

ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСУ ЗБЕРЕЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СПРАВНОСТІ ТА ОЦІНЮВАННЯ МІЖКАЛІБРУВАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ЗВТ

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

І. Омельчук, заступник начальника калібрувальної лабораторії, ДП «Житомирстандартметрологія»

Розглянуто основні напрями та принципи оцінювання якості роботи обладнання з точки зору метрологічних характеристик. Також запропоновано метод прогнозування метрологічної справності, заснований на обмеженому обсязі вимірюваних даних, який дозволить провести попереднє оцінювання кількості вимірювань конкретної прилади до першого виходу похибки вимірювань за встановлені межі з метою отримання користувачем реального часу напрацювання, без потреби у повторному юстуванні, та покращення якості продукції внаслідок зменшення браку.

In this paper, the main directions and principles for assessing the quality of the operation of equipment in terms of metrological characteristics are considered. A method

for predicting metrological service is also proposed based on a limited amount of measured data that will allow a preliminary estimation of the measurements number of a particular instrument to the first output of the measurement error beyond the specified limits in order to obtain a real operating time by the user without the need for re-aligning and improving the product quality by reducing marriage.

The use of forecasting methods, parameters of measuring equipment and requirements to measurement accuracy, allows to calculate the number of measurement cycles that a measuring instrument can do without recalibration with the help of a reference base available in calibration laboratories. So, following the calculated calibration time with the help of predictable behavior data of the measuring instrument, the laboratory can provide a regulated quality of research.

Ключові слова: метрологічна справність, міжкалібрувальний інтервал, метрологічні характеристики, якість, похибки вимірювань.

Keywords: metrological service, intercalibration interval, metrological characteristics, quality, measurement errors.

На сьогодні багато науковців працює над розробленням методів оцінювання метрологічних характеристик та метрологічної надійності. Існують рекомендації та стандарти європейських розробників щодо визначення і коригування міжкалібрувальних інтервалів [1—3] та рекомендації й стандарти провідних корпорацій, наприклад [4—5].

Відсутність єдиних універсальних практичних рекомендацій щодо встановлення і коригування міжкалібрувальних інтервалів призвело до необхідності розроблення настанов щодо визначення міжкалібрувального інтервалу.

Над проблемою міжкалібрувальних інтервалів працюють також і українські науковці. Так, в Національному університеті "Львівська політехніка" (кафедра метрології, стандартизації та сертифікації) розроблено алгоритм оцінювання метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) на основі коефіцієнта метрологічного запасу та середньої частоти метрологічних відмов однотипних ЗВТ [6—7].

У монографії [8] подано алгоритми і програми в математичних редакторах *MathCAD* і *EXCEL*, спрямовані на вирішення проблем управління масивами даних, що формуються в різних сферах професійної

діяльності, та способи прогнозування їх поведінки у часі. Одним із напрямів є керування надійністю засобів вимірювання у відповідності з міжнародними вимогами щодо контролю якості вимірювального обладнання. До методів вирішення таких проблем відноситься ймовірнісна оцінка метрологічної справності приладів за мірою виконання первинних та періодичних повірок (калібрувань), а також обґрунтування чи коригування міжповірочних інтервалів.

У процесі проведення процедури калібрування часто виникає ситуація, коли результати деяких вимірювань суттєво відрізняються від інших («промахи»). Тому потрібно користуватися методами оцінювання та усунення таких результатів вимірювань. Як приклад таких методів можна навести [9], де представлено два надійних методи оцінювання вартості та невизначеності вимірюваної величини зі зразків невеликої кількості експериментальних даних. Вони дозволяють встановлювати достовірні статистичні параметри вимірювань із використанням усіх експериментальних даних.

Актуальність цієї теми полягає в узагальненні та адаптації статистичних методів опрацювання результатів калібрувань, з метою розроблення способу оцінювання міжкалібрувального інтервалу, який

задовольняв би вимоги калібрувальних лабораторій, відносно простоти та універсальності.

За умов прямування України до Європейського Союзу перед промисловістю постає ряд нових завдань стосовно модернізації та вдосконалення виробництва. Одним із них є впровадження європейських стандартів, підходів до контролю якості роботи обладнання як випробувального, так і лабораторного, і технологічного. Одне із актуальних питань підтримання справної роботи обладнання — підтримання його метрологічних характеристик у межах, що задекларовані технологією. Тож питання частоти проведення градування обладнання постає гостро у сферах аналітичної хімії, технологічного обладнання та випробувальних лабораторій. Тому розроблення методів контролю якості роботи ЗВТ за реальних умовах експлуатації та оцінювання показників метрологічної надійності конкретних промислових ЗВТ є гострою потребою підвищення якості вимірвальних процесів на сучасних виробництвах, у лабораторній та медичній практиці.

Мета роботи — узагальнення наявних методів, які відомі на сьогодні, та адаптація їх до умов використання в метрологічній практиці.

Методи статистичного моделювання нині широко використовуються в процесах економічних розрахунків та прогнозів. Статистичні методи опрацювання результатів — більш гнучкі щодо можливості оцінювання конкретного ЗВТ, й їх використання дозволяє провести аналіз якості результатів вимірювань, приладу, навіть за умови обмеженої можливості використання еталонної бази та з невеликим масивом вхідних даних.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Зважаючи на трактування [10], часовий ряд — це множина спостережень, отримуваних послідовно у часі. Якщо час змінюється дискретно, часовий ряд називається дискретним. Перехід від моменту одного спостереження до моменту наступного прийнято називати кроком. Якщо значення членів часового ряду точно визначено будь-якою математичною функцією, то часовий ряд називається детермінованим. Якщо ці значення можна описати лише за допомогою розподілу ймовірностей, часовий ряд називається випадковим. Явище, що розвивається у часі згідно із законом теорії ймовірностей, називається стохастичним процесом. У подальшому його називатимемо просто процесом. Аналізований відрізок часового ряду може розглядатися як одна часткова реалізація (вибірка) досліджуваного стохастичного процесу, що генерується прихованим ймовірнісним

механізмом [10]. Також у [10] представлено методи прогнозування часових рядів різного типу та алгоритми оцінювання рядів за допомогою адаптивних методів. Представлені адаптивні методи мають такі властивості:

- застосовні для широкого кола завдань;
- адаптивне прогнозування не вимагає великого обсягу інформації, воно базується на аналізі інформації, що міститься в окремих часових рядах;
- модель, що описує структуру показника та його динаміку, як правило, відрізняється ясністю й простотою математичного формулювання.

На часовий ряд впливають у різний час різні фактори. Одні з них за тими або іншими причинами послаблюють свій вплив, інші впливають активніше. Отже, реальний процес проходить за мінливих умов, зумовлених його зовнішнім середовищем, до якого він пристосовується, адаптується. А модель, у свою чергу, адаптується до ряду, що представляє цей процес.

Як видно із наведеного вище визначення, результати вимірювань, отримані за допомогою будь-якого ЗВТ, можуть бути розглянуті як дискретний стохастичний часовий ряд, з певним кроком, який за умов конкретної лабораторії також є різним і визначає частоту вимірювань за допомогою певного ЗВТ. Очевидно, що для кожної лабораторії цей показник є індивідуальним.

Для описання часових рядів використовують математичні моделі.

Часовий ряд x_t , що генерується деякою моделлю, можна представити у виді двох компонентів

$$x_t = \xi_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де величина ε_t генерується випадковим неавтокорельованим процесом із нульовим математичним очікуванням і кінцевою (не обов'язково постійною) дисперсією, а величина ξ_t може бути генерована або детермінованою функцією, або випадковим процесом, або будь-якою їхньою комбінацією. Величини ξ_t і ε_t відрізняються характером впливу на значення наступних членів ряду. Змінна ε_t впливає лише на значення синхронного їй члена ряду, тоді як величина ξ_t певною мірою визначає значення декількох або всіх наступних членів ряду. Через величину ξ_t здійснюється взаємодія членів ряду; отже, в ній утримується інформація, необхідна для отримання прогнозів. Найпростіша адаптивна модель ґрунтується на обчисленні так званої експонентної середньої.

Виявлення й аналіз тенденції динамічного ряду часто проводиться за допомогою його вирівнювання або згладжування. Експонентне згладжування —

МІЖКАЛІБРУВАЛЬНІ ІНТЕРВАЛИ

один із найпростіших і поширених приймань вирівнювання ряду. В його основі — розрахунки експонентних середніх.

Експонентне згладжування ряду здійснюється за рекурентною формулою:

$$S_t = \alpha \cdot x_t + \beta \cdot S_{t-1}, \quad (2)$$

де S_t — значення експонентної середньої в момент часу t ; α — параметр згладжування ($\alpha = \text{const}$, $0 < \alpha < 1$); $\beta = 1 - \alpha$.

Вираз (2) можна переписати як

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) S_{t-1} = S_{t-1} + \alpha(x_t - S_{t-1}). \quad (3)$$

Експонентна середня на момент часу t виражена як експонентна середня попереднього моменту плюс частка в різниці поточного спостереження й експонентної середньої минулого моменту.

Якщо послідовно використовувати рекурентне співвідношення (2), то експонентну середню S_t можна виразити через значення часового ряду x :

$$\begin{aligned} S_t &= \alpha x_t + \beta S_{t-1} = \alpha x_t + \alpha \beta x_{t-1} + \beta^2 S_{t-2} = \dots \\ &= \alpha x_t + \alpha \beta x_{t-1} + \alpha \beta^2 x_{t-2} + \dots + \alpha \beta^{t-1} x_1 + \beta^t S_0 = \\ &= \alpha \sum_{i=0}^{t-1} \beta^i x_{t-i} + \beta^t S_0, \end{aligned} \quad (4)$$

де N — кількість членів ряду; S_0 — деяка величина, що характеризує початкові умови для першого застосування формули (2) за $t = 1$.

Отже,

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{t-1} \beta^i x_{t-i}. \quad (5)$$

Отже, величина S_t виявляється зваженою сумою всіх членів ряду. Причому вага падає експоненційно, залежно від давнини («віку») спостереження. Це й пояснює, чому величину S_t названо експонентною середньою.

Як видно із наведеного вище, експонентна середня може бути успішно застосована для оцінювання даних калібрування.

У такому випадку моделлю можуть слугувати вимірені дані або оцінена невизначеність, яка включає всі складові, які впливають на результат вимірювання.

Для прикладу взято дані калібрування термостата TC-802 (свідчення про калібрування №1692 від 30.03.17), який є низькотемпературним рідинним термостатом. Під час проведення розрахунків

Результати калібрування термостата TC-802

Calibration results of thermostat TC-802

№ вимірювань	Температура, °C			Похибка, °C	
	установлена	вимірена	прогнозована	вимірювання	прогнозування
1	37,00	37,70	-	-	-
2	37,00	38,40	-	-	-
3	37,00	40,20	-	-	-
4	37,00	39,20	-	-	-
5	37,00	38,10	-	-	-
6	37,00	37,10	-	-	-
7	37,00	36,90	-	-	-
8	37,00	37,00	-	-	-
9	37,00	37,60	-	-	-
10	37,00	37,90	-	-	-
11	37,00	37,40	37,01	0,40	0,01
12	37,00	37,50	37,21	0,50	0,21
13	37,00	37,60	37,60	0,60	0,60
14	37,00	37,60	37,62	0,60	0,62
15	37,00	37,70	37,13	0,70	0,13
16	37,00	36,90	37,33	0,10	0,33
17	37,00	37,70	37,55	0,70	0,55
18	37,00	37,60	37,48	0,60	0,48
19	37,00	37,30	37,23	0,30	0,23
20	37,00	37,30	37,39	0,30	0,39
21	37,00	37,30	37,49	0,30	0,49
22	37,00	37,40	37,41	0,40	0,41
23	37,00	37,40	38,29	0,40	0,29
24	37,00	37,50	37,41	0,50	0,41
25	37,00	37,40	37,45	0,40	0,45
26	37,00	37,40	37,39	0,40	0,39

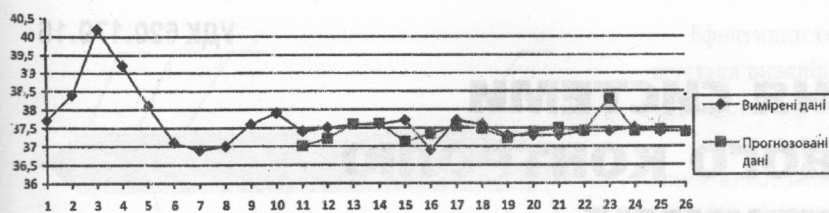


Рис. 1. Графічне зображення вимічених та прогнозованих даних

Fig. 1. Graphic representation of measured and predicted data

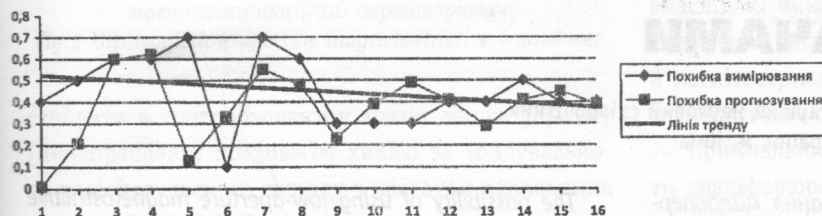


Рис. 2. Графічне зображення виміреної та прогнозованої абсолютної похибки

Fig. 2. Graphical representation of the measured and predicted absolute error

прогнозованих даних взято вибірку із 20 послідовних вимірів температури. При цьому 10 перших вимірів взято як дані для побудови поліному експонентного згладжування ряду, що здійснюється за рівнянням (4). Результати розрахунків наведено у таблиці.

Як видно із зазначених вище даних, прогнозовані дані корельовані з дійсними виміреними значеннями і повторюють коливальний характер зміни температури у камері термостата. Похибка прогнозування незначна, що дає можливість застосову-

вати цей метод розрахунків у вимірювальних системах виробництва та для прогнозування поведінки виробничих і лабораторних засобів вимірювальної техніки. Графічне зображення результатів розрахунків наведено на рис. 1—2.

Як видно із графіків, прогнозна модель описує розвиток процесу в часі, з певною затримкою, що є наслідком використання ретроспективних даних.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБЛЕНЬ

Отже, застосовуючи методи прогнозування і знаючи параметри ЗВТ, що застосовуєть-

ся в лабораторії, та вимоги до точності вимірювань, що регламентується у певній лабораторії, можна розрахувати ту кількість циклів вимірювання, яку може забезпечити ЗВТ без перекалібрування — повторно-юстування за допомогою еталонної бази, наявної в лабораторії або в калібрувальних лабораторіях.

Дотримуючись розрахованих термінів юстування за допомогою прогнозованих даних поведінки ЗВТ, лабораторія може забезпечити регламентовану якість досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Рекомендации *EUROLAB*–Украина по внедрению требований *ISO/IEC 17025: 2005* в практику испытательных и калибровочных лабораторий (Recommendations *EUROLAB-Ukraine* on the implementation of requirements *ISO/IEC 17025: 2005* in the practice of testing and calibration laboratories)
2. EA-4/02 M Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration. — 2013
3. ILAC-G24:2007 / OIML D 10:2007 Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments // International Laboratory Accreditation Cooperation. — 2007.
4. The SAC Accreditation Programme "Calibration intervals of measuring instruments. Specific Requirements for Calibration and Measurement Laboratories" // Technical Notes MET 001. — Feb. 2010.
5. ESYD GA 1 /01/06/20-06-2007 Guidance on the application of the laboratory accreditation criteria. Measurement and calibration systems // Hellenic Accreditation System S.A.
6. Микийчук М.М. Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення: дис. д-ра техн. наук / М.М. Микийчук. — Львів (Мукиччук М. Metrological assurance of product quality at the manufacturing stage: dissertation doctor of science. — Lviv), — 2012. — С./P. 292.
7. Микийчук М.М. Актуальні питання метрологічної надійності промислових ЗВТ / М.М. Микийчук // Методи та прилади контролю якості (Мукиччук М. Actual questions of metrological reliability of industrial tools of measuring equipment // Methods and instruments of quality control: Sci.-Tech. Journal of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas). — 2009. — № 23. — С./P. 126—129.
8. Ефремов Л.В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. — СПб: Нестор-история (Efremov L. Probabilistic estimation of metrological reliability of measuring instruments: algorithms and programs. — Sankt-Peterburg: Nestor-history), — 2011. — 200 с.
9. E. Volodarsky, Z.L. Warsza. Examples of Robust Estimation with Small Number of Measurements // Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. Volume 3 Measuring Techniques and Systems. — 2015. — pp. 285—291.
10. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. — М.: Финансы и статистика (Lukashin Yu. Adaptive methods of short-term forecasting of time series — Moscow: Finance and Statistics), — 2003. — 416 с./p.