

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ПОВТОРНИХ КАЛІБРУВАНЬ ЕТАЛОНІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Є. Володарський, доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,

І. Потоцький, начальник науково-технічного відділу загальної та законодавчої метрології, ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

У статті запропоновано новий підхід до встановлення необхідності проведення повторних (періодичних) калібрувань еталонів та засобів вимірювальної техніки як складової забезпечення метрологічної простежуваності результатів вимірювань. Метод передбачає використання контрольних карт Шухарта спільно з відомим інструментом статистичної обробки даних – ковзних (рухомих) середніх. Розглянуто приклади застосування ковзних середніх різного типу для вирішення поставленої задачі.

The article proposes a new approach to establishing the necessity of periodic calibrations of standards and measuring instruments as a component of the measurement results metrological traceability. The method provides the use of Shewhart control charts with a known tool of statistical data processing – moving averages. Examples of using moving averages of different types are considered for solving the problem.

Набуття чинності з 1 січня 2016 року нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] та перехід до калібрування еталонів та засобів вимірювальної техніки (далі – ЗВТ) відповідно до визначення, наведеного у [2], стало черговим значним кроком на шляху інтеграції України у європейський та світовий економічний простір, оскільки дало можливість отримувати простежувані, зіставні та визнані результати вимірювань і випробувань. Втім, необхідність проведення калібрування у новому сенсі призвела до виникнення значної кількості питань у фахівців-метрологів. Одне з них, а саме питання встановлення (визначення) міжкалібрувальних інтервалів еталонів та ЗВТ розглянемо у цій статті.

Згідно з [3] важливим аспектом підтримання спроможності лабораторії отримувати простежувані та надійні результати вимірювань є визначення максимального періоду, який має пройти між двома періодичними калібруваннями еталонів і ЗВТ. Як відомо,

забезпечення простежуваності результатів вимірювання є ключовою складовою, необхідною для забезпечення довіри ринку до результатів калібрувань, випробувань чи вимірювань, про що сказано, наприклад, у документі [4].

До набуття чинності [1] питань стосовно часу наступних калібрувань не виникало, оскільки форма свідоцтва про калібрування ЗВТ передбачала наявність інформації щодо терміну дії кожного свідоцтва про калібрування, а робочі еталони на той час повірялись з видачею відповідного свідоцтва про перевірку із зазначенням розряду еталона. На сьогодні, такий підхід є абсолютно неприйнятним, він суперечить базовим підходам та філософії, закладеним у чинне законодавство, яким віднесено калібрування до добровільної сфери. Власник (користувач) самостійно встановлює, коли і до якої організації звертатись з метою проведення калібрування ЗВТ, а за результатами калібрування – чи є достатньою невизначеність результатів вимірювання, одержаних з використанням його ЗВТ, для досягнення поставлених цілей і, як наслідок, сам несе всю повноту відповідальності за прийняті рішення. Щоправда, слід зазначити, що 5.10.4.4 [5] допускає наявність у свідоцтві про калібрування рекомендацій про періодичність проведення наступного калібрування ЗВТ за згоди заявника робіт.

Далі розглянемо питання калібрування еталонів, що застосовують для калібрування еталонів меншої точності або ж ЗВТ. Відповідно до [4] "хорошою практикою" є калібрування еталонів та ЗВТ національними метрологічними інститутами, підписантами угоди СІРМ МРА [6], або калібрувальними лабораторіями, акредитованими національним органом з акредитації (в Україні – Національне агентство з акредитації України), який є підписантом угоди ІЛАС МРА [7], або регіональних угод, які визнаються ІЛАС. Як відомо, акредитація калібрувальних лабораторій проводиться на відповідність вимогам [5]. Стосовно інтервалів між калібруваннями пунктом 5.5.8 [5] встановлено: "Коли це можна практично здійснити, все устатковання, що перебуває під контролем лабораторії і потребує калібрування, повинно бути помарковано, закодовано або яким-небудь іншим чином ідентифіковано (позначено статус калібрування, зокрема дату проведення останнього калібрування і дату та критерії необхідності проведення повторного калібрування)". У англійському тексті стандарту ISO 17025 [8] словосполучення "дату та критерії необхідності проведення повторного калібрування" написано так: "the date or expiration criteria when recalibration is due" – дату **або** критерій визначення необхідності повторного калібрування. Тобто, калібрувальна лабораторія повинна або на власний розсуд встановити чіткі міжкалібрувальні періоди для свого обладнання і їх дотримуватись, або ж розробити (впровадити) певні критерії, за якими визначати потребу у проведенні повторних калібрувань.

На перший погляд, ситуація з калібруванням еталонів, які використовують для повірки законодавчо регульованих ЗВТ, дещо інша. Очевидно, що такі еталони знаходяться на перетині добровільної та законодавчо регульованої сфер метрології – з одного боку еталони підлягають виключно калібруванню (див. визначення терміну "еталон", наведене у [1]), з іншого, вони застосовуються під час повірки для встановлення відповідності ЗВТ законодавчо встановленим вимогам до них. Нормативно-правовим актом [9] встановлено, що простежуваність еталонів повинна бути документально підтверджена, а самі еталони повинні бути калібровані з дотриманням міжкалібрувальних інтервалів. Національним стандартом [10] щодо обладнання, яке використовується для повірки ЗВТ, передбачено, що свідоцтва про калібрування еталонів повинні містити терміни їх чинності (тобто, міжкалібрувальні інтервали). Але якими мають бути ці міжкалібрувальні інтервали?

Частково відповідь на це питання міститься у 2.1 того ж [10], згідно з яким, еталони повинні калібруватись щорічно, якщо не передбачено інше. Зазначений національний стандарт, а також [11] встановлюють вимоги до еталонів та іншого обладнання, які використовуються для повірки законодавчо регульованих ЗВТ.

Звичайно, наявність жорсткої вимоги щодо повторного калібрування еталонів для повірки ЗВТ є правильною, але ж технічні особливості, умови та інтенсивність використання еталонів можуть сильно відрізнятись і, у такому випадку, говорити про щорічне калібрування усіх без винятку еталонів є занадто спрощеною моделлю. Не дарма [10] передбачає обґрунтоване встановлення інших інтервалів між калібруваннями еталонів.

Постає цілком слушне запитання: "Як калібрувальній лабораторії або власнику встановити обґрунтовані міжкалібрувальні інтервали для своїх еталонів чи ЗВТ?", "Як довести потребу у збільшенні/зменшенні міжкалібрувальних інтервалів еталонів, що застосовуються для повірки законодавчо регульованих ЗВТ?" тощо.

Поглянемо на використання каліброваного еталона (ситуація з каліброваним ЗВТ є аналогічною), як на процес (процесний підхід, зокрема, регламентовано стандартами серії ISO 9000).

Досить цікавим та визнаним інструментом контролю стану і стабільності того чи іншого процесу є використання контрольних карт Шухарта, запропонованих доктором Уолтером Шухартом у 1924 році. Контрольні карти Шухарта – це графічний інструмент, який відображає зміну параметрів процесу з використанням статистичних принципів на основі вибірково отриманих даних через приблизно однакові інтервали часу (див. [12]).

На сьогодні, контрольні карти Шухарта широко використовуються у процесах контролю параметрів виробленої продукції та налагодження технологічних процесів і мають багато різновидів та підходів до побудови (залежно від вхідних даних та поставлених цілей).

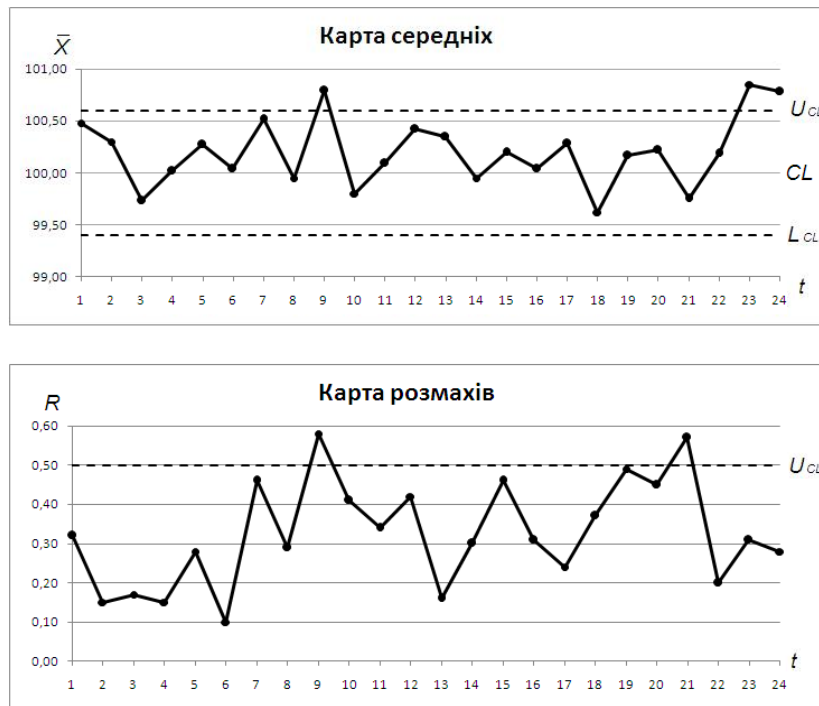


Рисунок 1 – Приклад карти середніх (\bar{X} -карти) та карти розмахів (R -карти) при вимірюванні мір з відомим номінальним значенням (100 мм) під час їх калібрування

На рисунку 1 представлені карта середніх (\bar{X}) та карта розмахів (R). Як бачимо, отримане на дев'ятому етапі середнє значення вимірювань перевищує встановлену верхню контрольну границю. Відповідно до [12] це є сигналом того, що можливо виникли систематичні причини втрати керованості процесу використання еталона. Втім, надалі процес повертається в контрольні границі і проходить стабільно протягом багатьох наступних етапів вимірювань. У чому може бути причина? Давайте тепер поглянемо на R -карту цього ж процесу, а саме – на дев'ятий етап. Бачимо, що на цьому етапі розмах також був значним і вийшов за верхню контрольну границю, тобто різниця між максимальним і мінімальним отриманими значеннями вимірювань була занадто великою. Можливо саме в цей проміжок часу на калібрування надійшло кілька неякісних мір довжини і саме це вплинуло на загальний результат, а можливо фахівець, який працює з даним еталонем, був відсутнім і його місце тимчасово зайняв робітник з недостатньо високою кваліфікацією. Причини можуть бути різні, і це є предметом окремого аналізу.

В статті пропонується розглянути деякі інструменти статистичної обробки даних, які дозволили б уникнути прийняття хибних рішень у результаті отримання таких "промахів" при вимірюваннях.

Одним з них є ковзне (рухоме) середнє. Ковзне середнє (далі – КС) може обчислюватись для довільних даних, але найчастіше його використовують для аналізу часових рядів для згладжування раптових коливань та визначення довготермінових трендів

або циклів, визначення впливу систематичних факторів, прогнозування. Ідея згладжування за допомогою КС полягає у тому, що при визначенні середнього зменшується вплив випадкових величин на загальний результат. Це забезпечується заміною первинних значень часового ряду середнім арифметичним значенням всередині обраного періоду часу. Потім інтервал зсувається далі на одне значення і розрахунок середнього повторюється. При цьому період визначення середнього ("вікно") залишається незмінним. Чим ширше період згладжування, тим більш плавною буде лінія КС, але згладжений ряд буде коротшим за первинний на $n - 1$ значення, де n – ширина періоду згладжування.

Повернемось до прикладу, розглянутого вище, і побудуємо КС на \bar{X} -карті та R -карті для $n = 3$ та $n = 6$. Результати розрахунків зображено на рисунку 2.

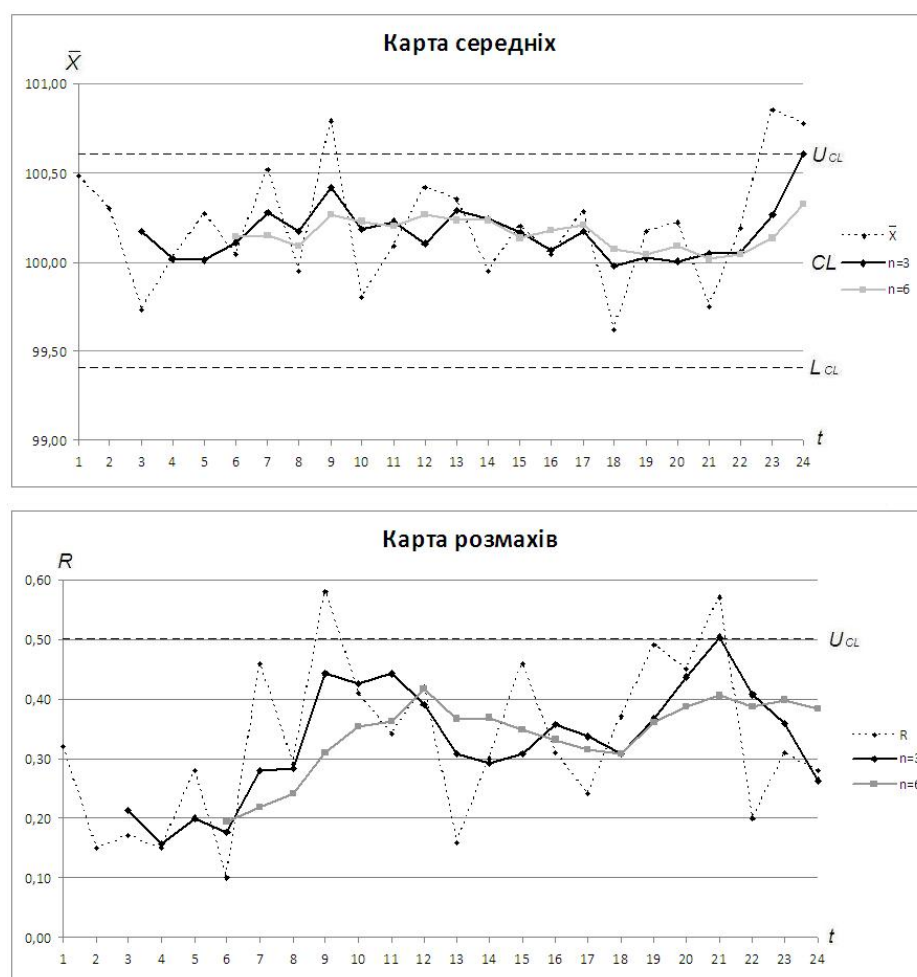


Рисунок 2 – Карти середніх та розмахів з нанесеними лініями КС для $n = 3$ та $n = 6$

Загалом, використання КС дозволило згладити випадковий вихід лінії середніх на \bar{X} -карті за верхню контрольну границю на дев'ятому етапі. Втім, якщо уважно подивитись на графіки, видно певне відставання (затримка) ліній КС від графіку результатів вимірювань (особливо цей недолік виражений при $n = 6$). Тобто даний метод не завжди дозволить вчасно відреагувати на дійсну втрату керованості процесу використання еталона. Свідомством цього

є декілька точок-викидів. Крім того, в залежності від ширини періоду n на графіку КС взагалі відсутні дані на перших етапах.

Одним із способів зменшити затримку графіка ковзних середніх є використання зважених КС. Найпоширенішими серед них є лінійно-зважені та експоненційно-зважені КС. В цілому, побудова лінійно-зважених КС аналогічна побудові простих КС, за винятком того, що кожному результату вимірювання присвоюється ваговий коефіцієнт α_i таким чином, щоб більш пізні результати вимірювань мали більшу вагу. Наприклад, для розрахунку значення лінійно-зваженої КС з періодом згладжування $n = 6$, останній результат вимірювання множиться на 6, попередній на 5 і т.д. Отримана сума добутків ділиться на 21 ($6+5+\dots+1$). Метод лінійно-зважених КС дозволяє зменшити відставання графіку КС від графіку результатів вимірювань, втім не вирішує проблеми обмеженості даних для аналізу шириною періоду згладжування.

Іншою модифікацією підходу зважених КС є метод експоненційно-зважених КС, який, крім іншого, є нечутливим до зміни закону розподілу результатів вимірювань (див. [13]). У загальному випадку формула побудови експоненційно-зваженого КС має наступний вигляд:

$$S_i = \alpha \cdot \bar{X}_i + (1 - \alpha) \cdot S_{i-1},$$

де S_i – поточне зважене значення кривої КС,

α – параметр (коефіцієнт) згладжування,

\bar{X}_i – поточне значення результату вимірювання,

S_{i-1} – попереднє зважене значення кривої КС.

Ваговий коефіцієнт α встановлює швидкість "старіння" попередніх даних – чим більше його значення, тим більшу вагу має останній результат вимірювання, і тим меншу попередні результати. Не існує якогось конкретного способу визначення оптимального значення коефіцієнта α . Критерієм визначення α могло б бути встановлення такого його значення, при якому вдалося б мінімізувати середнє квадратичне відхилення (СКВ) значень експоненційно-зваженого КС від результатів вимірювань. Втім, такий підхід не може бути використаний, оскільки ряд постійно доповнюється новими результатами вимірювань і виконати умову мінімального СКВ при незмінному α неможливо.

Хоча метод експоненційно-зваженого КС враховує усі попередні результати вимірювань (а не лише ті, що входять у "вікно"), значення коефіцієнта α можна пов'язати з шириною періоду згладжування наступним чином:

$$\alpha = \frac{2}{n+1},$$

де n – період згладжування.

Зазначений підхід до визначення α є особливо цікавим при використанні комбінацій різних видів КС на графіках \bar{X} та R -карт результатів вимірювань.

Проаналізуємо наші \bar{X} -карту та R -карту із застосуванням методу експоненційно-зважених КС для "вікон" $n = 3$ та $n = 6$, ($\alpha = 0,5$ та $0,3$, відповідно). У якості перших значень експоненційно-зважених КС приймаємо просте КС з відповідними періодами згладження. Зазначені графіки відображено на рисунку 3.

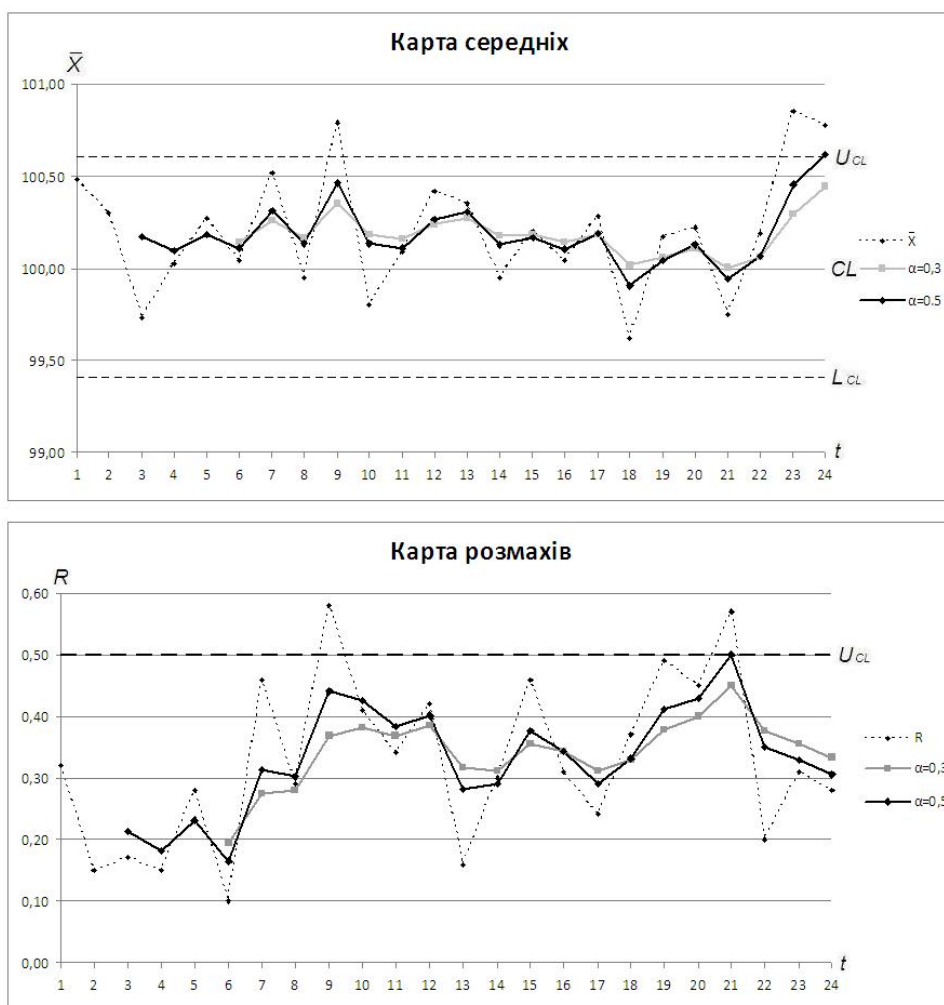


Рисунок 3 – Карти середніх та розмахів з нанесеними лініями експоненційно-зважених КС для $\alpha = 0,3$ та $0,5$

Поглянувши на рисунок 3, бачимо, зменшення затримки графіків експоненційно-зважених КС відносно графіків результатів вимірювань. Якщо параметр α вибрати замалим, графік експоненційно-зваженої КС буде занадто плавним і не зможе вчасно вказати на наявність проблеми, якщо ж α буде близьким до одиниці – експоненційно-зваженої КС

наблизиться до графіка результатів вимірювань і не зможе захистити від хибних рішень про втрату контрольованості процесу.

Можна сказати, що одночасне використання контрольних карт та карт експоненційно-зважених КС може давати достовірні сигнали про необхідність проведення калібрування еталонів (або ЗВТ), за умови правильного підбору коефіцієнта α . Втім, принциповим моментом є те, що такий сигнал поступить вже після того, як процес використання еталона втратив керованість, тобто метрологічні характеристики еталона перестали задовольняти встановленим вимогам. Це пояснюється особливістю підходу КС – і прості, і зважені лінії КС "ідуть за тенденцією" з більшою чи меншою затримкою і не дозволяють заздалегідь передбачити вихід процесу з контрольованого стану. Звичайно, вчасне виявлення невідповідності еталона є дуже важливим, оскільки не дозволить використовувати його до проведення калібрування, однак можливість прогнозування такої невідповідності була б іще кориснішою для лабораторій.

Для цього у подальшому може бути досліджено використання двох (чи більше) КС на контрольних картах Шухарта одного або різних видів, з однаковими або різними періодами згладжування, їх перетин (можливості використання комбінацій КС досить детально описані в [14]), моделювання, екстраполяція, застосування рівняння регресії та інших інструментів прогнозування.

Висновки

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що для визначення необхідності проведення повторних калібрувань еталонів та ЗВТ можливе використання інструментів статистичної обробки даних, зокрема, ліній ковзних середніх.

2. Показано, що застосування контрольних карт Шухарта з нанесенням на них простих та зважених ковзних середніх, за певних умов, може давати вчасні та достовірні сигнали про необхідність проведення калібрування еталонів та ЗВТ, що використовуються лабораторіями.

3. Запропоновано новий підхід, який дозволить обґрунтовано встановлювати необхідність подання еталонів та ЗВТ на калібрування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (Law of Ukraine «On Metrology and Metrological Activity»).
2. Міжнародний словник основних і загальних термінів в метрології (International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM-3) – <http://www.oiml.org/publications/V/V002-200-e10.pdf>
3. ДСТУ ІЛАС-G24/OIML D 10:2013 Метрологія. Настанови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (DSTU ILAC-G24/OIML D 10:2013 Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments).
4. ІЛАС-P10:01/2013 Політика ІЛАС з простежуваності результатів вимірювань (ILAC-P10:01/2013 ILAC Policy on Traceability of Measurement Results).
5. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (DSTU ISO/IEC 17025:2006 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories).
6. Угода про взаємне визнання національних еталонів та сертифікатів калібрувань та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами (CIPM MRA «Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes») <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-text/>
7. Багатостороння угода про взаємне визнання ІЛАС (ILAC Mutual Recognition Arrangement) <http://ilac.org/ilac-mra-and-signatories/>
8. ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій).
9. Критерії, яким повинні відповідати наукові метрологічні центри, державні підприємства, які належать до сфери управління Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та провадять метрологічну діяльність, та повірочні лабораторії, які уповноважуються або уповноважені на проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації (Criteria, which must meet metrological centers, state enterprises belonging to the management of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine and conduct metrological activity, and verification laboratories that are authorized or authorized to carry out the verification of legally regulated measurement instruments in use), затв. Наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 23.09.2015 № 1192, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 7 жовтня 2015 р. за № 1213/27658.

10. ДСТУ OIMLD 23:2008 Метрологія. Принципи метрологічного контролю обладнання для повірки (DSTU OIML D 23:2008 Principles of metrological control of equipment used for verification).
11. ДСТУ OIML D 8:2008 Метрологія. Еталони. Вибір, визнання, застосування, зберігання та документація (DSTU OIML D 8:2008 Measurement standards. Choice, recognition, use, conservation and documentation).
12. ДСТУ ISO 7870-2:2016 Статистичний контроль. Карти контрольні. Частина 2. Карти Шухарта (DSTU ISO 7870-2:2016 Control charts – Part 2: Shewhart control charts).
13. Сундарон Э. М. Исследование влияния фактора сглаживания на параметры контрольной карты экспоненциально взвешенного скользящего среднего // Международный научно-исследовательский журнал (Soundaron E. M. Studing the influence of smoothing factor on parameters of control chart exponentially weighted moving average // International Research Journal). – 2016. – № 8 (50). – С/Р. 89–92.
14. Джон Дж. Мэрфи, Технический анализ фьючерсных рынков: теория и практика. – М.: Сокол (John J. Murphy, Technical Analysis of the Futures Markets: A Comprehensive Guide to Trading Methods and Applications. – М.: Sokol). – 1996. – 592 с.