\Delta x_{\text{ем}, f}, 1_x$ тощо (m – кількість додаткових інструментальних НСП).

Примітка 4.3. Значення основної інструментальної похибки $\Delta x_{\text{ем}, o}$ еталонного значення величини $x_{\text{ем}}, 1_x$ залежить від виду рівняння її вимірювання $x_{\text{ем}} = f(y_{\text{ем}}, z_{\text{ем}}, \dots), 1_x$ (2) у процедурі верифікації засобу вимірювання і, загалом, може містити кілька складових:

$$\Delta x_{\text{ем}, o} = C_1 \cdot \Delta y_{\text{ем}} + C_2 \cdot \Delta z_{\text{ем}} + \dots, 1_x, \quad (7)$$

де $\Delta y_{\text{ем}}, 1_y, \Delta z_{\text{ем}}, 1_z, \dots$ – абсолютні похибки результатів вимірювань $y_{\text{ем}}, z_{\text{ем}}, \dots$; $C_1, C_2, \dots$ – коефіцієнти вагомості цих похибок, що знаходять як часткові похідні моделі функції f щодо аргументів, тобто $C_1 = \frac{\partial f}{\partial y}, C_2 = \frac{\partial f}{\partial z}, \dots$ [12, 13].

Примітка 4.4. Поправки на всі НСП, які входять у рівняння, наведені у табл. 3, мають нульові значення, а складові комбінованої стандартної непевності $u_c(\Delta x_n), 1_x$ вимірюваної похибки $\Delta x_n, 1_x$, спричинені ними, обчислюють за типом В.

4.4.2. Обчислення комбінованої стандартної непевності вимірювання похибки засобу вимірювань. Комбіновану стандартну непевність $u_c(\Delta x_n)_{1_x}$ значення похибки $\Delta x_n, 1_x$ за умови відсутності кореляції між її складовими знаходять за

формулами, наведеними у табл. 4. Ці формули отримані на основі аналізу модельних рівнянь похибки $\Delta x_n, 1_x$ певного показу $x_n, 1_x$ засобу вимірювань, який перевіряють, поданих у табл. 3.

Таблиця 3

Основні типи модельних рівнянь верифікації засобів вимірювальної техніки

Table 3

Main types of model equations of the measuring instruments verification

№ з/п	Показ x_n ЗВТ, який перевіряють, та еталонне значення величини x_{em}		Типи модельних рівнянь верифікації засобів вимірювальної техніки
1	$x_n = const$	$x_{em} = const$	$\Delta x_n = (x_n + \Delta x_{n,кв}) - \left(x_{em} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j} \right), 1_x$
2	$x_n = const$	$x_{em,i}, i = 1, \dots, n$	$\Delta x_{n,i} = (x_n + \Delta x_{n,кв}) - \left(\bar{x}_{em} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j} \right), 1_x ;$ $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$
3	$x_{n,i}, i = 1, \dots, n$	$x_{em} = const$	$\Delta x_{n,i} = (x_{n,i} + \Delta x_{n,кв}) - \left(x_{em} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j} \right), 1_x$
4	$x_{n,i}, i = 1, \dots, n$	$x_{em,i}, i = 1, \dots, n$	$\Delta x_{n,i} = (x_{n,i} + \Delta x_{n,кв}) - \left(\bar{x}_{em} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j} \right), 1_x ;$ $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$

Таблиця 4

Комбіновані стандартні непевності похибок засобів вимірювальної техніки

Table 4

Combined standard uncertainties of the measurement instruments errors

№ з/п	Показ x_n ЗВТ, який перевіряють, та еталонне значення величини x_{em}		Типи рівнянь комбінованих стандартних непевностей похибок засобів вимірювальної техніки
1	$x_n = const$	$x_{em} = const$	$u_c(\Delta x_n) = \sqrt{u_B^2(x_n)_{\Delta x_{n,кв}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$
2	$x_n = const$	$x_{em,i}, i = 1, \dots, n$	$u_c(\Delta x_{n,i}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_{em}) + u_B^2(x_n)_{\Delta x_{n,кв}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$
3	$x_{n,i}, i = 1, \dots, n$	$x_{em} = const$	$u_c(\Delta x_{n,i}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_n) + u_B^2(x_{n,i})_{\Delta x_{n,кв}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$
4	$x_{n,i}, i = 1, \dots, n$	$x_{em,i}, i = 1, \dots, n$	$u_c(\Delta x_{n,i}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_n) + u_A^2(\bar{x}_{em}) + u_B^2(x_{n,i})_{\Delta x_{n,кв}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$

У табл. 4 позначено: $u_A(\bar{x}_n)$ – стандартна непевність за типом А, спричинена розсіюванням показів $x_{n,i}, i=1,2,...,n$ ЗВТ, який перевіряють, 1_x ; $u_A(\bar{x}_{em})$ – стандартна непевність за типом А, спричинена розсіюванням еталонних значень величини $x_{em,i}, i=1,2,...,n, 1_x$; $u_B(x_n)_{\Delta x_{n,кв}}$ – стандартна непевність за типом В, спричинена НСП квантування $\Delta x_{n,кв}, 1_x$ засобу вимірювань, який перевіряють, 1_x ; $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,о}}$ – стандартна непевність за типом В, спричинена основною інструментальною НСП $\Delta x_{em,о}, 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$; $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,кв}}$ – стандартна непевність за типом В, спричинена НСП квантування $\Delta x_{em,кв}, 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$; $\sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,доп, j}}$ – сума квадратів стандартних непевностей за типом В, спричинених додатковими інструментальними НСП $\Delta x_{em,доп, j}, j=1,...,m$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$ (m – кількість складових).

Залежно від умов проведення верифікації в суму квадратів стандартних непевностей за типом В, спричинених додатковими інструментальними НСП еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, можуть входити такі складові:

$$\sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,доп, j}} = u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,о}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,нест}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,н}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,ф}} + ... \quad (8)$$

де $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,о}}$ – стандартна непевність за типом В еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, спричинена його додатковою температурною НСП $\Delta x_{em,о}, 1_x$; $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,нест}}$ – стандартна непевність за типом В еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, спричинена додатковою НСП $\Delta x_{em,нест}, 1_x$ часової нестабільності у період між черговими перевірками чи калібруванням; $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,н}}$ – стандартна непевність за типом В еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, спричинена його додатковою магнітною НСП $\Delta x_{em,н}, 1_x$; $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,ф}}$ – стандартна непевність за типом В еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, спричинена його додатковою частотною НСП $\Delta x_{em,ф}, 1_x$.

Примітка 4.5. Стандартну непевність за типом В $u_B(x_{em})_{\Delta x_{em,о}}$, спричинену основною

інструментальною НСП $\Delta x_{em,о}, 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, обчислюють з урахуванням модельного рівняння вимірювання $x_{em} = f(y_{em}, z_{em}, ...), 1_x$ (2) у процедурі верифікації засобу вимірювання та основної інструментальної похибки $\Delta x_{em,о}, 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$ (7).

Примітка 4.6. Наявність у формулах, наведених у табл. 4, стандартних непевностей за типом А $u_A(\bar{x}_n), 1_x$ та $u_A(\bar{x}_{em}), 1_x$ зумовлене наявністю випадкових складових похибок $\Delta x_{n,о}, 1_x$ та $\Delta x_{em,о}, 1_x$, що призводить до розсіювання показів $x_{n,i}, i=1,2,...,n$ засобу вимірювань, який перевіряють, та еталонних значень величини $x_{em,i}, i=1,2,...,n$.

Комбіновані стандартні непевності за типом А $u_A(\bar{x}_n), 1_x$ та $u_A(\bar{x}_{em}), 1_x$ за умови нормального розподілу показів $x_{n,i}, i=1,2,...,n$ та $x_{em,i}, i=1,2,...,n$ обчислюють як оцінки стандартних відхилень середніх значень $s(\bar{x}_n)$ та $s(\bar{x}_{em})$ за формулами [11–13]:

$$u_A(\bar{x}_n) = s(\bar{x}_n) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{n,i} - \bar{x}_n)^2}, 1_x; \quad (9)$$

$$u_A(\bar{x}_{em}) = s(\bar{x}_{em}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{em,i} - \bar{x}_{em})^2}, 1_x, \quad (10)$$

де $\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{n,i}, 1_x$ та $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$ – відповідні середні значення показів $x_{n,i}, i=1,2,...,n$ ЗВТ, який перевіряють, та еталонних значень величини $x_{em,i}, i=1,2,...,n$.

Примітка 4.7. Загалом, у рівняння вимірювання (модельні рівняння), які наведені у табл. 3, можуть входити ще й інші складові. Наприклад, поправки на додаткові похибки, спричинені впливом засобу вимірювань, який перевіряють, на параметри еталонного значення величини $x_{st}, 1_x$, впливом кліматичних умов та нестабільності напруги живлення на покази засобів вимірювань тощо. Їхні значення встановлюють залежно від типів засобу вимірювань та умов проведення верифікації тощо. У такому разі комбінована стандартна непевність $u_c(\Delta x_n), 1_x$ значення похибки $\Delta x_n, 1_x$ засобу вимірювань, який перевіряють, у формулах, наведених у табл. 4, матиме додаткові складові.

4.4.3. Встановлення умови достовірності результатів верифікації ЗВТ. Як вже зазначено вище в п.4.2.1, у процедурі верифікації засобу вимірювань його похибка $\Delta x_n, 1_x$ є вимірюваною

величиною. Отже, для отримання достовірних результатів верифікації засобу вимірювань комбінована стандартна непевність $u_c(\Delta x_n)_{1_x}$ вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$, обчислена за формулами, наведеними у табл. 4, не повинна перевищувати допустимого значення $u(\Delta x_n)_{\text{дон}}, 1_x$:

$$u_c(\Delta x_n) \leq u(\Delta x_n)_{\text{дон}}, 1_x. \quad (11)$$

Зауважимо, що сьогодні у чинних НД немає однозначного трактування методики встановлення допустимого значення стандартної непевності $u(\Delta x_n)_{\text{дон}}, 1_x$ вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$, що зазначено у п. 2 цієї статті. Як випливає із аналізу чинних НД [6–10, 12, 13, 26–28], в яких регламентовано вимоги щодо оцінювання точності результатів вимірювань у процедурах верифікації та калібрування ЗВТ, допустиме значення стандартної непевності $u(\Delta x_n)_{\text{дон}}, 1_x$ вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$ ЗВТ, який перевіряють, доцільно знаходити за таким співвідношенням:

$$u(\Delta x_n)_{\text{дон}} \leq \frac{1}{\alpha} \cdot u_B(x_n)_{\text{дон}}, 1_x, \quad (12)$$

де $u_B(x_n)_{\text{дон}}, 1_x$ – допустиме значення стандартної непевності за типом В показу засобу вимірювань $x_n, 1_x$, який перевіряють; α – сталий коефіцієнт, який встановлюють у чинних НД на конкретні засоби вимірювань, його можливі значення: $\alpha = 2; 2,5; 3; 4; 5; 10$ [20]. Зазвичай $\alpha = 3; 4; 5$.

Допустиме значення стандартної непевності за типом В $u_B(x_n)_{\text{дон}}, 1_x$ показу засобу вимірювань $u_B(x_n)_{\text{дон}}, 1_x$, який перевіряють, за умови рівномірного (рівномірного) закону розподілу густини $p(\Delta x_n)$ значень абсолютної похибки засобу вимірювань $\Delta x_n, 1_x$ у межах її максимальної допустимої похибки $\pm \Delta x_{\text{дон}}, 1_x$ (див. табл. 2) знаходять за формулою [12, 13]:

$$u_B(x_n)_{\text{дон}} = \frac{\Delta x_{\text{дон}}}{\sqrt{3}}, 1_x. \quad (13)$$

В окремих випадках, як, наприклад, у EURAMET Calibration Guide [18, 28], умови (8) і (9) забезпечення достовірності результатів верифікації засобу вимірювань встановлюють за відносними комбінованими стандартними непевностями:

$$u_{c,rel}(\Delta x_n) \leq u_{rel}(\Delta x_n)_{\text{дон}}, \% \quad (14)$$

$$\text{і } u_{rel}(\Delta x_n)_{\text{дон}} \leq \frac{1}{\alpha} \cdot u_{B,rel}(x_n)_{\text{дон}}, \%$$

де $u_{c,rel}(\Delta x_n), \%$ – відносна комбінована стандартна непевність вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$, яку знаходять за формулою:

$$u_{c,rel}(\Delta x_n) = \frac{u_c(\Delta x_n)}{|\Delta x_n|} \cdot 100, \%; \quad (15)$$

$u_{B,rel}(x_n)_{\text{дон}}, \%$ – допустиме значення відносної стандартної непевності за типом В показу засобу вимірювань $\Delta x_n, 1_x$, яке знаходять за формулою:

$$u_{B,rel}(x_n)_{\text{дон}} = \frac{\delta_{x,\text{дон}}}{\sqrt{3}}, \%, \quad (16)$$

де $\delta_{x,\text{дон}}, \%$ – відносна максимальна допустима похибка показу засобу вимірювань $\Delta x_n, 1_x$, яка дорівнює:

$$\delta_{x,perm} = \pm \frac{\Delta x_{\text{дон}}}{x_n} \cdot 100 \%. \quad (17)$$

5. Аналіз процедури калібрування засобів вимірювальної техніки

5.1. Означення та сфери застосування процедури калібрування засобів вимірювальної техніки

Калібрування (англ. *calibration*) ЗВТ – сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі цю інформацію використовують, щоб встановити співвідношення для отримання результату вимірювання із показу [1, 3, 10].

Процедура калібрування ЗВТ полягає у порівнянні показу $x_c, 1_x$ ЗВТ, який калібрують, із еталонним значенням величини $x_{\text{ет}}, 1_x$ [6]. Результатом вимірювання у процедурі калібрування є дійсне (виміряне) значення величини $x_o, 1_x$, що відповідає показу $x_c, 1_x$.

Як видно із наведеного вище означення, у процедурі калібрування ЗВТ необхідно встановити [10, 13, 27]:

- дійсне (виміряне) значення величини $x_o, 1_x$, що відповідає показу $x_c, 1_x$ ЗВТ, який калібрують – дійсне (виміряне) значення міри $x_{\text{мд}}, 1_x$, дійсне (виміряне) значення коефіцієнта перетворення вимірювального перетворювача $k_{\text{нд}}$ тощо;
- розширену непевність $U_p(x_o), 1_x$ дійсного (виміряного) значення величини $x_o, 1_x$ із зазначенням рівня довіри p і, відповідно, коефіцієнта розширення (охоплення) k_p .

Отже, у процедурі калібрування об'єктом калібрування є показ $x_c, 1_x$ ЗВТ як реакція на тестовий

сигнал [27], а *вимірюваною величиною* – дійсне (виміряне) значення величини $x_{\theta,1_x}$, що відповідає показу $x_{c,1_x}$ ЗВТ, який калібрують. Отримані значення $x_{\theta,1_x}$ та $U_p(x_{\theta},1_x)$ вказують у сертифікаті про калібрування ЗВТ. Надалі в разі застосування каліброваного ЗВТ у процедурі вимірювання деякої величини $Y,1_y$ отримані значення $x_{\theta,1_x}$ та $U_p(x_{\theta},1_x)$ використовують для знаходження результату вимірювання $y,1_y$ величини $Y,1_y$ та розширеної непевності $U_p(y),1_y$.

Калібрування ЗВТ та оформлення його результатів здійснюють відповідно до національних стандартів, гармонізованих із відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, які приймають міжнародні та регіональні організації з метрології. Відповідно до ст. 27 Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [1], калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології.

Підготування експерименту калібрування ЗВТ, вибір методу калібрування та еталонних ЗВТ і проведення необхідних вимірювань здійснюють аналогічно, як і у процедурі верифікації ЗВТ. Основна відмінність між процедурами верифікації та калібрування ЗВТ полягає у відмінностях методик опрацювання результатів проведених експериментів і поданні результатів верифікації та калібрування.

5.2. Встановлення результатів калібрування засобів вимірювальної техніки та їх достовірності

5.2.1. Аналіз модельного рівняння процедури калібрування засобів вимірювальної техніки. За аналогією із рівнянням (1), узагальнене рівняння знаходження дійсного (виміряного) значення величини $x_{\theta,1_x}$, що відповідає показу $x_{c,1_x}$ ЗВТ, який калібрують, виражають формулою:

$$x_{\theta} = x_{em} + \Delta x_c + \Delta x_{\theta,1_x}, \quad (18)$$

де Δx_c – поправка на похибку показу $x_{c,1_x}$ засобу вимірювань, який калібрують, 1_x ; Δx_{θ} – сумарна поправка на невилучені систематичні похибки.

Поправку $\Delta x_{c,1_x}$ на похибку показу $x_{c,1_x}$ засобу вимірювань, який калібрують, знаходять за результатами калібрування як різницю між заданим показом $x_{c,1_x}$ й отриманим еталонним значенням величини $x_{em,1_x}$, тобто

$$\Delta x_c = x_c - x_{em,1_x}. \quad (19)$$

Примітка 5.1. Як значення показу $x_{c,1_x}$ засобу вимірювань, який калібрують, так і отримане еталонне значення величини $x_{em,1_x}$, загалом залежать від виду вимірювань (із одноразовими чи багаторазовими спостереженнями), що відображено у табл. 5.

Повні рівняння вимірювання (модельні рівняння) знаходження дійсного (виміряного) значення величини $x_{\theta,1_x}$, що відповідає показу $x_{c,1_x}$ ЗВТ, який калібрують, загалом, залежать від методу калібрування щодо встановлення еталонного значення величини $x_{em,1_x}$ та виду вимірювань – із одноразовими чи багаторазовими спостереженнями. Основні чотири їх типи із урахуванням (19), а також рівнянь, поданих у табл. 3, і поправок на невилучені систематичні похибки, наведено у табл. 5.

Приклад 5.1. Для калібрування гирі m_c із номінальним значенням маси $m_n = 10$ кг класу M1 OIML методом порівняння з еталонною мірою m_{em} класу F2 OIML з тим самим номінальним значенням маси $m_{em,n}$, кг, використано компаратор маси, метрологічні характеристики якого попередньо встановлено (приклад S2, EA-4/02-M:2013 [13]).

Модельне рівняння знаходження дійсного (виміряного) значення маси m_{θ} , кг, гирі m_c , яку калібрують, у такому разі записується як:

$$m_{\theta} = m_{em,\theta} + m_k + \Delta m_{em,нест} + \Delta m_{k,екс} + \Delta m_{k,пов}, \text{ г},$$

де $m_{em,\theta}$ – дійсне значення маси еталонної міри, отримане зі свідцтва про її калібрування, яке дорівнює $m_{em,\theta} = 10000,150$ г із розширеною непевністю $U_p(m_{em,\theta}) = 45$ мг, коефіцієнт охоплення (розширення) $k_p = 2$; m_k – показ компаратора, тобто виміряна різниця між масою гирі, яку калібрують, і масою еталонної міри $m_k = m_{\theta} - m_{em,\theta}$, г, яка дорівнює 0,200 г з оцінкою стандартного відхилення $s(m_k) = 25$ мг; $\Delta m_{em,нест}$ – поправка на похибку від дрейфу нестабільності (дрейфу) значення маси еталонної міри з часу останнього калібрування з граничним відхиленням $\Delta m_{em,нест} = \pm 15$ мг; $\Delta m_{k,екс}$ – поправка до показу компаратора на ексцентриситет навантаження і магнітні ефекти із граничним відхиленням $\Delta m_{k,екс,гр} = \pm 0,010$ г; $\Delta m_{k,пов}$ – поправка до показу компаратора на виштовхування повітря із граничним відхиленням $\Delta m_{k,пов,гр} = \pm 0,010$ г.

Отже, дійсне (виміряне) значення маси m_{θ} , кг, гирі m_c , яку калібрують, відповідно до (18) дорівнює сумі дійсного значення маси еталонної міри $m_{em,\theta}$, г, і показу компаратора m_k , г, тобто $m_{\theta} = m_{em,\theta} + m_k = 10000,150 + 0,200 = 10000,350$ г.

Поправки $\Delta m_{em,нест}$, г, $\Delta m_{k,екс}$, г, і $\Delta m_{k,пов}$, г, мають нульові значення (див. примітку 4.4), а складові комбінованої стандартної непевності $u_c(m_{\theta})$, г, дійсного (виміряного) значення маси m_{θ} , кг, гирі, яку калібрують, спричинені ними, обчислюють за типом В з урахуванням їхніх граничних відхилень.

Таблиця 5

Основні типи модельних рівнянь калібрування засобів вимірювальної техніки

Table 5

Main types of model equations of the measuring instruments calibration

№ з/п	Показ x_c ЗВТ, який калібрують, та еталонне значення величини x_{em}	Типи модельних рівнянь калібрування засобів вимірювальної техніки
1	$x_c = const$ $x_{em} = const$	$x_0 = x_{em} + \Delta x_c + \Delta x_{c,кв} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j}, 1_x$; $\Delta x_c = x_c - x_{em}, 1_x$
2	$x_c = const$ $x_{em,i}, i = 1, 2, \dots, n$	$x_0 = \bar{x}_{em} + \Delta x_c + \Delta x_{c,кв} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j}, 1_x$; $\Delta x_c = x_c - \bar{x}_{em}, 1_x$; $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$
3	$x_{c,i}, i = 1, 2, \dots, n$ $x_{em} = const$	$x_0 = x_{em} + \Delta x_c + \Delta x_{c,кв} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j}, 1_x$; $\Delta x_c = \bar{x}_c - x_{em}, 1_x$; $\bar{x}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{c,i}, 1_x$
4	$x_{c,i}, i = 1, 2, \dots, n$ $x_{em,i}, i = 1, 2, \dots, n$	$x_0 = \bar{x}_{em} + \Delta x_c + \Delta x_{c,кв} + \Delta x_{em,o} + \Delta x_{em,кв} + \sum_{j=1}^m \Delta x_{em,доод,j}, 1_x$; $\Delta x_c = \bar{x}_c - \bar{x}_{em}, 1_x$; $\bar{x}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{c,i}, 1_x$; $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$

Примітка. Позначення усіх величин, які наведено у табл. 5 (поправки на НСП тощо), а також методики їх знаходження відповідають величинам, поданим у табл. 3.

Таблиця 6

Комбіновані стандартні непевності дійсного (вимірюного) значення величини $x_0, 1_x$

Table 6

Combined standard uncertainties of actual (measured) quantity value $x_{act}, 1_x$

№ з/п	Показ x_c ЗВТ, який калібрують, та еталонне значення величини x_{em}	Типи рівнянь комбінованих стандартних непевностей дійсного (вимірюного) значення величини $x_0, 1_x$
1	$x_n = const$ $x_{em} = const$	$u_c(x_0) = \sqrt{u_B^2(\Delta x_c) + u_B^2(x_c)_{\Delta x_{c,кв}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{st})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$
2	$x_n = const$ $x_{em,i}, i = 1, 2, \dots, n$	$u_c(x_0) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_{em}) + u_B^2(\Delta x_c) + u_B^2(x_c)_{\Delta x_{c,кв}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$
3	$x_{n,i}, i = 1, 2, \dots, n$ $x_{em} = const$	$u_c(x_0) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_c) + u_B^2(\Delta x_c) + u_B^2(x_{c,i})_{\Delta x_{c,кв}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$
4	$x_{n,i}, i = 1, 2, \dots, n$ $x_{em,i}, i = 1, 2, \dots, n$	$u_c(x_0) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_c) + u_A^2(\bar{x}_{em}) + u_B^2(\Delta x_c) + u_B^2(x_{c,i})_{\Delta x_{c,кв}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,o}} + u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,кв}} + \sum_{j=1}^m u_B^2(x_{em,i})_{\Delta x_{em,доод,j}}}, 1_x$

Примітка. Вказана у табл. 6 $u_B(\Delta x_c), 1_x$ – це стандартна непевність за типом В вимірюної похибки $\Delta x_c, 1_x$ засобу вимірювань, який калібрують. Позначення усіх інших величини, наведених у табл. 6, а також методики їх знаходження відповідають величинам, поданим у табл. 4.

5.2.2. Обчислення комбінованої стандартної непевності результатів калібрування засобів виміральної техніки. Методика опрацювання результатів калібрування ЗВТ залежить від методу калібрування (див. вище п. 3) та виду вимірювання відповідного параметра ЗВТ $x_{\theta}, 1_x$ [13, 19, 20]. На підставі аналізу модельних рівнянь знаходження дійсного (вимірюваного) значення величини $x_{\theta}, 1_x$, що відповідає показу $x_c, 1_x$ ЗВТ, який калібрують, які наведені у табл. 5, комбіновану стандартну непевність $u_c(x_{\theta}), 1_x$ значення $x_{\theta}, 1_x$ за умови відсутності кореляції між її складовими знаходять за формулами, поданими у табл. 6.

5.2.3. Встановлення умови достовірності результатів калібрування ЗВТ. Як вже зазначено вище у п. 5.1, результатом вимірювання у процедурі калібрування ЗВТ є дійсне (виміряне) значення величини $x_{\theta}, 1_x$, що відповідає показу ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують. Отже, для отримання достовірних результатів калібрування засобу вимірювань комбінована стандартна непевність $u_c(x_{\theta}), 1_x$ значення $x_{\theta}, 1_x$, обчислена за формулами, наведеними у табл. 6, не повинна перевищувати допустимого значення $u(\Delta x_{\theta})_{\text{дон}}, 1_x$, тобто $u_c(\Delta x_{\theta}) \leq u(\Delta x_{\theta})_{\text{дон}}, 1_x$.

За аналогією із аналізом достовірності результатів верифікації ЗВТ (див. п. 4.4.3) і на підставі аналізу чинних НД [6–10, 13, 26–28], в яких регламентовано вимоги щодо оцінювання точності результатів вимірювань у процедурах верифікації та калібрування ЗВТ, допустиме значення стандартної непевності $u(x_{\theta})_{\text{дон}}, 1_x$ результату вимірювання $x_{\theta}, 1_x$, що відповідає показу ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують, доцільно знаходити за таким співвідношенням:

$$u(\Delta x_{\theta})_{\text{дон}} \leq \frac{1}{\alpha} \cdot u_B(x_c)_{\text{дон}}, 1_x, \quad (20)$$

де $u_B(x_c)_{\text{дон}}, 1_x$ – допустиме значення стандартної непевності за типом В показу засобу вимірювань величини $x_{\theta}, 1_x$, що відповідає показу ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують; α – сталий коефіцієнт, який встановлено у чинних НД на конкретні засоби вимірювань. Зазвичай у процедурі калібрування засобів вимірювань приймають $\alpha \geq 3$ [13, 18, 20].

Допустиме значення стандартної непевності за типом В $u_B(x_c)_{\text{дон}}, 1_x$ показу ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують, за умови рівномірного (рівномовірного) закону розподілу густини $p(\Delta x_c)$ значень абсолютної похибки засобу вимірювань $\Delta x_c, 1_x$ у межах її максимальної допустимої похибки $\pm \Delta x_{\text{дон}}, 1_x$ (див. табл. 2) за аналогією із (13) знаходять як $u_B(x_c)_{\text{дон}} = \Delta x_{\text{дон}} / \sqrt{3}, 1_x$ [12, 13].

5.2.4. Встановлення відповідності та подання результатів калібрування засобів виміральної техніки. Результат калібрування ЗВТ $x_{c,\theta}, 1_x$ подають із наведенням дійсного (вимірюваного) значення $x_{\theta}, 1_x$ відповідного параметра ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують, розширеної непевності $U_p(x_{\theta}), 1_x$ дійсного значення $x_{\theta}, 1_x$, рівня довіри p та коефіцієнта розширення (охоплення) k_p .

Підтвердженням того, що отримане в результаті калібрування дійсне (виміряне) значення $x_{\theta}, 1_x$ параметра ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують, міститься у межах вказаних максимально допустимих похибок $\pm \Delta x_{\text{дон}}, 1_x$, є виконання умови [13, 18, 26–28]:

$$x_n - \left[|\Delta x_{\text{дон}}| - U_p(x_{\theta}) \right] \leq x_{\theta} \leq x_n + \left[|\Delta x_{\text{дон}}| - U_p(x_{\theta}) \right] x_{\theta}, 1_x, \quad (21)$$

де $x_n, 1_x$ – номінальне значення параметра, який калібрують.

Розширену непевність $U_p(x_{\theta}), 1_x$ дійсного значення $x_{\theta}, 1_x$ параметра засобу вимірювань $x_c, 1_x$, який калібрують, знаходять за формулою:

$$U_p(x_{\theta}) = k_p \cdot u_c(x_{\theta}), 1_x, \quad (22)$$

де $u_c(x_{\theta})$ – комбінована стандартна непевність значення $x_{\theta}, 1_x$, обчислена за формулами, наведеними у табл. 6.

Наприклад, підтвердженням того, що отримане в результаті калібрування гирі m_c дійсне (виміряне) значення її маси m_{θ} , г (див. приклад 6.1) міститься в межах вказаної максимально допустимої похибки $\pm \Delta m_{\text{дон}}$, г, є виконання умови [18]:

$$m_n - \left[|\Delta m_{\text{дон}}| - U_p(m_{\theta}) \right] \leq m_{\theta} \leq m_n + \left[|\Delta m_{\text{дон}}| + U_p(m_{\theta}) \right], \text{ г},$$

де m_n – номінальне значення маси гирі m_c , г; $U_p(m_{\theta})$ – розширена непевність дійсного значення маси гирі m_c , г.

6. Встановлення вимог щодо точності еталонного значення величини у процедурах верифікації та калібрування засобів виміральної техніки

Вимоги щодо точності еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$ у процедурах верифікації та калібрування ЗВТ практично ідентичні. Із аналізу модельних рівнянь верифікації ЗВТ, наведених у табл. 3, видно, що стандартна непевність $u(\Delta x_n), 1_x$ вимірювання похибки $\Delta x_n, 1_x$ показу $x_{ind}, 1_x$ ЗВТ,

який перевіряють, практично визначається значенням стандартної непевності $u(\Delta x_{em}), 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, тобто $u(\Delta x_n) \equiv u(x_{em}), 1_x$. Аналогічний висновок випливає із аналізу модельних рівнянь калібрування ЗВТ, наведених у табл. 5. Стандартна непевність $u(x_o), 1_x$ вимірювання дійсного значення величини $x_o, 1_x$, що відповідає показу ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують, також практично визначається значенням стандартної непевності $u(\Delta x_{em}), 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, тобто $u(x_o) \equiv u(x_{em}), 1_x$.

Точність вимірювання чи відтворення еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, своєю чергою, залежить від методу вимірювання величини $x_{em}, 1_x$ та метрологічних характеристик використаних еталонних ЗВТ. Як видно із формул, наведених у табл. 4 і табл. 6, стандартна непевність $u(\Delta x_{em}), 1_x$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$, зазвичай, має декілька складових. Отже, в обох процедурах практично завжди знаходять комбіновану стандартну непевність $u_c(x_{em}), 1_x$ або відносну комбіновану стандартну непевність $u_{c,rel}(x_{em}), \%$ еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$.

На підставі наведеного вище аналізу основну вимогу щодо точності вимірювання чи відтворення еталонного значення величини $x_{em}, 1_x$ у процедурі верифікації ЗВТ з урахуванням рівнянь (9), (11), (13) і (17) можна виразити такими нерівностями:

$$u_c(x_{em}) < u(x_{em})_{don} = \frac{1}{\alpha} \cdot u_B(x_n)_{don}, 1_x;$$

$$u_{c,rel}(x_{em}) < u_{rel}(x_{em})_{don} = \frac{1}{\alpha} \cdot u_{B,rel}(x_n)_{don}, \%, \quad (23)$$

а у процедурі калібрування ЗВТ з урахуванням рівнянь (13) і (20) –

$$u_c(x_{em}) < u(x_{em})_{don} = \frac{1}{\alpha} \cdot u_B(x_c)_{don}, 1_x;$$

$$u_{c,rel}(x_{em}) < u_{rel}(x_{em})_{don} = \frac{1}{\alpha} \cdot u_{B,rel}(x_c)_{don}, \%, \quad (24)$$

де $u_{B,rel}(x_n)_{don}, \%$ – допустиме значення відносної стандартної непевності за типом В показу ЗВТ $x_c, 1_x$, яке знаходять, використовуючи рівняння (16) і (17).

Результати й обговорення

1. Процедури верифікації та калібрування ЗВТ мають як спільні риси, так і певні відмінності. Процедура експериментальної частини метроло-

гічного підтвердження засобів вимірювань, як їх верифікації, так і калібрування, полягає у порівнянні показу $x_n, 1_x$ засобу вимірювань, який перевіряють, чи показу $x_c, 1_x$ засобу вимірювань, який калібрують, із еталонним значенням величини $x_{em}, 1_x$. Отже, в обох процедурах є спільний об'єкт дослідження: у процедурі верифікації – це показ засобу вимірювань $x_n, 1_x$, який перевіряють; у процедурі калібрування – показ засобу вимірювань $x_c, 1_x$, який калібрують.

2. Вимірюваною величиною у процедурі верифікації ЗВТ є похибка $\Delta x_n, 1_x$ показу $x_n, 1_x$, який перевіряють, її знаходять як результат непрямих (опосередкованих) вимірювань. Оцінкою точності результату верифікації ЗВТ є комбінована стандартна непевність $u_c(\Delta x_n), 1_x$ отриманого значення похибки $\Delta x_n, 1_x$.

3. Вимірюваною величиною у процедурі калібрування ЗВТ є дійсне значення величини $x_o, 1_x$, що відповідає показу $x_c, 1_x$, який калібрують. Оцінкою точності результату калібрування є розширена непевність отриманого дійсного (вимірюного) значення величини $U_p(x_o), 1_x$ за рівня довіри p . Одержані значення $x_o, 1_x$ та $U_p(x_o), 1_x$ за рівня довіри p вказують у сертифікаті про калібрування ЗВТ.

4. У разі вимірювань із багаторазовими спостереженнями у процедурі верифікації покази $x_{n,i}, i=1, \dots, n$ ЗВТ, який перевіряють, ніколи не усереднюють, але відповідні еталонні значення величини $x_{em,i}, i=1, \dots, n$ завжди усереднюють і

$$\text{обчислюють середнє значення } \bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x.$$

Відповідно, знаходять n можливих значень похибки $\Delta x_{n,i} = x_{n,i} - \bar{x}_{em}, 1_x$ показу засобу вимірювань $x_n, 1_x$, який перевіряють.

У процедурі калібрування як покази $x_{c,i}, i=1, \dots, n$ ЗВТ, який калібрують, так і еталонні значення величини $x_{em,i}, i=1, \dots, n$ завжди усереднюють. Обчислюють відповідні середні значення $\bar{x}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{c,i}, 1_x$ та $\bar{x}_{em} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{em,i}, 1_x$ і знаходять одне дійсне значення $x_o, 1_x$ показу ЗВТ $x_c, 1_x$, який калібрують: $x_o = \bar{x}_{em} + \Delta x_o, 1_x$, де $\Delta x_o = \bar{x}_c - \bar{x}_{em}, 1_x$.

Висновки

1. Ключовим завданням метрології є забезпечення “єдності вимірювань”, а саме стану вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених

одиницях, а характеристики похибок або непевності вимірювань відомі з певною ймовірністю і не виходять за встановлені межі.

2. Для досягнення єдності вимірювань у сфері метрологічного підтвердження ЗВТ необхідно добитися єдності міжнародних нормативних документів щодо процедур проведення верифікації та калібрування ЗВТ, а також методик оцінювання точності й достовірності отриманих результатів верифікації та калібрування ЗВТ.

Конфлікт інтересів

Не існує будь-якого фінансового або іншого можливого конфлікту, що стосується цієї роботи.

Список літератури

[1] Закон України про метрологію та метрологічну діяльність, № 1314-VII від 05.06.2014, Київ, Україна: Парлам. вид-во, 2014.

[2] OIML D 1:2012 (E), Considerations for a Law on Metrology: International document, 2012.

[3] OIML V 2:2012 (E/F), International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms, VIM3, 2012.

[4] Sustainable Development Knowledge Platform. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015 [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/>

[5] Закон України про технічні регламенти та оцінку відповідності, № 124-VIII від 15.01.2015, Київ, Україна: Парлам. вид-во, 2015.

[6] ДСТУ ISO 10012:2005 (ISO 10012:2003 IDT). Системи управління вимірюваннями: Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання, Київ, Україна, 2007.

[7] ДСТУ OIML D 3:2008 (OIML D 3:1979, IDT). Метрологія: Відповідність засобів вимірювальної техніки законодавчим вимогам, Київ, Україна, 2011.

[8] Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів. Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України № 193 від 08.02.2016, Київ, Україна, 2016.

[9] Технічний регламент законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Затверджено Постановою Кабінету Міністрів України № 94 від 13.01.2016, Київ, Україна, 2016.

[10] ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 (ISO/IEC 17025:2017 IDT). Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій, Київ, Україна, 2017.

[11] В. Мотало, "Аналіз методик верифікації та калібрування засобів вимірювальної техніки", у *Мат. Всеукр. наук. техн. конф. "Technical Using of Measurement – 2019"*, Славське, Україна, 2019, с. 18–20.

[12] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement, Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008.

[13] EA-4/02 M: 2013, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration: European Accreditation, 2013.

[14] М. Дорожовець, *Опрацювання результатів*

вимірювань, Львів, Україна: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2007.

[15] О. Малецька, М. Москаленко, "Калібровка СИТ: оценка погрешности и неопределенности измерений", *Системи обробки інформації*, вип. 3 (110), с. 75–79, 2013.

[16] Р. Триш, М. Москаленко, О. Малецька, "Методики калибровки: разработки и проблемы". *Системи обробки інформації*, вип. 1 (99), с. 45–48, 2012.

[17] ДСТУ ГОСТ 8.237:2008 (ГОСТ 8.237:2003, IDT). Метрологія. Міри електричного опору однозначні: Методи повірки, Київ, Україна, 2008.

[18] ДСТУ OIML R 111-1:2008 (OIML R 111-1:2004, IDT). Метрологія. Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 і M3. Частина 1: Загальні технічні вимоги та методи випробування, Київ, Україна, 2010.

[19] И. Захаров, С. Водотыка, Е. Шевченко, "Методы, модели и бюджеты оценивания неопределенности измерений при проведении калибровок", *Измерительная техника*, № 4, с. 20–26, 2011.

[20] М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін., *Основи метрології та вимірювальної техніки: у двох томах, Т. 2. Вимірювальна техніка*; за ред. проф. Б. Стадника, Львів, Україна: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2005.

[21] В. Мотало, "Метрологічна перевірка резистивних подільників напруги методом вимірювання відношення опорів", *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 26, № 1, с. 244–252, 2016.

[22] OIML V 1:2013 (E/F), International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML), 2013.

[23] ДСТУ ГОСТ 8.366:2009. Омметри цифрові: Методи і засоби повірки, Київ, Україна, 2008.

[24] Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters: Calibration Guide EURAMET cg-15, Version 3.0, 2015.

[25] ДСТУ OIML R 34:2014 (OIML R 34:1979, IDT). Метрологія: Класи точності засобів вимірювальної техніки Київ, Україна, 2015.

[26] COOMET R/GM/21:2011, Use of concepts "error of measurement" and "uncertainty of measurement": General principles, 2011.

[27] OIML D 8 Edition 2004 (E), Measurement standards: Choice, recognition, use, conservation and documentation, International document, 2004.

[28] Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments: EURAMET Calibration Guide, no. 18, version 4.0, 2015.

References

[1] The Law of Ukraine on Metrology and Metrological Activity, no. 1314-VII dated of 05.06.2014, Kyiv, Ukraine: Parliament publishing house, 2014 (in Ukrainian).

[2] OIML D 1:2012 (E), Considerations for a Law on Metrology: International document, 2012.

[3] OIML V 2:2012 (E/F), International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms, VIM3, 2012.

[4] Sustainable Development Knowledge Platform. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015 [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/>

- [5] The Law of Ukraine on Technical Regulations and Conformity Assessment, No. 124-VIII dated of 15.01.2015, Kyiv, Ukraine: Parliament publishing house, 2015 (in Ukrainian).
- [6] ISO 10012:2003, Measurement Management Systems: Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment, 2003.
- [7] OIML D 3:1979, Legal qualification of measuring instruments: International document, 1979.
- [8] The procedure for verifying of the legally regulated measuring instruments which are in operation, and the registration of its results: Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine no. 193 dated of 08.02.2016, Kyiv, Ukraine, 2016 (in Ukrainian).
- [9] Technical regulation of the legally regulated measuring instruments: Approved by the decision of the Ukraine Cabinet Ministers, No. 94 dated of 13.01.2016, Kyiv, Ukraine, 2016 (in Ukrainian).
- [10] ISO/IEC 17025:2017, General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories, 2017.
- [11] V. Motalo, "Analysis of verification and calibration methodologies of measuring instruments", in *All-Ukrainian scientific and technical conference in the field of metrology "Technical Using of Measurement, 2019"*, Slavske, Ukraine, 2019, p. 18–20 (in Ukrainian).
- [12] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement, Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008.
- [13] EA-4/02 M: 2013, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration: European Accreditation, 2013.
- [14] M. Dorozhovets, *Processing of the measurement results*, Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Publ. House, 2007 (in Ukrainian).
- [15] O. Maletskaia, and M. Moskalenko, "Calibration of the Measuring Instruments: Estimation of the Error and Uncertainty of Measurements", *Information Processing Systems*, , iss. 3 (110), p. 75–79, 2013 (in Russian).
- [16] R. Trysch, M. Moskalenko, and O. Maletskaia, "Calibration Techniques: Developments and Problems", *Information Processing Systems*, iss. 1 (99), p. 45–48, 2012 (in Russian).
- [17] DSTU GOST 8.237:2008 (GOST 8.237:2003, IDT), Single-value electrical resistance measures: Verification procedure, Kyiv, Ukraine, 2009 (in Ukrainian).
- [18] OIML R 111-1, Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 Part 1: Metrological and technical requirements, 2004.
- [19] I. Zakharov, S. Vodotyka, and E. Shevchenko, "Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration", *Measurement Techniques*, No. 4, p. 20–26, 2011 (in Russian).
- [20] M. Dorozhovets, V. Motalo, B. Stadnyk, and others, *Fundamentals of Metrology and Measuring Technique in two volumes*, vol. 2: *Measuring Technique*; ed. by B. Stadnyk, Lviv, Ukraine: Lviv Polytechn. Publ. House, 2005 (in Ukrainian).
- [21] V. Motalo, "Verification of the resistive voltage dividers by resistance ratio measurement method", *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 26, No. 1, p. 244–252, 2016 (in Ukrainian).
- [22] OIML V 1:2013 (E/F), International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML), 2013.
- [23] DSYU GOST 8.366:2009. Digital ohmmeters: Methods and means for verification, Kyiv, Ukraine, 2008 (in Ukrainian).
- [24] Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters: Calibration Guide EURAMET cg-15, version 3.0, 2015.
- [25] OIML R 34:1979, Accuracy classes of measuring instruments: International recommendation, 1979.
- [26] COOMET R/GM/21:2011, Use of concepts "error of measurement" and "uncertainty of measurement": General principles, 2011 (in Russian).
- [27] OIML D 8 Edition 2004 (E), Measurement standards: Choice, recognition, use, conservation and documentation, International document, 2004.
- [28] Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments: EURAMET Calibration Guide, No. 18, version 4.0, 2015.