ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
2024р. Серія: Технічні науки Вип. 48
p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

152 МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.317.08 **doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310688**

© Діденко Н.В.*

АНАЛІЗУВАННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЦІЛЬОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Майже 25 років людство займається проблемами оцінювання невизначеності вимірювань. При застосуванні невизначеності не ставиться мета визначити справжнє значення під час вимірювання, наскільки це можливо. Тобто визнається, що інформація, отримана при вимірюванні, дозволяє лише приписати обґрунтований інтервал значень для вимірюваної величини, ґрунтуючись на припущенні, що при виконанні вимірювання не було зроблено помилок. Однак, навіть найточніші вимірювання не можуть зменшити цей інтервал до єдиного значення через кінцеву кількість деталей в описі вимірюваної величини. Інтервал може бути представлений через одне своє значення, що називається «виміряним значенням величини». Багато наукових праць присвячено за ці роки методам оцінювання невизначеності вимірювань. При цьому головний висновок – значення невизначеності залежить від застосованого метода її оцінки. На практиці застосування невизначеності не знайшло широкого застосування. Акредитовані калібрувальні та випробувальні лабораторії повинні вміти оцінювати невизначеність вимірювань. Тому вони вчаться методам оцінювання невизначеності, розробляють приклади. Пишуть в системі управління, що оцінка невизначеності результату вимірювань надається за вимогою замовника. Але ні замовник, ні виконавець не розуміють мети її застосування. Тому зараз прийшов час науковцям разом з практиками зайнятися питанням встановлення цільової невизначеності для вирішення конкретних вимірювальних завдань, таких як встановлення відповідності продукції визначеним вимогам, встановлення придатності засобів вимірювальної техніки після калібрування тощо. Таким чином, для застосування на практиці важливо вміти визначати значення цільової невизначеності – значення невизначеності для виміряного значення величини, при якому можна вважати виміряне значення достовірним для конкретного практичного застосування.
***Ключові слова**: вимірювана величина, інтервал значень, максимально допустима похибка, оцінювання невизначеності, цільова невизначеність.*

***N. Didenko. Analysis of target uncertainty assessment methods.** For almost 25 years, mankind has been dealing with the problems of estimating measurement uncertainty. When applying uncertainty, the goal is not to determine the true value during the measurement as far as possible. That is, it is recognized that the information obtained during the measurement allows only to assign a reasonable interval of values for the measured value, based on the assumption that no errors were made during the measurement. However, even the most accurate measurements cannot reduce this interval to a single value due to the finite number of details in the description of the measured value. An interval can be represented by a single value of its own, called the «measured value of the quantity». Over the years, many scientific works have been devoted to methods of estimating the uncertainty of measurements. At the same time, the main conclusion is that the value of uncertainty depends on the applied method of its assessment. In practice, the use of uncertainty has not been widely used. Accredited calibration and testing laboratories must be able to estimate*

* *канд. техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: 0000-0003-3318-438X, nataly.v.didenko@gmail.com*

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

measurement uncertainty. Therefore, they learn uncertainty assessment methods, develop examples. It is written in the management system that the evaluation of the uncertainty of the measurement result is provided at the request of the customer. But neither the customer nor the executor understands the purpose of its application. Therefore, now is the time for scientists, together with practitioners, to deal with the issue of establishing target uncertainty for solving specific measurement tasks, such as establishing compliance of products with specified requirements, establishing the suitability of measuring equipment after calibration, etc. Thus, for practical application, it is important to be able to determine the value of the target uncertainty - the value of uncertainty for the measured value of the quantity at which the measured value can be considered reliable for a specific practical application.
Key words: *measured quantity, interval of values, maximum permissible error, estimation of uncertainty, target uncertainty.*

Постановка проблеми. Згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] результати вимірювань можуть бути використані за умови, що їх результати відомі з відповідними характеристиками похибок або невизначеності вимірювань. Таким чином, оцінювання достовірності результату вимірювань можливо на підставі знання нормованого у методиці вимірювання значення похибки або невизначеності вимірювань. З похибками вимірювань проблем немає. Вони нормуються у методиках вимірювань як максимально допустимі похибки або приписані максимальні похибки.

Таким чином, у методиці вимірювань також повинно бути про нормоване максимально допустиме значення невизначеності вимірювань, як цільова невизначеність. В статті наведений огляд можливих методів встановлення значення цільової невизначеності в залежності від наявного завдання вимірювань.

До недоліків щодо нормування максимально допустимого значення невизначеності вимірювань (цільової невизначеності) відноситься те, що відсутність її на практиці не дозволяє встановити достовірність результату вимірювання, одержаного в різних акредитованих випробувальних лабораторіях. Тому факт акредитації лабораторії та вміння її фахівців розраховувати невизначеність проведених вимірювань не доводить достовірність одержаного результату вимірювання. Це приводить до неможливості довести відповідність об’єкта оцінювання встановленим критеріям відповідності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних публікацій [2-7] надає можливість зробити висновок, що проблема встановлення цільової невизначеності ще не розглядається науковцями як актуальна. Враховуючи необхідність та доцільність встановлення цільової невизначеності на практиці для вирішення проблем встановлення відповідності продукції у випробувальних лабораторіях, прийняття продукції замовником виробника та забезпечення достовірності результатів аналізу як в промислових, так і медичних, екологічних лабораторіях, можна зробити висновок про значну актуальність проведення досліджень у цьому напряму.

Мета статті – на підставі проведеного огляду можливих методів оцінювання цільової невизначеності визначитись які методи можливо застосовувати в залежності від наявного вимірювального завдання.

Виклад основного матеріалу. За міжнародним словником з метрології [8] невизначеність вимірювання, як одна з робочих характеристик методик вимірювання, є невід’ємним параметром, який пов'язаний з результатом вимірювання і який характеризує розкид значень, які могли б бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині.

Цей розкид значень формується біля результату вимірювань. Одержання достовірного результату вимірювань пов’язано з вибраної методикою вимірювання у відповідності з поставленим завданням щодо проведення вимірювань. Методика вимірювань може бути міжнародним, регіональним або національним стандартом, або може бути прописана в іншій визнаній специфікації, що містить суттєву стислу інформацію про те, як виконувати діяльність лабораторії щодо проведення вимірювань. Методики вимірювань, розроблені та модифіковані лабораторією, можуть також використовуватися.

Важливо, щоб ця методика надавала можливість одержати результат у відповідності з наявними робочими характеристиками вибраної методики. Такими робочими характеристиками

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

вибраної методики можуть бути діапазон вимірювань, точність, невизначеність результатів вимірювання, межа виявлення, межа кількісного визначення, вибірковість методу, лінійність, повторюваність або відтворюваність, стійкість до зовнішніх впливів або перехресної чутливості до впливу матриці зразка чи об'єкта випробування та зміщення вимірювання. Однак у разі виконання вимірювань акредитованими випробувальними лабораторіями для них обов'язково вміти оцінювати невизначеність вимірювань. А у разі наявності вимоги замовника або встановлення відповідності продукції слід ще й вміти визначити цільову невизначеність проведених вимірювань для одержання достовірної оцінки відповідності.

Вимірюваними величинами є величини, значення яких можна визначити за допомогою вимірювання. Вимірювання дають можливість отримати кількісне значення величини, виражене числом у відповідній одиниці вимірювання. При вимірюваннях зазвичай мають справу з однією з вимірюваних величин, званої також «вихідною величиною *Y*», яка через відношення:

$$Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_N)$$

пов'язана з вхідними величинами X_i $(i=1, 2,\ldots,N)$. Функція моделі f описує одночасно метод вимірювання та метод оцінювання. Вона показує, як значення вихідної величини Y отримується із значень вхідної величини X_i.

Вхідні величини – це ті впливні величини, які впливають на результат вимірювання. Зв'язок вимірюваної величини з впливними величинами є рівнянням вимірювань. І це є першою проблемою під час рішення завдання щодо оцінювання невизначеності вимірювань в лабораторії – як правильно скласти це рівняння. Невизначеність оцінюється саме для кожної впливної величини та в рівняння вимірювань невизначеність не входить.

Як відомо, невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінками вхідних величин, визначається за методом оцінки типу А або типу В. Метод А для оцінки стандартної невизначеності – це метод, при якому невизначеність вимірювання оцінюється за допомогою статистичного аналізу ряду спостережень. В цьому випадку стандартна невизначеність вимірювання є експериментальним стандартним відхиленням середнього значення. Для достовірного визначення невизначеності методом А необхідно забезпечити умови повторюваності вимірювань. При цьому на змінність результатів вимірювань, виконаних за однією методикою, крім можливого відхилення між імовірно ідентичними зразками, можуть впливати багато різних факторів, у тому числі:

- оператор, який проводить вимірювання згідно з методикою;
- обладнання, яке використовується;
- калібрування обладнання, тобто забезпечення його відповідності встановленим до нього технічних, а також метрологічних характеристик;
- параметри зовнішньої середовища (температура, вологість, забруднення повітря тощо, які встановлені в методиці);
- інтервал часу між повторними вимірюваннями (між незалежними спостереженнями).

Метод В для оцінки стандартної невизначеності вимірювання – це метод, при якому невизначеність вимірювання оцінюється іншими способами, ніж статистичний аналіз ряду спостережень. В цьому випадку оцінка ґрунтується на інших технічних, наукових і метрологічних знаннях. Однак доцільність їх застосування повинна бути визначена та врахована.

Оцінене значення розширеної невизначеності треба порівняти з нормованим значенням цільової невизначеності, що встановлена значенням верхня межа і вибрана на підставі використання передбачуваних результатів вимірювання.

Взагалі результати вимірювань є корисними лише за умови, що невизначеність вимірювань є достовірною та достатньо малою для виконання конкретного завдання. Цільова невизначеність – це максимально допустима невизначеність, визначена для певної мети вимірювання.

Визначення цільової невизначеності безпосередньо пов'язано з вимірювальним завданням та застосованим методом вимірювання.

При оцінці відповідності цільова невизначеність повинна бути настільки малою, щоб було можливим виявити невідповідність вимогам, які захищають відповідні інтереси (наприклад, щодо охорони здоров'я або ефективності виробництва). Занадто велика цільова невизначеність не забезпечить адекватного захисту, тоді як надто мала цільова невизначеність може призвести до надмірних витрат на вимірювання.

Настанова Eurachem/CITAC «Встановлення та застосування цільової невизначеності у хімічних вимірюваннях» [9] рекомендує визначати межі цільової невизначеність для оцінки відповідності.

Можна навести такий приклад впливу невизначеності вимірювань на прийняття рішень, наведений Eurachem/CITAC.

Фермер Містер Рейс планує продавати свої апельсини виробникові соків. Виробник перевіряє апельсини на залишки пестициду тіабендазолу та на показник Брікса (який є мірою солодкості соку). Виробник приймає лише апельсини, в яких залишки тіабендазолу менше 1 мг·кг$^{-1}$, а солодкість за шкалою Брікса перевищує 55 °Вх. Він також платить більше, якщо показник Брікса перевищує 65 °Вх.

Містер Рейс замовив дослідження апельсинів у акредитованій Лабораторії С, знаючи, що виробник також перевіряє апельсини у своїй лабораторії. Містер Рейс був задоволений результатами Лабораторії С, хоча дослідження залишків пестициду коштувало дорого.

Виробник прийняв апельсини, але заплатив менше, ніж очікувалось. Порівнявши результати обох лабораторій, з'ясувалося, що, хоча результати були метрологічно сумісні, вони призвели до різних рішень щодо ціни апельсинів.

Результати вимірювань:

Лабораторія С:

тіабендазол: (0,592 ± 0,019) мг·кг$^{-1}$ (k = 2; 95 %)

показник Брікса: (70 ± 25) °Вх (k = 2; 95 %)

Лабораторія виробника соків:

тіабендазол: (0,51 ± 0,20) мг·кг$^{-1}$ (k = 2; 95 %)

показник Брікса: (61,2 ± 1,1) °Вх (k = 2; 95 %)

Результат вимірювання вмісту тіабендазолу в Лабораторії С має надзвичайно малу невизначеність, що збільшило витрати на вимірювання. Водночас невизначеність визначення показника Брікса була занадто великою, що зробило рішення про відповідність менш надійним.

Результати вимірювань є корисними, лише якщо розрахована в лабораторії невизначеність вимірювань не перевищує встановлене її максимально допустиме значення (тобто цільову невизначеність). Навіть якщо замовник або регуляторний орган не встановлюють цільову невизначеність, лабораторія повинна визначити її для оцінки придатності результатів.

Настанова Eurachem/CITAC рекомендує визначати цільову невизначеність за різними показниками якості вимірювання. Інформація для визначення цільової невизначеність подається на рисунку.

Однак на практиці їх застосування викликає різні проблеми. Тому треба шукати інші методи визначення цільової невизначеності.

Наприклад, є вже розроблені міжнародні стандарти, які визначають процедуру домовленості між виробником та замовником прийняття продукції на підставі визначеної невизначеності вимірювань. При цьому встановлюється методика оцінювання невизначеності вимірювань.

Встановлено значення цільової невизначеності під час калібрування еталонів для повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, яка повинна бути не більше 1/3 від похибки засобів, які повіряються.

Можна запропонувати у разі реалізації методу прямих вимірювань розрахунок цільової невизначеності через значення інструментальної похибки, тобто максимально допустимої (основної та у разі необхідності, додаткової) похибки застосованого засобу вимірювальної техніки. При цьому враховується, що похибки засобу вимірювальної техніки визначаються при довірчій ймовірності 0,997, а розширена невизначеність – 0,95.

Цільова розширена невизначеність за цим методом розраховується за формулою (1):

$$U_ц = \frac{2 \cdot \Delta}{3}, \quad (1)$$

де Δ – абсолютна похибка;

$U_ц$ – цільова розширена невизначеність вимірювань параметру.

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

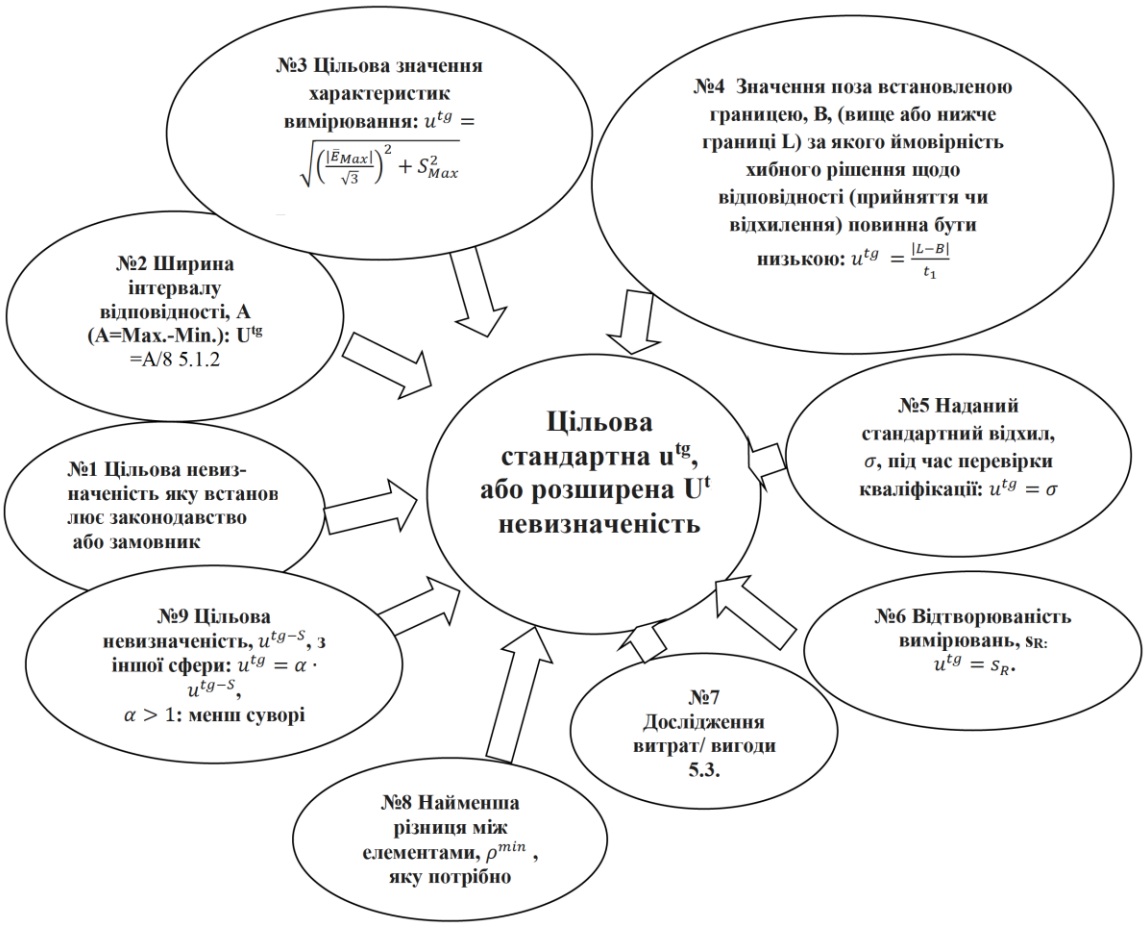

Рисунок – Підходи до визначення цільової невизначеності

Цільову розширену невизначеність вимірювань можна також визначити через похибку вимірювань, встановлену в методиці вимірювань, аналогічно формулі (1) у разі встановлення в методиці вимірювань значення максимальної допустимої похибки. Або прирівняти значення похибки при довірчій ймовірності 0,95 за методикою вимірювань до цільової невизначеності.

За ISO 5725-1 [10] та іншими його частинами на підставі визначення оцінки повторюваності, відтворюваності та правильності, та із застосування ISO 21748 [11] також можна визначити цільову невизначеність.

Висновки

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок щодо доцільності визначення цільової невизначеності для кожного вимірюваного завдання. Обмеження оцінки невизначеності тільки визначенням дефінітивної (власної) невизначеності, яка є складовою невизначеності вимірювань, що є результатом обмеженої деталізації у визначенні вимірюваної величини, не надає практичного значення застосування невизначеності на практики.

Перелік використаних джерел:

1. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. Відомості Верховної Ради України. 2014. № 30. Ст. 1008.
2. Захаров І. П. Порівняльний аналіз характеристики точності вимірювань: монографія. Харків : Оберіг, 2019. 100 с.
3. Трембовецька Р. В., Гальченко В. Я., Тичков В. В. Встановлення та оцінка невизначеності результату вимірювання лінійного розміру безконтактним методом. *Вісник Черкаського*

державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. № 1. С. 25-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchdtu_2017_1_5.

4. Zakharov I., Neyezhmakov P., Botsiura O. Verification of the indicating measuring instruments taking into account their instrumental measurement uncertainty. *Measurement Science Review*. 2017. Vol. 17. Iss. 6. Pp. 269-272. DOI: https://doi.org/10.1515/msr-2017-0033.
5. Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters / Zakharov I., Semenikhin V., Zakharov O., Shevchenko S. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 2. С. 22-27. DOI: https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2023.286713.
6. Zakharov I., Neyezhmakov P., Botsiura O. Reduction of the bias of measurement uncertainty estimates with significant non-linearity of a model equation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1379. Pp. 1-5. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1379/1/012013.
7. Zakharov I., Botsiura O. Calculation of expanded uncertainty in measurements using the Kurtosis method when implementing a Bayesian approach. *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62(4). Pp. 327-331. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-019-01625-x.
8. ISO/IEC Guide 99:2007. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). International Organization for Standardization, 2007. 92 p.
9. Eurachem/CITAC Guide: Setting and using target uncertainty in chemical measurement / ed. by R. Bettencourt da Silva, A. Williams. 1-st ed. 2015. 24 p.
10. ДСТУ ISO 5725-1-2005. Точність (правильність та прицезійність) методів та результатів вимірювань. Частина 1. Основні положення та визначення. [Чинний від 2006-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 21 с.
11. ISO 21748:2010. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. International Organization for Standardization, 2010. 38 p.

References:

1. Law of Ukraine. № 1314-VII, 15.06.2014. Pro metrolohiiu ta metrolohichnu diialnist [About metrology and metrological activity]. (Ukr.)
2. I.P. Zakharov, *Porivnialnyi analiz kharakterystyky tochnosti vymiriuvan: monohrafiia* [Comparative analysis of measurement accuracy characteristics: monograph]. Kharkiv, Ukraine: Oberih, Publ., 2019. (Ukr.)
3. R.V. Trembovetska, V.Ya. Halchenko, and V.V. Tychkov, «Vstanovlennia ta otsinka nevyznachenosti rezultatu vymiriuvannia liniinoho rozmiru bezkontaktnym metodom» [«Determination and evaluation of the uncertainty of the result of linear dimension measuring by contactless method»], *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Bulletin of Cherkasy State Technological University. Series: Technical sciences*, № 1, pp. 25-32, 2017. (Ukr.)
4. I. Zakharov, P. Neyezhmakov, and O. Botsiura, «Verification of the indicating measuring instruments taking into account their instrumental measurement uncertainty», *Measurement Science Review*, vol. 17, iss. 6, pp. 269-272, 2017. **doi: 10.1515/msr-2017-0033**.
5. I. Zakharov, V. Semenikhin, O. Zakharov, and S. Shevchenko, «Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters», *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal – Ukrainian Metrological Journal*, № 2, pp. 22-27, 2023. **doi: 10.24027/2306-7039.2.2023.286713**.
6. I. Zakharov, P. Neyezhmakov, and O. Botsiura, «Reduction of the bias of measurement uncertainty estimates with significant non-linearity of a model equation», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1379, pp. 1-5, 2019. **doi: 10.1088/1742-6596/1379/1/012013**.
7. I. Zakharov, and O. Botsiura, «Calculation of expanded uncertainty in measurements using the Kurtosis method when implementing a Bayesian approach», *Measurement Techniques*, vol. 62(4), pp. 327-331, 2019. **doi: 10.1007/s11018-019-01625-x**.
8. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, ISO/IEC Guide 99:2007, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2007.
9. R. Bettencourt da Silva, and A. Williams, Eds. *Eurachem/CITAC Guide: Setting and using target uncertainty in chemical measurement*. 2015.

10. *Tochnist (pravylnist ta prytseziinist) metodiv ta rezultativ vymiriuvan. Chastyna 1. Osnovni polozhennia ta vyznachennia* [Accuracy (correctness and accuracy) of measurement methods and results. Part 1. Basic provisions and definitions], State standart ISO 5725-1-2005, 2006.
11. *Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation*, ISO 21748:2010, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.

Стаття надійшла 08.02.2024
Стаття прийнята 03.03.2024