

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**



**ПОТОЦЬКИЙ ІГОР ОЛЕКСІЙОВИЧ**

УДК 351.821

**МЕТОДИ ВСТАНОВЛЕННЯ ІНТЕРВАЛІВ КАЛІБРУВАННЯ ЕТАЛОНІВ ТА  
ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

Спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та  
метрологічне забезпечення

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ-2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Володарський Євген Тимофійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри автоматизації  
експериментальних досліджень, Заслужений працівник  
освіти України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Тріщ Роман Михайлович**,  
Українська інженерно-педагогічна академія,  
завідувач кафедри охорони праці, стандартизації  
та сертифікації;

доктор технічних наук, професор,  
**Кучерук Володимир Юрійович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри метрології та промислової автоматики.

Захист дисертації відбудеться «14» квітня 2020 року о 16:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 6 » березня 2020 року

**Учений секретар**  
спеціалізованої вченої ради  
канд. техн. наук, доцент



**А.І. Замулко**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Набуття чинності з 1 січня 2016 року нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та перехід до калібрування засобів вимірювальної техніки відповідно до міжнародних нормативних документів з метрології стали черговим значним кроком на шляху інтеграції України у європейський та світовий економічний простір, оскільки дали можливість забезпечувати метрологічно простежувані, зіставні та визнані результати вимірювань і випробувань, проведених в Україні.

Спільний документ Міжнародної кооперації з акредитації лабораторій ІЛАС та Міжнародної організації законодавчої метрології OIML, прийнятий як національний стандарт ДСТУ ІЛАС-G24/OIML D 10 наголошує на тому, що важливим аспектом підтримання спроможності лабораторії отримувати простежувані та надійні результати вимірювань є визначення максимально допустимого періоду часу, який має пройти між двома калібруваннями засобу вимірювальної техніки.

Крім того, документ містить норму, яка говорить про те, що не розглядають як достатньо надійну так звану «інженерну інтуїцію», за допомогою якої визначають міжкалібрувальні інтервали, та систему, що підтримує фіксовані інтервали без коригування. Така норма спонукає випробувальні та калібрувальні лабораторії розробляти критерії, які дозволяли б змінювати, з урахуванням умов експлуатації, міжкалібрувальні інтервали засобів вимірювальної техніки, або якимось чином документально обґрунтовувати їх незмінність.

У загальному випадку, рекомендовані міжкалібрувальні інтервали встановлюються для типу засобу вимірювальної техніки його виробником. При цьому не враховуються умови використання конкретного засобу вимірювальної техніки і можлива зміна його метрологічних характеристик з часом. Крім того, на сьогодні, є значний парк засобів вимірювальної техніки, термін експлуатації яких, згідно з документацією виробника, вичерпано, але вони продовжують успішно використовуватись у лабораторіях.

Враховуючи зазначені вище вимоги, особливої актуальності набуває питання створення методів та алгоритмів, які надають можливість документально обґрунтовувати міжкалібрувальні інтервали засобів вимірювальної техніки, які використовуються у лабораторіях.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до основних положень Концепції державної політики у сфері управління якістю продукції, процесами та послугами, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.08.2002 № 447-р, та у рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Застосування статистичних методів при оцінюванні відповідності» (державний реєстраційний номер 0119U000411).

**Мета та завдання дисертаційної роботи** – створення та розвинення методів, які дозволять фахівцям випробувальних та калібрувальних лабораторій встановлювати, за результатами моніторингу метрологічних характеристик, міжкалібрувальні інтервали еталонів та засобів вимірювальної техніки.

Для досягнення цієї мети поставлено такі основні завдання:

- проаналізувати можливість використання статистичних контрольних карт для встановлення міжкалібрувальних інтервалів з урахуванням умов експлуатації еталонів та засобів вимірювальної техніки;
- провести аналіз чутливості контрольних карт до зміщення характеристики перетворення засобів вимірювальної техніки, а також час затримки виявлення виходу метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки за нормовані границі;
- проаналізувати ефективність комплексного застосування контрольних карт Шухарта та ковзних середніх;
- проаналізувати чутливість до зміщення контрольних карт накопичувальних сум (CUSUM-карт), розробити метод оперативного виявлення зміщення характеристики перетворення засобу вимірювальної техніки;
- дослідити можливість використання розподілу середньоквадратичного відхилення результатів у контрольних точках для виявлення зміни метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки;
- використовуючи експериментальні дані, провести порівняльний аналіз і оцінити ефективність запропонованих методів.

**Об'єкт дослідження** – процес забезпечення простежуваності результатів вимірювання.

**Предмет дослідження** – методи та алгоритми визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки під час їх експлуатації у випробувальних та калібрувальних лабораторіях.

**Методи дослідження.** Дослідження чутливості контрольних карт до виявлення зміщення середнього значення вимірюваної величини було проведено із застосуванням методів математичного аналізу та перевірки статистичних гіпотез; аналіз впливу отриманих значень середньоквадратичного відхилення результатів вимірювань на прийняття рішення щодо зміни метрологічних характеристик засобу вимірювальної техніки – за допомогою статистичного аналізу та з використанням теорії ймовірностей. Статистичне оброблення інформації та математичні розрахунки проведено за допомогою програмного продукту MS Excel.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у теоретичному обґрунтуванні та подальшому розвитку методів встановлення міжкалібрувальних інтервалів еталонів та засобів вимірювальної техніки з урахування умов їх експлуатації, а саме:

- удосконалено контрольні карти Шухарта середніх значень шляхом комплексного їх використання із введеним додатково ковзним середнім, що дозволяє згладжувати випадкові "промахи" на карті та виявляти дрейф характеристик засобів вимірювальної техніки;
- вперше запропоновано метод ковзної регресії, який на основі контрольних карт накопичувальних сум (CUSUM-карт) дозволяє, на відміну від існуючих підходів, виявити зміщення характеристики засобу вимірювальної техніки на початковому етапі;

– вперше використано ймовірність попадання вибіркового середньоквадратичного відхилення у елементарні інтервали генерального розподілу, що дозволяє, на відміну від використання середнього у контрольних точках, оперативно виявляти зміну характеристики перетворення засобів вимірювальної техніки;

– вперше запропоновано метод виявлення критичної послідовності СКВ-точок, який, на відміну від існуючих, дозволяє реалізувати покрокове адаптивне виявлення зміни чутливості характеристики перетворення засобу вимірювальної техніки.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у тому, що їх впровадження у лабораторіях дозволяє:

– обґрунтовано, відповідно до вимог національних та міжнародних нормативних документів, встановлювати міжкалібрувальні інтервали засобів вимірювальної техніки;

– уникнути прийняття неправильних рішень, пов'язаних з невчасним виявленням змін метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки при проведенні моніторингу і, як наслідок, економічних або репутаційних втрат лабораторій;

– оптимізувати витрати лабораторії, своєчасно подаючи еталони та засоби вимірювальної техніки на калібрування;

– обґрунтовано використовувати засоби вимірювальної техніки, термін експлуатації яких, відповідно до документації підприємства-виробника, вже минув.

Наукові положення дисертації покладено в основу проекту стандарту підприємства щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів обладнання, що використовується у лабораторіях Державного підприємства «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»). Результати досліджень впроваджено у навчальний процес кафедри автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Розроблені методи можуть бути впроваджені у випробувальних та калібрувальних лабораторіях для обґрунтованого встановлення міжкалібрувальних інтервалів еталонів та засобів вимірювальної техніки. Зазначене, своєю чергою, дозволить зменшити втрати від використання недостовірних результатів вимірювань у лабораторіях, полегшить процедуру проходження їх внутрішніх та зовнішніх аудитів і, як наслідок, сприятиме зростанню рівня довіри до результатів виконаних робіт.

Крім того, у випадку використання засобів вимірювальної техніки, метрологічні характеристики яких залишаються у межах встановлених норм, впровадження розроблених методів дозволить надавати їх на калібрування рідше і саме тоді, коли це потрібно, що дасть змогу лабораторії економити власні кошти та час.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка завдань досліджень, розробка методів, підходів до її вирішення та обговорення одержаних результатів

здійснювались спільно з науковим керівником. Роботи [3, 8-11] написані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: [1] – побудова та дослідження чутливості та здатності згладжувати випадкові «промахи» із застосуванням контрольних карт Шухарта спільно з нанесеними на них лініями ковзних середніх; [2] – аналіз міжнародних нормативних документів щодо забезпечення метрологічної простежуваності та надання практичних пропозицій щодо їх реалізації; [4] – введено поняття критичної послідовності точок та досліджено ймовірності їх виникнення; [5] – проаналізовано застосування V-маски для виявлення розладнання процесу на контрольній карті накопичувальних сум; [6] – розглянуто можливості автоматизації чисельного методу із застосуванням контрольних карт накопичувальних сум, проведено порівняння із методом V-маски; [7] – досліджено можливість встановлення наявності втрати процесом статистичної керованості із застосуванням прямого методу та перевірки гіпотез; [12] – проаналізовано підходи до встановлення міжповірочних інтервалів законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки.

**Апробація дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були оприлюднені, обговорені та схвалені на шести міжнародних та всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: «8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL\*2019», (Sozopol, Bulgaria, 2019); IV, V Всеукраїнських науково-технічних конференціях молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement» (Славське, 2018, 2019); XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», (Київ, 2019); V Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», (Вінниця, 2019); семінарі КООМЕТ "Установление межповерочных интервалов в сфере законодательной метрологии", (Київ, 2019).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі: 6 – у наукових фахових виданнях України, з яких 6 входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus; 6 – тези доповідей у збірниках конференцій, з них 1 – у закордонних (Proceedings).

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (58 найменувань) та 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 147 сторінок, з яких 143 сторінки основного тексту, 43 рисунки, 12 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, зазначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про апробацію та публікації, описано особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проаналізовано вимоги до встановлення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (далі – ЗВТ) у зв'язку з набуттям чинності з 1 січня 2016 року нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та перехід до калібрування відповідно до міжнародних норм. Відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025 у лабораторіях повинні

бути впроваджені програми калібрування, які дозволять обґрунтовано змінювати міжкалібрувальні інтервали ЗВТ та обладнання, що застосовується. Власники (користувачі) ЗВТ повинні самостійно встановлювати, коли і до якої калібрувальної лабораторії подавати їх на калібрування і несуть відповідальність за використання відповідних результатів вимірювань.

Розглянуто основні підходи до встановлення міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ, запропоновані у міжнародних нормативних документах та літературних джерелах. Проведено аналіз кожного з підходів, відзначено позитивні сторони підходів та їх недоліки.

Враховуючи вищезазначене, сформульовано мету, об'єкт та предмет дослідження, встановлено можливі шляхи досягнення поставленої мети, що окреслюють структуру та зміст наступних розділів роботи.

**У другому розділі** проведено аналіз статистичних інструментів, які можуть бути застосовані для вирішення поставлених задач дисертаційної роботи. Розглянуто різні види контрольних карт Шухарта, встановлено, що недоліком класичних контрольних карт Шухарта середніх значень є те, що за ними буває досить складно або, навіть, неможливо визначити малі зміщення (дрейф) метрологічних характеристик ЗВТ.

За результатами проведених досліджень запропоновано новий комплексний метод виявлення дрейфу метрологічних характеристик ЗВТ, який дозволяє згладжувати «промахи» під час моніторингу та вказувати на наявність тренду характеристики перетворення ЗВТ.

З цією метою було запропоновано використати відомий інструмент визначення дрейфу (тренду) характеристики, а саме – ковзні середні значення. Крім того, нанесення на контрольну карту ліній ковзних середніх дозволить згладити випадкові «промахи», які можуть виникати під час проведення вимірювань. Однак, аналіз показав, що використання простого ковзного середнього призводить до відставання (затримки) лінії ковзного середнього від графіка результатів контрольних вимірювань. Ще одним недоліком використання простого ковзного середнього є те, що, в залежності від ширини періоду згладжування, на графіку ковзних середніх відсутні дані на перших етапах. Наприклад, якщо обрано період згладжування для  $n = 6$  послідовних результатів, то першу точку простого ковзного середнього можна буде нанести на контрольну карту лише після шостого проміжного перевіряння.

Одним із способів зменшення затримки графіка ковзних середніх є використання зважених ковзних середніх. Найпоширенішими серед них є лінійно-зважені та експоненційно-зважені ковзні середні. Дослідження показали, що використання лінійно-зважених ковзних середніх дозволяє зменшити відставання їх графіків від графіка результатів вимірювань, втім не вирішує проблеми, яка обумовлена обмеженістю кількістю наявних даних.

Іншою модифікацією підходу зважених ковзних середніх є метод експоненційно-зважених ковзних середніх, який, крім іншого, є нечутливим до зміни закону розподілу результатів вимірювань. У загальному випадку формула побудови експоненційно-зваженого ковзного середнього має наступний вигляд:

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

де  $S_i$  – поточне зважене значення кривої ковзного середнього,  
 $\alpha$  – параметр (коефіцієнт) згладжування,  
 $\bar{X}_i$  – середнє значення результатів вимірювання у  $i$  контрольній точці,  
 $S_{i-1}$  – попереднє зважене значення кривої ковзного середнього.

Ваговий коефіцієнт  $\alpha$  встановлює швидкість «старіння» попередніх даних – чим більше його значення, тим більшу вагу має останній результат вимірювання, і тим меншу попередні результати. Використання ліній експоненційно-зважених ковзних середніх дозволить зменшити затримку відносно графіків результатів вимірювань, залежно від обраного параметра згладжування  $\alpha$ . Якщо  $\alpha$  вибрати замалим (менше ніж 0,3), графік експоненційно-зваженої ковзної середньої буде занадто повільним і не зможе вчасно вказати на наявність проблеми, якщо  $\alpha$  буде зavelиким (більше ніж 0,5) – експоненційно-зважене ковзне середнє буде наближатись до графіка результатів вимірювань і не зможе захистити від прийняття помилкових рішень.

Таким чином, одночасне використання контрольних карт та експоненційно-зважених ковзних середніх може згладжувати випадкові «промахи» результатів проміжних перевірянь та вказувати на наявність дрейфу (тренду) характеристики перетворення еталонів та ЗВТ, за умови правильного підбору коефіцієнта  $\alpha$ . Враховуючи проведені дослідження, при застосуванні комплексного методу виявлення дрейфу метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, автор рекомендує приймати  $\alpha = 0,4$ .

Як зазначено вище, контрольні карти Шухарта не є чутливими до незначних зміщень характеристики перетворення ЗВТ, тому для виявлення малих зміщень було проаналізовано можливість застосування контрольних карт накопичувальних сум (CUSUM-карт). Відмінна особливість CUSUM-карт полягає в тому, що нанесені на карту точки не відповідають окремим спостереженням або статистикам, як, наприклад, середнє або розмах, обчислені за одною вибіркою, а представляють інформацію про спостереження від першого до останнього, включно. Значення, які наносяться як ордината на CUSUM-карту, розраховуються за формулою:

$$\bar{Y}_t = \sum_{j=1}^t (\bar{X}_j - \mu_0) \quad (2)$$

Для проведення аналізу CUSUM-карт було розглянуто процес, який має нормальний розподіл з нормованою величиною  $\mu_0 = 100$  одиниць і СКВ  $\sigma_0 = 20$  одиниць, кількість спостережень при контролі  $n = 5$ . У момент часу  $t = 11$  вводиться зміщення процесу на величину  $\Delta = +10$  одиниць. На рисунку 1а зображено результати контрольних вимірювань на карті Шухарта середніх значень з нижньою  $L_{CL}$  та верхньою  $U_{CL}$  контрольними границями, на рисунку 1б – результати на CUSUM-карті з нанесеною V-маскою (пунктирними лініями відображено процес після введення додаткового зміщення).



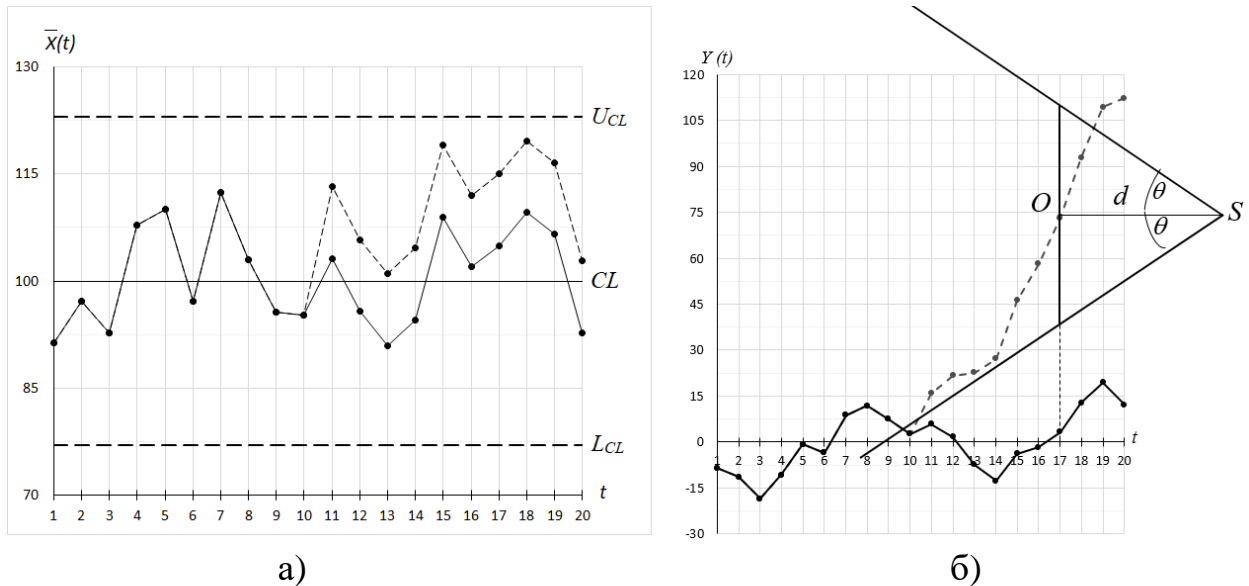


Рисунок 1 – Результати контролю: а) на карті середніх значень; б) на CUSUM-карті

У роботі теоретично обґрунтовано розрахункові параметри  $tg\theta$  та  $d$  V-маски за виразами:

$$tg\theta = \frac{\delta\sigma_0}{2f}, \quad (3)$$

$$d = -\frac{2}{n\delta^2} \cdot \ln \frac{\alpha}{2}, \quad (4)$$

де  $\delta$  – нормоване відносне зміщення характеристики;

$f$  – масштабний коефіцієнт;

$\alpha$  – прийнятий рівень статистичної значущості (у наведеному прикладі  $\alpha = 0,01$ ).

Проведені дослідження довели, що застосування CUSUM-карти дозволяє із заданим ступенем точності і достовірності судити про стан процесу. Проведений аналіз показав, що CUSUM-карти швидше встановлюють наявність незначних зміщень, ніж класичні карти Шухарта. Втім, якщо мова йде про використання еталонів чи ЗВТ у лабораторіях, необхідність вчасного виявлення зміни їх метрологічних характеристик постає особливо гостро, оскільки вони застосовуються для передачі розмірів одиниць фізичних величин, контролю параметрів готової продукції, забезпечення єдності вимірювань тощо.

Графічний метод інтерпретації CUSUM-карт з використанням V-маски є досить складним, першочергово тому, що передбачає однозначне і коректне масштабування графіків на картах. При цьому, масштабування CUSUM-карти необхідно проводити для кожного окремо взятого випадку, що передбачає постійну участь оператора при моніторингу.

Враховуючи зазначене, а також високі обчислювальні можливості сучасної техніки, було розроблено аналітичний метод виявлення зміни метрологічних характеристик ЗВТ на ранніх етапах. Для цього згідно з (3) визначається тангенс кута ( $tg\theta$ ) нахилу променів V-маски, що відповідають верхньому і нижньому граничному значенню допустимих відхилень характеристики (для розробленого

методу введено позначення  $tg\theta_{lim} = tg\theta$ ). Щоразу, після розрахунку чергового значення для точки на CUSUM-карті, розраховується також тангенс кута нахилу лінії регресії для послідовності контрольних точок, у яку введено точку, яка відповідає новому отриманому значенню, і виключено із попередньої послідовності першу точку. Знайдене нове значення тангенса порівнюється з граничним значенням  $tg\theta_{lim}$ . Таким чином, для виявлення зміни метрологічних характеристик ЗВТ не потрібно чекати, доки графік на CUSUM-карті перетне одну із сторін V-маски. Достатнім для цього буде виконання умов:

$$tg\theta_i > tg\theta_{lim} \quad (5)$$

або

$$tg\theta_i < -tg\theta_{lim} \quad (6)$$

де  $tg\theta_i$  – тангенс кута нахилу поточної лінії ковзної регресії.

Для аналізу запропонованого методу було розраховано значення  $tg\theta_{lim}$  для розглянутого раніше прикладу:

$$tg\theta_{lim} = \frac{\delta\sigma_0}{2} = \frac{0,5 \cdot 20}{2} = 5.$$

На рисунку 2 наведено графіки, які відображають динаміку зміни тангенса кута нахилу ліній ковзної регресії при різному числі послідовних точок, за якими будується лінія ковзної регресії, ( $n=3, 4, 5$ ).

Проаналізувавши отриману інформацію, можна зробити висновок про те, що

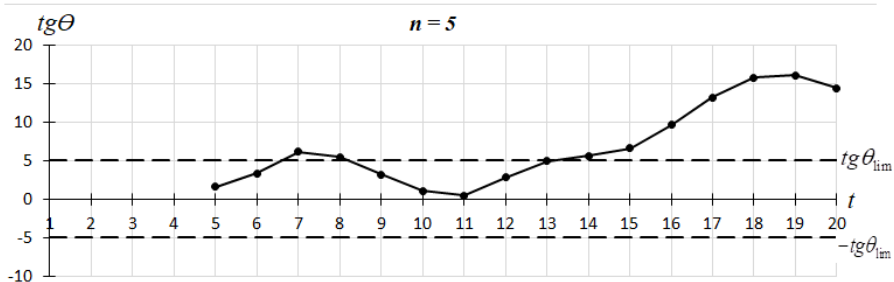
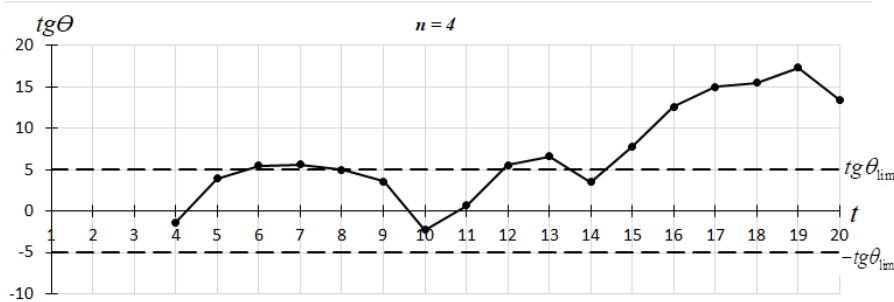
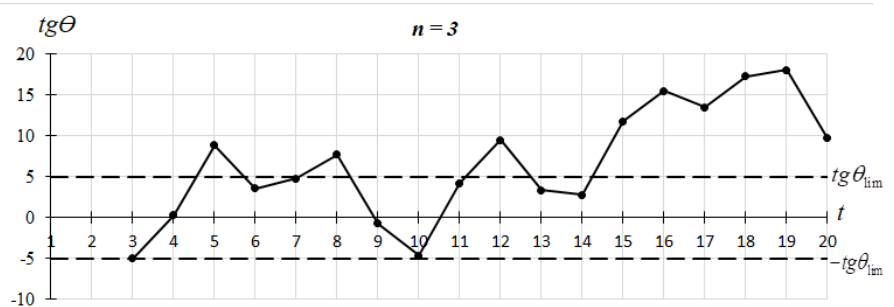


Рисунок 2 – Тангенси кутів нахилу ліній ковзної регресії

тангенс кута нахилу  $tg\theta_i$  за кількості послідовних точок, що формують лінію ковзної регресії  $n = 3$ , дає хибні сигнали. У той же час значення  $tg\theta_i$  для ліній при  $n = 4$  та  $5$  поводить себе, в цілому, стабільно. Втім, встановлено значну відмінність між ними, а саме: при  $n = 4$  розладнання процесу виявляється вже на другому кроці після його появи, тоді як при  $n = 5$  – лише на четвертому кроці, що є суттєвим.

Для того, щоб зменшити кількість помилкових сигналів про зміну метрологічних характеристик еталона чи

ЗВТ (як це відбулось при 6-му та 7-му проміжному перевірці), запропоновано введення додаткового критерію, за якого сигнал вважатиметься достовірним, якщо усі  $n = 4$  послідовних значень, застосованих для побудови лінії ковзної регресії, зростають (у випадку перевищення  $tg\theta_{lim}$ ), тобто:

$$Y_{i-3} < Y_{i-2} < Y_{i-1} < Y_i. \quad (7)$$

Відповідно, для випадку отримання значення  $tg\theta_i < -tg\theta_{lim}$  додатковим критерієм буде:

$$Y_{i-3} > Y_{i-2} > Y_{i-1} > Y_i. \quad (8)$$

За результатами проведених досліджень запропоновано метод ковзної регресії на CUSUM-карті, який дозволяє отримувати сигнали про зміну метрологічних характеристик ЗВТ ще до того, як параметри, що контролюються, вийдуть за нормовані границі. Метод заснований на порівнянні тангенса кута лінії ковзної регресії, побудованої за кількома послідовними точками CUSUM-карти, з встановленим допустимим значенням. Введено додаткові критерії, які дозволяють уникнути прийняття помилкових рішень.

**У третьому розділі** досліджено можливість виявлення зміни чутливості характеристики перетворення ЗВТ з використанням зв'язку СКВ та статистики Пірсона.

Порушення метрологічної надійності у більшості випадків пов'язують із дрейфом характеристики ЗВТ, допускається адитивне зміщення характеристики у часі. Але для ЗВТ необхідно розглядати і зміну з часом параметрів характеристики вимірювального перетворення, тобто може бути і мультиплікативне зміщення – зміна чутливості. Це у більшій мірі відображається на зміні розсіювання результатів спостережень у контрольних точках. Особливий випадок для ЗВТ складає зменшення чутливості, обумовлене старінням елементів та модулів. При цьому СКВ буде все ближче розташовуватися біля математичного сподівання (нульової лінії), що сприймається, як знаходження процесу функціонування ЗВТ у статистично керованому стані, тобто контрольні точки знаходяться у граничних межах традиційної карти Шухарта, і приймається помилкове рішення, що втручання (калібрування) не потрібне.

Відомо, що для випадкових величин, які мають нормальний розподіл, відношення вибіркової дисперсії до її значення для генеральної сукупності характеризується статистикою, розподіл якої наближається до розподілу  $\chi^2$  Пірсона з  $\nu = (n - 1)$  числом ступенів свободи:

$$\chi^2 = \frac{S_n^2 \cdot (n-1)}{\sigma_0^2}, \quad (9)$$

де  $S_n^2$  – оцінка дисперсії вибірки,

$n$  – кількість спостережень у вибірці,

$\sigma_0^2$  – дисперсія генеральної сукупності, яка для ЗВТ є нормованою величиною.

Ймовірність знаходження статистики Пірсона у певному інтервалі характеризується виразом:

$$P\left(\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \leq \chi^2 \leq \chi^2_{\frac{\alpha}{2}, n-1}\right) = 1 - \alpha \quad (10)$$

де  $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}$ ,  $\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$  – квантилі розподілу  $\chi^2$  Пірсона, залежно від рівня значущості  $\alpha$ , та кількості ступенів свободи  $\nu = n - 1$ .

Виходячи з (9) та (10), ймовірність потрапляння вибіркового значення  $S_n$  у певний інтервал визначається як:

$$P\left(\sqrt{\frac{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \sigma_0^2}{n-1}} \leq S_n \leq \sqrt{\frac{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \sigma_0^2}{n-1}}\right) = 1 - \alpha. \quad (11)$$

На відміну від розподілу для середнього значення, розподіл СКВ буде несиметричним, і тому доцільно розглядати випадкові події, пов'язані з ймовірністю попадання в елементарні інтервали при опорній величині – або мода, або медіана.

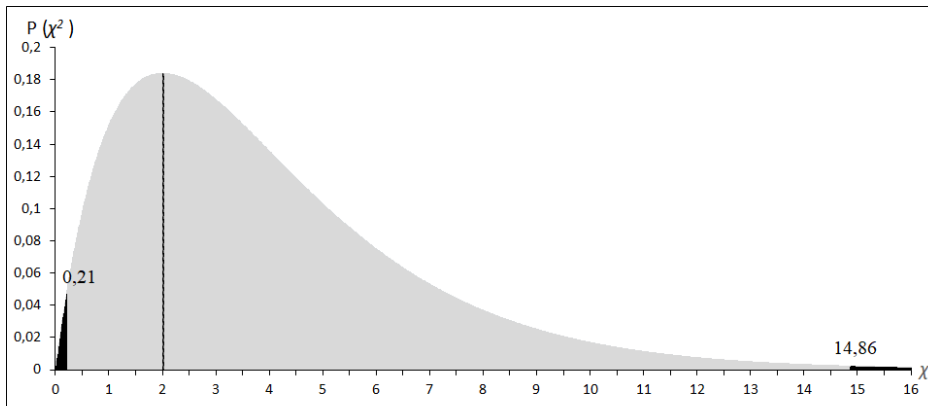


Рисунок 3 – Розподіл  $\chi^2$  Пірсона

На рисунку 3 зображено розподіл  $\chi^2$  Пірсона для кількості ступенів свободи  $\nu = 4$  та рівнем значущості  $\alpha = 0,01$ . Це означає, що присутній ризик 1 % того, що результат буде знаходитись поза межами від

$\chi^2_{1-\frac{0,01}{2}, 5-1} \approx 0,21$  до

$\chi^2_{\frac{0,01}{2}, 5-1} \approx 14,86$  після проведення калібрування.

Враховуючи те, що за відсутності невідповідних впливних величин у процесі використання ЗВТ, ймовірність виходу значення  $S_n$  за граничні значення  $L_{CL}$  та  $U_{CL}$  дорівнює всього 1 %, і навіть вихід одного поточного значення за ці межі є сигналом того, що нормоване виробником ЗВТ СКВ, змінилось у значних межах, а сам ЗВТ потребує калібрування або, навіть, ремонту чи заміни.

Для недопущення виходу значення  $S_n$  за встановлені границі було розроблено ряд критеріїв, які заздалегідь попереджують користувача ЗВТ про зміну його СКВ. З цією метою кожний з інтервалів  $L_{CL} - CL$  та  $CL - U_{CL}$  було розділено на три рівні за шириною діапазони і позначено їх як  $A_L$ ,  $B_L$ ,  $C_L$  та  $A_H$ ,  $B_H$ ,  $C_H$  відповідно, а розподіл  $\chi^2$  Пірсона було накладено на контрольну карту так, як показано на рисунку 4.

Як було сказано вище, ймовірність потрапляння точки на контрольній карті поза межі  $L_{CL}$  та  $U_{CL}$  є малоімовірною подією, і це є свідомством того, що існує вплив не випадкової величини. Враховуючи зазначене, можна вважати, що виникнення

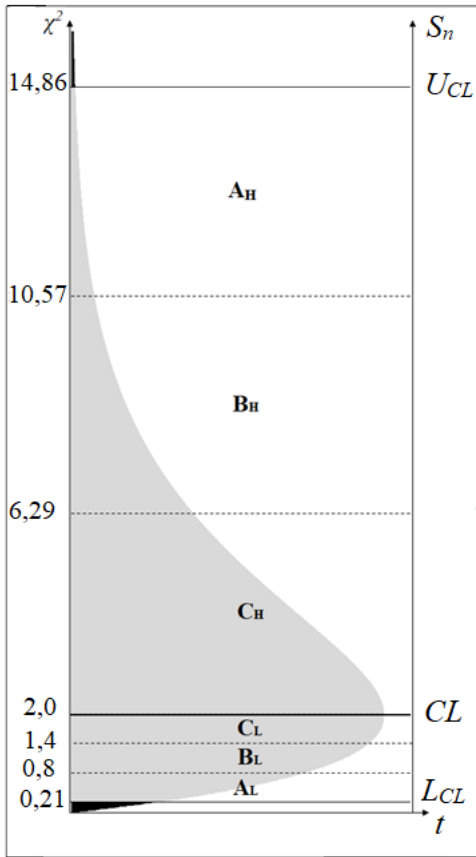


Рисунок 4 – Елементарні діапазони

послідовності точок на контрольній карті, які знаходяться у певному діапазоні, ймовірність якої менше 1 %, може вважатись сигналом того, що є суттєвий вплив не випадкових величини і необхідне втручання. Назвемо таку послідовність критичною послідовністю точок. У випадку з ЗВТ це означає, що необхідно провести аналіз причин, які могли б призвести до такої події, і, можливо, надати ЗВТ на калібрування.

Критичні послідовності точок можуть знаходитись:

- в одному діапазоні ( $A_L$ ,  $B_L$ ,  $C_L$ ,  $C_H$ ,  $B_H$  або  $A_H$ );
- в кількох суміжних елементарних діапазонах (наприклад ( $A_L$ ,  $B_L$ ), ( $C_L$ ,  $C_H$ ) тощо);
- нижче або вище рівня  $CL$ .

Застосувавши теорему множення ймовірностей для незалежних подій, було проаналізовано ймовірності потрапляння  $N$  послідовних контрольних точок в той чи інший елементарний діапазон (або сукупність суміжних діапазонів). У таблиці 1 наведено ймовірності

попадання точок та момент виникнення критичних послідовностей для усіх елементарних діапазонів та деяких їх комбінацій (за модою).

Таблиця 1 – Кількість критичних точок в послідовностях (за модою)

Елементарні діапазони або їх сполучення	( $A_L$ , $B_L$ , $C_L$ )	( $A_H$ , $B_H$ , $C_H$ )	$A_L$	$B_L$	$C_L$	$C_H$	$B_H$	$A_H$	( $B_L$ , $C_L$ )	( $B_H$ , $C_H$ )	( $A_L$ , $B_L$ )	( $A_H$ , $B_H$ )	( $C_L$ , $C_H$ )
Ймовірність потрапляння	0,26	0,73	0,057	0,094	0,109	0,556	0,147	0,027	0,203	0,703	0,151	0,174	0,665
Число точок в критичній послідовності	4	15	2	2	3	8	3	2	3	14	3	3	12

Аналіз отриманих результатів вказує на значний дисбаланс, який виникає при використанні підходу, коли у якості  $CL$  обирається значення  $\chi_{\text{mod}}^2 = 2$  (для кількох діапазонів кількість точок у критичній послідовності рівна 2, тоді як для деяких комбінацій – 14 та 15). З метою зменшення цього дисбалансу необхідно розглянути інші можливості щодо встановлення  $CL$  та формування границь діапазонів.

Для отримання більш зрівноваженого значення  $CL$  діапазони на контрольній карті було розділено відносно ймовірності 50 % потрапляння точок вище або нижче

$CL$  (за медіаною). При цьому табличне значення квантиля розподілу  $\chi^2$  Пірсона дорівнює 3,36.

У таблиці 2 наведено ймовірності попадання точок та момент виникнення критичних послідовностей для усіх елементарних діапазонів та деяких їх комбінацій (за медіаною).

Таблиця 2 – Кількість критичних точок в послідовностях (за медіаною)

Елементарні діапазони або їх сполучення	( $A_L, B_L, C_L$ )	( $A_H, B_H, C_H$ )	$A_L$	$B_L$	$C_L$	$C_H$	$B_H$	$A_H$	( $B_L, C_L$ )	( $B_H, C_H$ )	( $A_L, B_L$ )	( $A_H, B_H$ )	( $C_L, C_H$ )
Ймовірність потрапляння	0,495	0,495	0,127	0,189	0,179	0,374	0,1	0,021	0,368	0,474	0,316	0,121	0,553
Число точок в критичній послідовності	7	7	3	3	3	5	3	2	5	7	4	3	8

Результати досліджень показали, що використання розподілу  $\chi^2$  Пірсона на контрольній карті з центральною лінією  $CL$ , побудованою за медіаною, дозволило уникнути екстремально високих або низьких значень для критичних послідовностей точок.

При експлуатації ЗВТ у лабораторії користувачу необхідно виявити зміну метрологічних характеристик якомога швидше, тобто чим менша кількість проведених проміжних перевірянь буде потрібна для цього, тим краще. Враховуючи це, введено коефіцієнт ефективності  $K_{ef}$ , який розраховується як:

$$K_{ef} = \frac{P_{\text{mod}(med)}}{N_{\text{mod}(med)}}, \quad (12)$$

де  $P_{\text{mod}(med)}$  – ймовірність потрапляння точки у заданий діапазон (комбінацію діапазонів) при розподілі за модою (медіаною);

$N_{\text{mod}(med)}$  – кількість точок у критичній послідовності при розподілі за модою (медіаною).

Розрахунок значень коефіцієнта ефективності  $K_{ef}$  показав, що для усіх елементарних діапазонів, окрім  $A_H, B_H$  та їх об'єднання ( $A_H, B_H$ ), ефективнішим є застосування розподілу  $\chi^2$  Пірсона, поділеного на діапазони відносно медіани. Проведений аналіз дозволив розробити адаптивний алгоритм виявлення критичної послідовності СКВ-точок (див. рисунок 5). При цьому для контролю чутливості еталона чи ЗВТ беруться до уваги ті діапазони, для яких отримане значення коефіцієнта ефективності  $K_{ef}$  є більшим.

За результатами проведених досліджень розроблено метод виявлення критичної послідовності СКВ-точок, який базується на контролі середньоквадратичних відхилень, отриманих під час проміжних перевірянь. Створений метод дозволяє визначати на початковому етапі зміну метрологічних характеристик ЗВТ і обґрунтовано визначати час подачі його на калібрування.

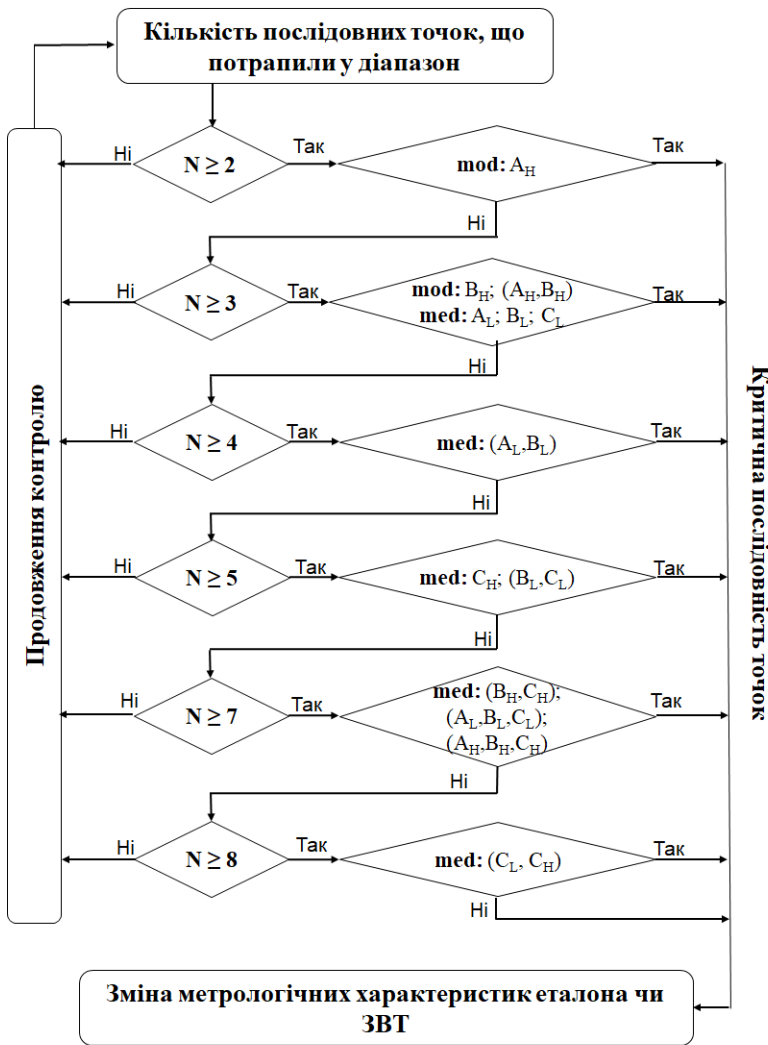


Рисунок 5 – Адаптивний алгоритм виявлення критичної послідовності СКВ-точок

граничного допустимого значення  $L_{CL}$ , тобто прилад необхідно надавати на калібрування. Проаналізувавши CUSUM-карту, зображену на рисунку 6б, після 16 проміжного перевірвання можна зробити висновок про те, що має місце зміщення метрологічних характеристик калібратора, що контролюється – верхній промінь V-маски перетинає криву на CUSUM-карті.

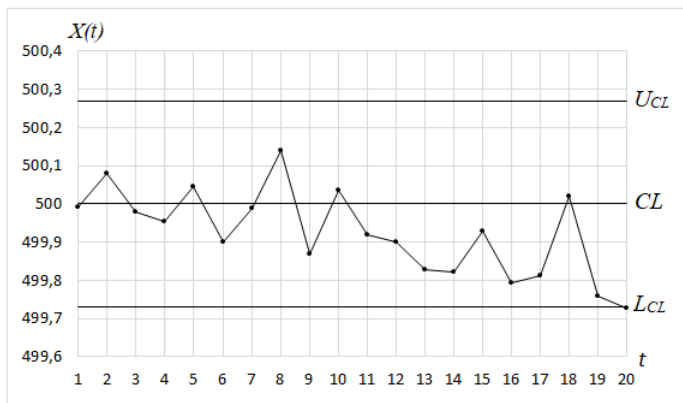
### Четвертий розділ

присвячений експериментальним дослідженням розроблених методів. Експериментальні дослідження проводились на прикладі проміжних перевірянь калібратора напруги типу Н4-19 та вольтметра типу Keithley 2700.

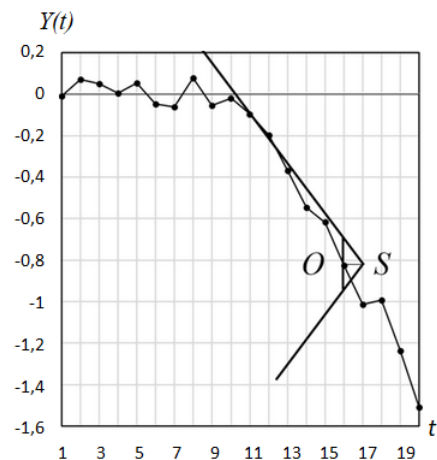
Проміжні перевіряння калібратора напруги типу Н4-19 проводились один раз на місяць у точці  $U_{nom} = \mu_0 = 500$  мВ, кількість спостережень у контрольній точці  $n = 5$ .

На рисунку 6а наведено контрольну карту Шухарта середніх значень, на рисунку 6б – CUSUM-карту з V-маскою, з нанесеними на них результатами проміжних перевірянь калібратора напруги.

Аналіз контрольної карти Шухарта середніх значень показує (див. рисунок 6а), що у 20-тій контрольній точці побудована крива виходить за межі лінії



а)



б)

Рисунок 6 – Результати проміжного контролю: а) на карті Шухарта середніх значень; б) на CUSUM-карті



Розглянутий приклад підтверджує правильність теоретичних обґрунтувань,

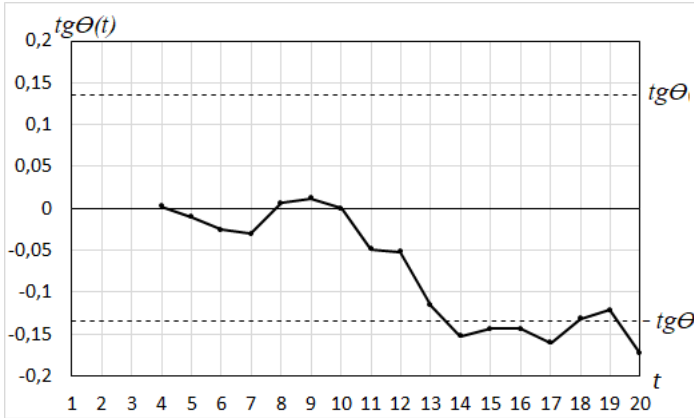


Рисунок 7 – Метод ковзної регресії на CUSUM-карті

проміжного перевіряння, при цьому додатковий критерій справджується:  $Y_{11} > Y_{12} > Y_{13} > Y_{14}$ .

Розглянутий приклад з використанням експериментальних даних показав, що карти Шухарта середніх значень не завжди вчасно можуть встановити незначні зміщення метрологічних характеристик еталонів чи ЗВТ. CUSUM-карти у даному випадку є значно ефективнішими, оскільки дозволили виявити зміну метрологічних характеристик калібратора після 16-го проміжного перевіряння. У той же час, застосування розробленого методу ковзної регресії на CUSUM-карті дозволило виявити зміну метрологічних характеристик після 14-го проміжного перевіряння, що, у порівнянні з іншими методами, є дуже раннім сигналом. Розроблений метод може використовуватись не лише для виявлення зміни метрологічних характеристик еталонів та ЗВТ на ранньому етапі, а і для застосування приладів за умов більшої статистичної надійності, забезпечення підвищення вимог до точності вимірювання, у порівнянні з гарантованою заводом-виробником.

Проміжні перевіряння вольтметра типу Keithley 2700 проводились один раз на місяць у точці  $U_{nom} = 24$  В, кількість спостережень  $n = 5$ .

Контроль за допомогою контрольних карт Шухарта середніх значень та з використанням нового методу ковзної регресії на CUSUM-карті, як найбільш чутливого до зміщення, у даному випадку не сигналізував про зміну метрологічних характеристик вольтметра. Враховуючи те, що характеристика похибки вольтметра представляється двочленною формулою, в яку входить адитивна складова (зміщення) та мультиплікативна складова (зміна чутливості), було проаналізовано наявні дані з використанням розробленого адаптивного алгоритму, представленого на рисунку 5, виявлення критичної послідовності СКВ-точок. Для цього було розраховано СКВ результатів спостережень кожного етапу проміжного контролю і нанесено їх на контрольну карту розподілу Пірсона, розділену на елементарні діапазони (див. рисунок 8).

проведених у цій роботі стосовно вищої чутливості до зміщення CUSUM-карт відносно класичних карт Шухарта.

На рисунку 7 показано результати контролю калібратора напруги з використанням розробленого методу ковзної регресії на CUSUM-карті.

З рисунку 7 видно, що метод ковзної регресії на CUSUM-карті сигналізує про зміну метрологічних характеристик ЗВТ вже після 14-го



Проаналізувавши контрольну карту згідно з адаптивним алгоритмом виявлення критичної послідовності СКВ-точок, виявлено критичну послідовність

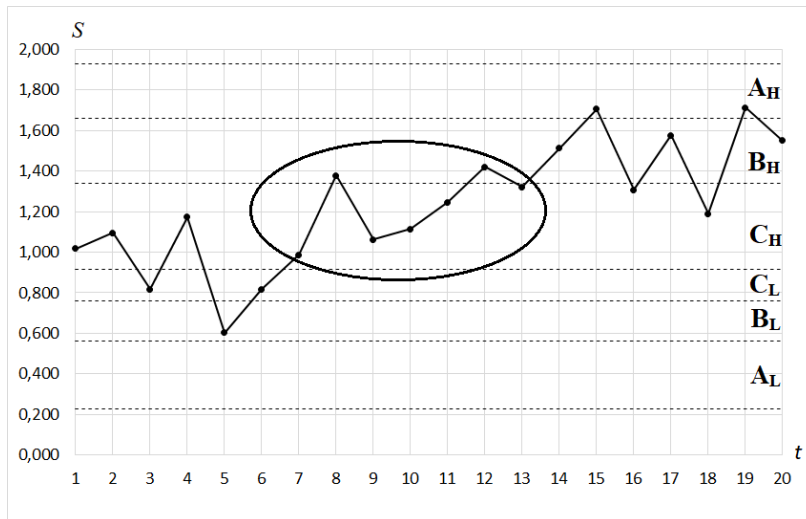


Рисунок 8 – СКВ-точки на контрольній карті розподілу Пірсона

точок за результатами 13-го проміжного перевіряння, а саме: послідовність точок, починаючи з 7-ї по 13-у включно, знаходяться у діапазонах  $B_H$  та  $C_H$ , що відповідає критерію наявності зміни чутливості характеристики перетворення вольтметра.

Таким чином, результати проведеного аналізу показали, що метод критичної послідовності СКВ-точок є ефективним, з точки зору

оперативного виявлення зміни чутливості ЗВТ, для яких притаманна її зміна з часом, і на теперішній час є єдиним статистичним інструментом, який це дозволяє робити.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено нові методи вирішення задачі встановлення та обґрунтування часових інтервалів між калібруваннями робочих еталонів та ЗВТ, які використовуються випробувальними та калібрувальними лабораторіями.

1. Виконано аналіз існуючих підходів до встановлення міжкалібрувальних інтервалів еталонів та ЗВТ, які базуються на середньому значенні часу надійної роботи без урахування вихідних характеристик ЗВТ, умов та режимів їх експлуатації. Обґрунтовано необхідність проведення проміжних перевірянь для об'єктивного встановлення часових інтервалів між калібруваннями.

2. Обґрунтовано доцільність використання контрольних карт та інструментів статистичного аналізу для встановлення міжкалібрувальних інтервалів робочих еталонів та ЗВТ, з урахуванням їх реального стану та умов експлуатації. Проаналізовано чутливість контрольних карт Шухарта середніх значень та контрольних карт накопичувальних сум (CUSUM-карт) до виявлення дрейфу характеристики перетворення ЗВТ.

3. Розроблено комплексний метод виявлення дрейфу метрологічних характеристик ЗВТ, заснований на спільному використанні контрольних карт Шухарта середніх значень та експоненційно-зважених ковзних середніх, що дозволяє згладжувати випадкові "промахи" на карті та виявляти дрейф характеристики перетворення ЗВТ.

4. Проаналізовано графічний та чисельний методи побудови CUSUM-карт, показана еквівалентність отриманих результатів та більша чутливість методів у порівнянні з картами середніх значень Шухарта. Розроблений на основі CUSUM-карт новий метод ковзної регресії дозволяє на 25 – 30 % швидше виявити момент

виходу характеристик ЗВТ за допустимі граничні значення. Це надає можливість статистично надійно встановлювати міжкалібрувальні інтервали.

5. Встановлено можливість застосування закону розподілу Пірсона для контролю стану еталонів та ЗВТ шляхом аналізу попадання у елементарні діапазони розподілу послідовності значень вибіркового СКВ, отриманих за результатами проміжних перевірянь і нанесених на контрольну карту. Показано, що, на відміну від існуючих, розроблений метод виявлення критичної послідовності СКВ-точок дозволяє оперативно виявити зміну з часом чутливості характеристики ЗВТ.

6. Проведено експериментальні дослідження розроблених методів, доведена їх ефективність при виявленні змін метрологічних характеристик робочих еталонів та ЗВТ, у порівнянні з існуючими підходами.

Впровадження запропонованих у дисертації методів дозволить лабораторіям обґрунтовано надавати власні робочі еталони та ЗВТ на калібрування саме тоді, коли це необхідно і, як наслідок, економити власні кошти і час, необхідні для цього.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Володарський Є.Т. Розробка методів визначення необхідності проведення повторних калібрувань еталонів та засобів вимірювальної техніки / Є.Т. Володарський, І.О. Потоцький // Метрологія та прилади, 2017. – № 5-І (67). – С. 62-67.

2. Кузьменко Ю.В. Калібрування засобів вимірювальної техніки відповідно до вимог Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та його значення для отримання зіставних та простежуваних результатів вимірювання, їх міжнародного визнання / Ю.В. Кузьменко, С.Т. Черепков, І.О. Потоцький, Л.Ю. Несвідоміна, Н.В. Мілковська // Метрологія і прилади, 2017. – № 5, С. 3-12.

3. Потоцький І.О. Новий підхід щодо визначення необхідності проведення калібрування вимірювального обладнання / І.О. Потоцький // Вимірювальна техніка та метрологія, 2018. – № 2 (79). – С. 60-63

4. Володарський Є.Т. Забезпечення метрологічної надійності вимірювань / Є.Т. Володарський, І.О. Потоцький // Вимірювальна техніка та метрологія, 2019. – № 3 (80). – С. 5-9.

5. Володарский Е.Т. Особенности, возможности и применение контрольных карт накопленных сумм. Часть 1. Метод графической оценки разлаженности технологического процесса / Е.Т. Володарский, Л.А. Кошева, И.А. Потоцкий // Метрологія і прилади, 2019. – № 4, С. 24-30.

6. Володарский Е.Т. Особенности, возможности и применение контрольных карт накопленных сумм. Часть 2. Численный метод оценки разлаженности технологического процесса / Е.Т. Володарский, Л.А. Кошева, И.А. Потоцкий // Метрологія і прилади, 2019. – № 5, С. 3-7.

7. Volodarsky E.T. Theoretical substantiation and application of CUSUM-charts / E.T. Volodarsky, I.O. Pototskiy // Proceedings of 2019 IEEE 8<sup>th</sup> International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL\*2019. – 6 – 8 September, 2019, Sozopol, Bulgaria. – p. 636-639.

8. Потоцький І.О. Новий підхід щодо визначення необхідності проведення калібрування вимірювального обладнання / І.О. Потоцький // Тези доповідей ІV

Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2018» (TUM-2018), м. Славське, 13 – 18 лютого 2018 року. – С. 28-30.

9. Потоцький І.О. Розробка методу встановлення міжкалібрувальних інтервалів вимірювального обладнання / І.О. Потоцький // Тези доповідей V Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» (TUM-2019), м. Славське, 29 січня – 2 лютого 2019 року. – С. 69-71.

10. Потоцький І.О. Міжкалібрувальні інтервали засобів вимірювальної техніки / І.О. Потоцький // Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна, 15-16 травня 2019 року. – С. 202-203.

11. Потоцький І.О. Метод встановлення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки / І.О. Потоцький // Тези доповідей V Міжнародної наукової конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2019), м. Вінниця, 29 – 31 жовтня 2019 року. – С. 14-16.

12. Кузьменко Ю.В. Межповерочные интервалы средств измерительной техники / Ю.В. Кузьменко, И.А. Потоцкий // Доклад на Семинаре КООМЕТ «Установление межповерочных интервалов в сфере законодательной метрологии», г. Киев, 11 сентября 2019 года ([https://www.coomet.net/fileadmin/user\\_files/DOCUMENTS/TC\\_documents/TC\\_2/Meetings/19-2019/Seminar\\_Presentation.zip](https://www.coomet.net/fileadmin/user_files/DOCUMENTS/TC_documents/TC_2/Meetings/19-2019/Seminar_Presentation.zip)).

## АНОТАЦІЯ

**Потоцький І.О. Методи встановлення інтервалів калібрування еталонів та засобів вимірювальної техніки. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

Робота полягає у розробленні методів визначення інтервалів між калібруваннями (міжкалібрувальних інтервалів) робочих еталонів та засобів вимірювальної техніки, які застосовуються у випробувальних та калібрувальних лабораторіях, спрямована на забезпечення метрологічної простежуваності, точності та достовірності результатів вимірювань.

У роботі досліджено можливість контролю відповідності метрологічних характеристик еталонів та засобів вимірювальної техніки встановленим нормам із застосуванням контрольних карт накопичених сум (CUSUM-карт). Проведені дослідження показали, що, незважаючи на здатність CUSUM-карт виявляти навіть незначні зміни метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, час отримання сигналів може бути досить тривалим. Проаналізувавши затримку сигналів на CUSUM-картах та недоліки, що їх спричиняють, було запропоновано новий метод ковзної регресії на CUSUM-карті. Метод заснований на порівнянні кута нахилу регресійної лінії, проведеної за кількома послідовними точками на карті, з розрахованим гранично допустимим. Показано теоретично та доведено

експериментально, що застосування методу ковзної регресії дозволяє зменшити час затримки сигналу про вихід метрологічних характеристик еталонів чи засобів вимірювальної техніки за встановлені границі.

Представлено новий підхід до контролю стану засобів вимірювальної техніки шляхом аналізу СКВ результатів спостережень, що вказує на зменшення їх чутливості. Підхід заснований на ймовірнісному аналізі потрапляння СКВ результатів спостережень в певні діапазони розподілу Пірсона. Введено поняття критичної послідовності точок, виникнення якої вказує на зміну чутливості з часом засобу вимірювальної техніки, та коефіцієнт ефективності, який вказує на доцільність застосування того чи іншого підходу. На основі проведених розрахунків та досліджень запропоновано адаптивний алгоритм виявлення критичної послідовності СКВ-точок, який дозволяє контролювати стан робочих еталонів та засобів вимірювальної техніки, спираючись на отримані СКВ результатів спостережень у контрольних точках.

Наведено теоретичне та експериментальне обґрунтування розроблених методів, показано в якому випадку необхідно застосовувати той чи інший метод.

**Ключові слова:** калібрування, міжкалібрувальний інтервал, еталон, засіб вимірювальної техніки, контрольна карта, проміжне перевіряння, метрологічна простежуваність, критична послідовність точок, адаптивний алгоритм.

## АННОТАЦИЯ

**Потоцкий И.А. Методы установления интервалов калибровки эталонов и средств измерительной техники. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 «Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение». – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2020.

Работа заключается в разработке методов определения интервалов между калибровками (межкалибровочных интервалов) рабочих эталонов и средств измерений, применяемых в испытательных и калибровочных лабораториях, направленная на обеспечение метрологической прослеживаемости, точности и достоверности результатов измерений.

В работе исследована возможность контроля соответствия метрологических характеристик эталонов и средств измерений установленным нормам с применением контрольных карт накопленных сумм (CUSUM-карт). Проведенные исследования показали, что, несмотря на способность CUSUM-карт выявлять даже незначительные изменения метрологических характеристик средств измерительной техники, время получения сигналов может быть достаточно длительным. Проанализировав задержку сигналов на CUSUM-картах и недостатки, которые их вызывают, был предложен новый метод скользящей регрессии на CUSUM-карте. Метод основан на сравнении угла наклона регрессионной линии, проведенной по нескольким последовательным точкам на карте, с рассчитанным предельно допустимым. Показано теоретически и доказано экспериментально, что применение метода скользящей регрессии позволяет уменьшить время задержки сигнала о

выходе метрологических характеристик эталонов или средств измерений за пределы установленных границ.

Представлен новый подход к контролю состояния средств измерений путем анализа СКО результатов наблюдений, что указывает на уменьшение их чувствительности. Подход основан на вероятностном анализе попадания СКО результатов наблюдений в определенные диапазоны распределения Пирсона. Введено понятие критической последовательности точек, возникновение которой указывает на изменение чувствительности со временем средства измерительной техники, и коэффициент эффективности, который указывает на целесообразность применения того или иного подхода. На основе проведенных расчетов и исследований предложен адаптивный алгоритм обнаружения критической последовательности СКО-точек, который позволяет контролировать состояние рабочих эталонов и средств измерительной техники, опираясь на полученные СКО результатов наблюдений в контрольных точках.

Приведены теоретическое и экспериментальное обоснование разработанных методов, показано в каком случае необходимо применять тот или иной метод.

**Ключевые слова:** калибровка, межкалибровочный интервал, эталон, средство измерений, контрольная карта, промежуточные проверки, метрологическая прослеживаемость, критическая последовательность точек, адаптивный алгоритм.

#### ABSTRACT

**Pototskiy I.O. Methods of establishing the calibration intervals for standards and measuring instruments. – On rights of the manuscript.**

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.01.02 «Standardization, certification and metrological assurance». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The work is in developing methods for determining the intervals between calibration (recalibration intervals) of working standards and measuring instruments used in testing and calibration laboratories, aimed at ensuring metrological traceability, accuracy and reliability of measurement results. The theoretical and experimental substantiation of the developed methods is given.

Ensuring the unity and metrological traceability of measurement results has become a key component of confidence in experimental procedures based on measurement results. An important aspect of maintaining a laboratory's ability to obtain statistically reliable results is to determine the maximum allowable time interval between two calibrations of standards and measurement equipment. At the same time, it is necessary to solve the problem of ensuring the necessary accuracy of measurements during their use and to establish a real interval between calibrations. Therefore, each test or calibration laboratory that seeks to provide confidence in the results of its own measurements should set recalibration intervals for the equipment used or enter criteria to determine the need for calibration.

The analysis of existing approaches to the determination of the recalibration intervals of measuring equipment is carried out. According to the results, the practice of applying the classical reliability theory for estimation of metrological reliability of measuring equipment, which does not take into account the peculiarities and conditions of

their use, is quite widespread and too generalized. It has been found that methods based on the use of control charts can give timely signals about changes in metrological characteristics of measuring equipment and the need for their calibration.

Theoretical substantiation of expediency using the Shewhart control charts of the mean values with the lines of the exponentially weighted moving averages is given. This allows you to smooth out random «misses» on the control charts, as well as detect long-term, not noticeable for the classic use of control charts, shift (drift) of measuring equipment metrological characteristics. On the basis of the conducted researches a new complex method for detecting the drift of metrological characteristics of measuring equipment was proposed.

The possibility of controlling the conformity of metrological characteristics of standards and measuring instruments with the established normative values with the use of cumulative sum charts (CUSUM-charts) is investigated in the work. The principles of construction of these charts, the features of detecting the moment of change in the metrological characteristics of measuring equipment are shown.

Conducted research have shown that, despite the ability of CUSUM-charts to detect even minor changes in metrological characteristics of measuring equipment, the time of receiving signals depends on the level of statistical significance and can be quite long.

After analyzing the causes of delayed signals on CUSUM-charts and the disadvantages that cause them, a new method of sliding regression on the CUSUM-charts was proposed. The method is based on a comparison of the slope angle of a regression line drawn at several consecutive points on a map, which is constructed using the equivalent straight numerical method, with the calculated maximum allowable. It is shown theoretically and proven experimentally that the use of the sliding regression method allows to reduce the delay time of the signal output of metrological characteristics of standards or measuring equipment beyond the established limits.

A new approach to the control of the state of measurement equipment by analyzing the standard deviation of the results of observations is presented, which reflects a decrease in sensitivity. The approach is based on a probabilistic analysis of the standard deviation entry of the resulting sample into certain Pearson distribution ranges. The concept of critical sequence of points is introduced, the occurrence of which indicates the change of sensitivity over time of the measuring equipment. For this purpose, it is proposed to divide Pearson's distribution into elementary intervals by mode and median. Appropriate calculations have been made and a performance criterion has been introduced that indicates the feasibility of applying an approach.

Based on the performed calculations and researches, an adaptive algorithm for the detection of the critical sequence of standard deviation points is proposed, which allows to control the status of working standards and measuring equipment, based on the obtained standard deviation of measurement results at control points.

Experimental verification of the proposed methods was carried out, in which case it is necessary to apply one or another method.

**Keywords:** calibration, recalibration interval, standard, measuring instrument, control chart, intermediate check, metrological traceability, critical sequence of points, adaptive algorithm.