

Науково-практичний журнал

МЕТРОЛОГІЯ ТА ПРИЛАДИ

1/2024

Metrology and Instruments



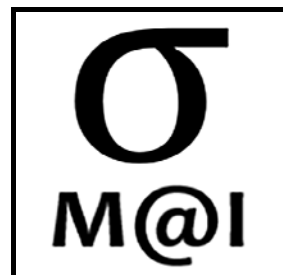
ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564



Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National University
of Radio Electronics



Метрологія та прилади

Metrology and Instruments

2024, № 1

2024, No. 1

Щопіврічний науково-практичний журнал

Заснований у 2006 році

У журналі публікуються результати досліджень з теоретичної, законодавчої та прикладної метрології, стандартизації та сертифікації, вимірювання та забезпечення якості, експлуатації та розробки сучасних інформаційно-вимірювальних приладів та систем. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, співробітників калібрувальних та випробувальних лабораторій, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

Засновник і видавець:

Харківський національний університет
радіоелектроніки

Кафедра:

Інформаційно-вимірювальних технологій,
пр. Науки, 14, 61166, м. Харків, Україна

Телефон: +38 (057) 702-13-31

E-mail редколегії:

mi@nure.ua

Інформаційний сайт:

<http://mi.nure.ua>

Biannual scientific and practical journal

Founded in 2006

The journal publishes the research study on theoretical, legislative and applied metrology, standardization and certification, measurement and quality assurance, usage and development of modern information and measurement instruments and systems. The journal is intended for researchers, lecturers, employees of calibration and testing laboratories, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

Founder and publisher:

Kharkiv National University
of Radio Electronics

Department:

Information and Measurement Technology
61166, Ukraine, Kharkiv, Nauka ave., 14

Phone: +38 (057) 702-13-31

E-mail of the editorial board:

mi@nure.ua

Information site:

<http://mi.nure.ua>

Затверджений до друку Науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол від 28 листопада 2024 року № 11/2).

Ідентифікатор медіа R30-04584 згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 23.05.2024 № 1772

Включений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії" до категорії Б – наказом Міністерства освіти і науки України №886 від 17.03.2020. (зі змінами від 02.07.20)

Харків • 2024

© Харківський національний університет радіоелектроніки

Редакційна колегія

Головний редактор:

ЗАХАРОВ Ігор Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Члени редакційної колегії:

БАКЛАНОВ Олександр Миколайович
(*д-р хім. наук, проф., Харків, Україна*);
БІК Вальтер
(*д-р фізики, Турін, Італія*);
БОДНАР Ольга
(*д-р наук, Гейттерсберг, США*);
ВАРША Зігмунд
(*д-р філософії, доцент, Варшава, Польща*);
ВІТКОВСЬКИЙ Віктор
(*д-р наук, доцент, Братислава, Словачія*);
ДОРОЖОВЕЦЬ Михайло Миронович
(*д-р техн. наук, проф., Жешув, Польща*);
ДЯКОВ Димитр
(*д-р наук, проф., Софія, Болгарія*);
КОШОВИЙ Микола Димитрович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛІРА Ігнасіо
(*д-р філософії, проф., Сантьяго, Чілі*);
МІЛУШЕВ Георгій
(*д-р філософії, доцент, Софія, Болгарія*);
МИГУЩЕНКО РУСЛАН ПАВЛОВИЧ,
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ПЕНЕККІ Франческа
(*д-р філософії, Турін, Італія*);
ПОЛЯРУС Олександр Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
СКУБІС Тадеуш
(*д-р техн. наук, проф., Глівіце, Польща*);
ТРІЩ Роман Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ФОРБС Алістер
(*магістр, Теддінгтон, Велика Британія*);
ЮРЧЕНКО Олег Іванович
(*д-р хім. наук, проф., Харків, Україна*);

Відповідальний секретар:

ДЕГТЯРЬОВ Олександр Валентинович
(*канд. техн. наук, доц., Харків, Україна*).

Editorial board

Editor-in-Chief:

Igor ZAKHAROV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Editorial board members:

Oleksandr BAKLANOV
(*Dr. Sc. (Chem.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Walter BICH
(*Dr. Sc. (Phys.), Turin, Italy*);
Olha BODNAR
(*Dr. Sc., Gaithersburg, USA*);
Zygmunt WARSZA
(*Ph.D, Ass. prof., Warsaw, Poland*);
Viktor WITKOVSKY
(*RNDr., Ass. prof., Bratislava, Slovakia*);
Mykhaylo DOROZHOVETS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Rzeszów, Poland*);
Dimitar DIAKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Sofia, Bulgaria*);
Mykola KOSHOVYI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Ignacio LIRA
(*Ph.D, Prof., Santiago, Chile*);
George MILUSHEV
(*Ph.D, Ass prof., Sofia, Bulgaria*);
Ruslan MYGUSHCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Francesca PENECCHI
(*Ph.D, Turin, Italy*);
Oleksandr POLIARUS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Tadeusz SKUBIS
(*Dr. Sc., Prof., Gliwice, Poland*);
Roman TRISCH
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Alistair FORBES
(*M. Sc. Teddington, United Kingdom*);
Oleg Yurchenko
(*Dr. Sc. (Chem.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Responsible secretary:
Oleksandr DEGTJARJOV
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

З М І С Т

КАЛІБРУВАННЯ

<i>Босілков Крассімір, Ніколова Олена, Спасова Сніжана</i> Калібрування цифрових гігрометрів (eng.)	5
--	---

<i>Новосєлов О.А.</i> Щодо питання стандартизації методик калібрування робочих еталонів	9
---	---

ВИМІРЮВАННЯ

<i>Боціюра О.А., Задорожна І.М., Захаров І. П.</i> Оцінювання невизначеності вимірювань координат об'єкту на площині гоніометричним методом (eng.)	15
---	----

<i>Юрченко О.І., Шевченко І.Р., Бакланова Л.В., Черножук Т.В., Бакланов О.М.</i> Полум'яно-фотометричне визначення сульфат-іонів у водах з використанням ультразвуку	19
--	----

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ПРИЛАДИ

<i>Кошовий М.Д., Павлик Г.В.</i> Розробка нових та удосконалених діючих волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин.....	25
--	----

<i>Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Плєснецов С.Ю., Кошкарєв Ю.Ю., Кальницький М.Е.</i> Моделювання імпульсних джерел магнітного поля портативних ультразвукових електромагнітно- акустичних перетворювачів для вимірювань, контролю та діагностики.....	28
--	----

<i>Горкунов Б., Львов С., Олійник В., Вєвєнко В.</i> Розширення функціональних можливостей електромагнітних методів і пристроїв контролю механічних напруг у металевих циліндричних виробах.....	32
--	----

ЯКІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ

<i>Полярєс О.В., Коваль О.А., Коваль А.О., Мєдведєвська Я.С.</i> Метод виявлення аномальних змін у функціонуванні технічного об'єкту з використанням декомпозиції сингулярних значень матриці експериментальних даних (eng.)	37
--	----

TABLE OF CONTENTS

CALIBRATION

<i>Krasimir Bosilkov, Elena Nikolova, Snezhana Spasova</i> Calibration of digital hygrometers	5
--	---

<i>Novoselov O.A.</i> On the issue of standardization of procedures for cali- bration of working standards.....	9
---	---

MEASUREMENT

<i>Botsiura O.A., Zadorozhna I.M., Zakharov I.P.</i> Measurement uncertainty evaluation of object coordinates in plane by the goniometric method	15
---	----

<i>Yurchenko O.I., Shevchenko I.R., Baklanova L.V., Chernozhuk T.V., Baklanov O.M.</i> Flame-photometric determination of sulfate ions in water using ultrasound.	19
--	----

MEASURING TRANSDUCERS AND INSTRUMENTS

<i>Koshovyi M.D., Pavlyk H.V.</i> Development of new and improvement of operation fiber-optic conversion of physical quantities	25
--	----

<i>Suchkov H.M. Mygushchenko R.P., Pliesnetsov S.Yu. Koshkarov Yu.Yu., Kalnytsky M.E.</i> Simulation of pulse magnetic field sources of portable ultrasound electromagnetic-acoustic transducer for measurements, control and diagnostics	28
--	----

<i>Boris Gorkunov, Lvov Serhii, Vasyl Oliinyk, Vevenko Vitaliy</i> Expansion of the functional capabilities of electromagnetic methods and devices for monitoring mechanical stresses in metal cylindrical products	32
---	----

QUALITY OF TECHNICAL SYSTEMS AND PROCESSES

<i>Oleksandr Poliarus, Oleksandr Koval, Andrii Koval, Yana Medvedovska</i> Method of detecting abnormal changes in the functioning of a technical object using singular values decomposition of experimental data matrix.....	37
---	----

*Триш Р.М., Яковлев М.Ю.,
Бурдейна В.М., Хом'як Е.А.,
Гуртовий І.І., Євтушенко А.О.*

Кваліметричний метод оцінювання ризиків
виробництва продукції низької якості 44

*Roman Trishch, Maxym Yakovlev,
Viktoriia Burdeyna, Eduard Khomyak,
Ivan Gurtovyi, Andrii Yevtushenko*

Qualimetric method of assessing the risks of producing
poor-quality products 44

ЯКІСТЬ НАВЧАННЯ

Мощенко І.О., Запорожець О.В.

Технологія реалізації моделі управління якістю
“Lean Six Sigma” в закладах вищої освіти.
Частина 1: Ідентифікація та вимірювання
освітнього процесу, критичного до якісних
характеристик (eng.) 51

*Козлов Ю.В., Дегтярьов О.В.,
Василющенко Л.В., Унгер В.М.*

Метод оцінювання рівня навченості суб'єкта
навчання 59

QUALITY OF EDUCATION

Inna Moshchenko, Oleh Zaporozhets

Technology for implementing the “Lean Six Sigma”
quality management model in higher education
institutions. Part 1: Identification and measurement
of the educational process critical to quality
characteristics 51

*Yurii Kozlov, Oleksandr Degtyarev,
Lina Vasylyushchenko, Viktor Unger*

Method for assessing the training of the subject
of study 59

————— ✦ —————
За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей
відповідальність несе автор.

CALIBRATION OF DIGITAL HYGROMETERS

Krasimir Bosilkov, Elena Nikolova, Snezhana Spasova

Metrological Assurance Department Nuclear Power Plant, Kozloduy, Bulgaria

Abstract

This paper reports information about calibration of digital hygrometers in the range of 10 %rh to 95 %rh. A procedure has been developed in the NPP "Temperature measurements" Laboratory. The hygrometers has been calibrated against the standard digital hygrometer with metrological traceability to SI units. The process of obtain the reading of standard hygrometer is automated. The measurement model relating the input quantities with output quantity has been developed. Paper also describes the details of estimation and expression the expanded uncertainty of measurement.

The laboratory demonstrates its measurement competence in relative humidity area by participation in the proficiency testing scheme by interlaboratory comparison BIM-T-RH-2023-01. The results are presented and analyzed. The aims of this comparison are to evaluate the performance of laboratories and to confirm their technically competence in the field of relative humidity measurements.

Keywords: metrology, digital hygrometer, calibration, uncertainty, iinterlaboratory comparison

1. Introduction

The measurement and control of relative humidity plays a significant role in the industry, pharmaceutical, textile, food including various sectors such as electrical plays a significant role in and aerospace. Its need is increasing day by day with the modernization of industries and awareness of quality system.

The main activities of laboratory are: ensuring traceability of measurements in the NPP by calibration to SI units, performance of metrological control of measuring instruments.

The need to calibrate a large number of hygrometers used for environmental monitoring in an industrial plant such as Kozloduy NPP requires developing the procedure of calibration, according to ISO/IEC 17025 [1].

The detailed study of the uncertainty associated with the measurement has been evaluated and discussed.

2. Calibration procedure

Calibration of Hygrometers is carried out by a comparison method with a Standard Hygrometers by measuring the relative humidity in a chamber (Humidity Generator).

The measuring probe of the calibrated hygrometer and the probe of the reference hygrometer are placed in the generator chamber, so that their sensitive elements are as close as possible to each other to reduce the influence of the chamber gradient. When the set relative humidity is stabilized the readings of the calibrated and reference hygrometers are compared and the values of relative humidity and its associated uncertainty, expressed in the unit %rh, are determined for the corresponding reading of the calibrated hygrometer.

The mathematical model of the reference relative humidity value has been developed with following form:

$$W_{std} = \bar{W}_{std} + \delta W_{std} + \delta W_{drift} + \delta W_{linr} + \delta W_{grad} + \delta W_{inst}, \quad (1)$$

where $\bar{W}_{std}$ is the humidity measured by a reference hygrometer; δW_{std} is the correction of reference hygrometer taken from its calibration certificate; δW_{drift} is correction due to the drift of the reference hygrometer, δW_{linr} is correction due to nonlinearity; δW_{grad} is correction due to gradient in the humidity generator chamber; δW_{inst} is correction due to instability the humidity generator chamber.

The mathematical model of the measured relative humidity value with calibrated hygrometer has the following form:

$$W_c = \bar{W}_c + \delta W_{res} + \Delta W, \quad (2)$$

where: $\bar{W}_c$ is the humidity measured by calibrated hygrometer; δW_{res} is correction due to resolution of the calibrated hygrometer; ΔW is correction for the difference between the actual and measured relative humidity.

The input quantities for the reference and measured relative humidity are evaluated. Correction δW_{std} is taken or calculated from the calibration certificate of the reference hygrometer. The estimated values of the remaining inputs have a zero mathematical expectation.

The standard uncertainty of measurement of the input quantities for the reference and measured relative humidity value are determined.

When evaluating the value of the reference and measure relative humidity the impact of the input quantities, the functional dependence is linear and the sensitivity coefficients are equal to unity.

The expanded uncertainty of a digital hygrometer measurement defines the interval around the measurement result. This interval is assumed to cover a large part of the distribution of values that could be attributed to the humidity measurement at a given point with coverage factor $k=2$, corresponding to a confidence interval of approximately 95%.

3. METCAL automated calibration procedure

Automated calibration web base software METTEAM has been implemented in the NPP Metrological Assurance Department. METCAL automated calibration procedure for Digital

Hygrometers has been created based on the developed methodology 82.MO.00.MT.1868/00 [2].

METCAL automated calibration procedure is created for digital hygrometer, type Testo 645.

The measuring instrument is used as proficiency testing (PT) item in PT scheme, in which the NPP lab was participated. The user screen in the METCAL Editor is shown in Fig. 1.

The results of digital hygrometer calibration using METCAL automated calibration procedure (Fig. 2) confirm the results reported in interlaboratory comparison describe below. This allows METCAL automated calibration procedure to be used for calibration of digital hygrometers.

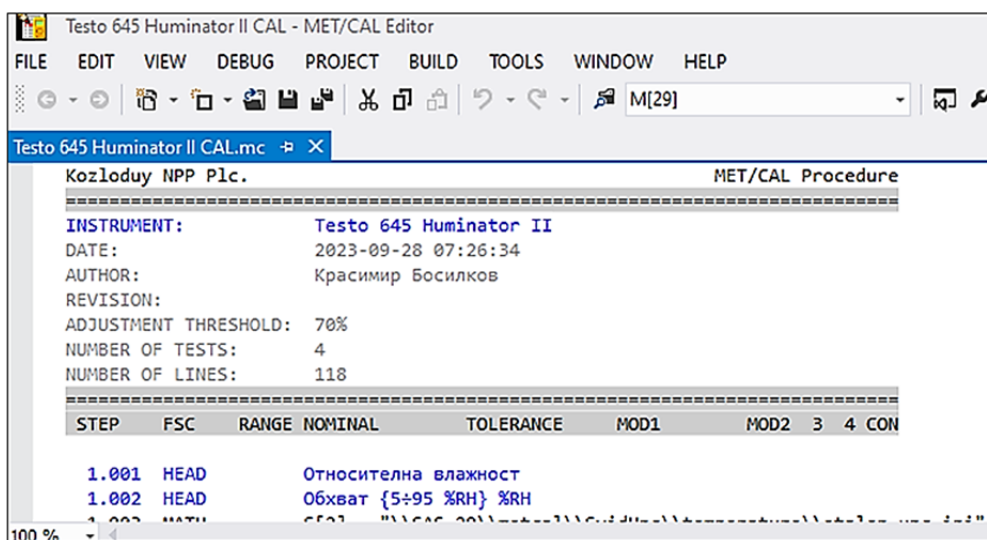


Fig. 1. User screen in METCAL Editor

РЕЗУЛТАТИ ОТ КАЛИБРИРАНЕ:					
Met/Cal процедура: Testo 645 CAL Huminator II					
MET/CAL Results			In Tolerance	0-WLT-1054237	
Точка на калибриране	Зададена стойност	Измерена стойност	Отклонение	Оценена стойност	Неопределеност
5÷95 %RH					
30.00 %RH		30,0 %RH	0,55 %RH	29,5 %RH	2,9 %RH
50.00 %RH		50,0 %RH	-0,10 %RH	50,1 %RH	2,9 %RH
70.00 %RH		70,0 %RH	-0,40 %RH	70,4 %RH	2,9 %RH

Fig. 2. Calibration results from METCAL procedure

4. Interlaboratory comparison

The NPP laboratory has been participated in proficiency testing (PT) scheme by interlaboratory comparison BIM-T-RH-2023-01 with individual code 23RH-2.

The specific task of this comparison was to calibrate digital hygrometer. The points of the measurements were agreed to be 30 %rh, 50 %rh and 70 %rh.

Four laboratories took part in the comparison. The Bulgarian Institute of Metrology (BIM), which is accredited PT provider, according to EN ISO/IEC 17043/2023 [3] was the reference laboratory. The comparison was organized and conducted by BIM.

The reported results and associated uncertainties were used for the calculation of criteria E_n .

A. PT Item

The PT item (subject of comparison) was a standard digital hygrometer, Testo 645 with measurement sensor and range from 0 %rh to 100 %rh.

The PT item was chosen to provide sufficiently small uncertainty of the reference value with the calibration and measurement capabilities of the participants.

The PT item was demonstrated to be sufficiently stable to ensure that they will not undergo any significant change throughout the conduct of the PT

round, including storage and transportation. A method of comparison measurement was used.

B. Reference value

The assigned values (X_{REF}) are determined by standard dew point hygrometer S4000 with metrological traceability to PTB Germany. The assigned values and their associated uncertainties are determined in line with procedure of PT provider.

The X_{REF} is calculated using the formula:

$$X_{REF} = \frac{\Delta RH_1 + \Delta RH_2}{2}, \quad (3)$$

where: ΔRH_1 is the difference between measured by PT item value and reference relative humidity value, determined before participants; ΔRH_2 is the difference between measured by PT item value and reference relative humidity value, determined after participants;

The uncertainty of the X_{REF} was determined using the following formula:

$$u_{REF} = \sqrt{u^2(X_{REF}) + u^2(X_{STAB})}, \%rh. \quad (4)$$

where: $u(X_{REF})$ is the standard uncertainty of the reference laboratory; $u(X_{STAB})$ is the additional component of the stability of the PT item for the period of the performance of the comparison.

The expanded uncertainty of X_{REF} :

$$U_{REF} = 2u_{REF}, \quad (5)$$

where: $k=2$ is coverage multiplier corresponding to a confidence interval of approximately 95%.

C. Performance of the labs

The purpose is to present the deviation from the assigned value. The performance was evaluated by using E_n criteria.

The criteria are calculated using the formula:

$$E_n = \frac{X_{LAB} - X_{REF}}{\sqrt{U_{LAB}^2 + U_{REF}^2}}, \quad (6)$$

where: X_{LAB} is the result from participant; X_{REF} is the assigned value; U_{LAB} is the expanded measurement uncertainty of a participant's result; U_{REF} is the expanded uncertainty of the assigned value.

Performance is usually evaluated relative to conventional performance criteria as follows:

- the result is acceptable and generates no signal when $|E_n| < 1,0$;
- the result is not acceptable and generates an action signal when $|E_n| \geq 1,0$.

D. Analysis of the results

The results were published in the Final report dated 07 November 2023 [7]. The differences between the results of the participating laboratories were presented graphically in groups in comparison to the reference laboratory $X_{LAB} - X_{REF}$ for each measurement point together with associated expanded uncertainty, Fig. 3,4 and 5.

For each measured value of each laboratory, the obtained results of the criteria $|E_n|$ were presented graphically.

The results of NPP lab are acceptable, $|E_n| < 1,0$ for all points of calibration, Fig. 6,7 and 8. The desire outcome is for the $|E_n|$ value to be as close to zero as possible.

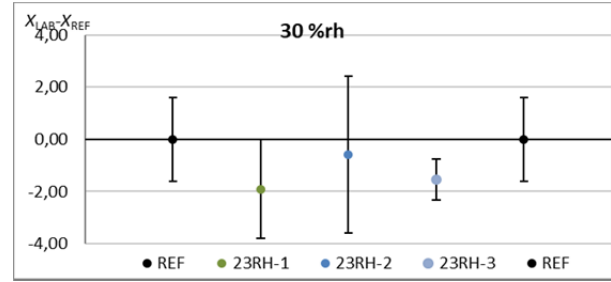


Fig. 3. The differences between the results of the participating laboratories in point 30 %rh

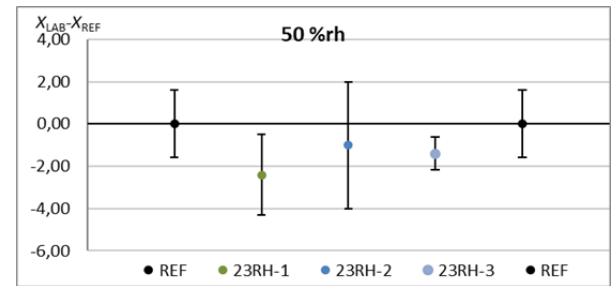


Fig. 4. The differences between the results of the participating laboratories in point 50 %rh

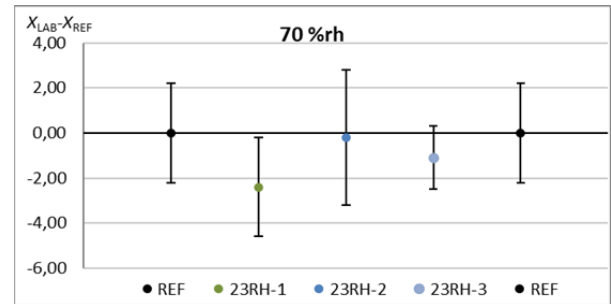


Fig. 5. The differences between the results of the participating laboratories in point 70 %rh

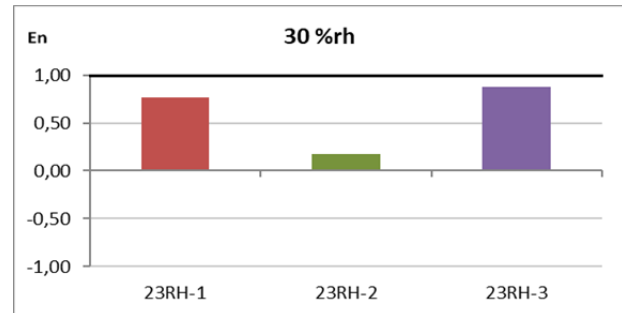


Fig. 6. Criteria E_n in point 30 %rh

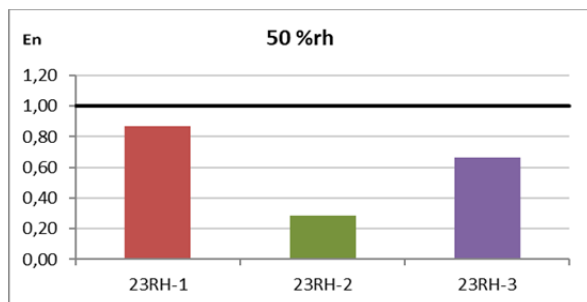


Fig. 7. Criteria E_n in point 50 %rh

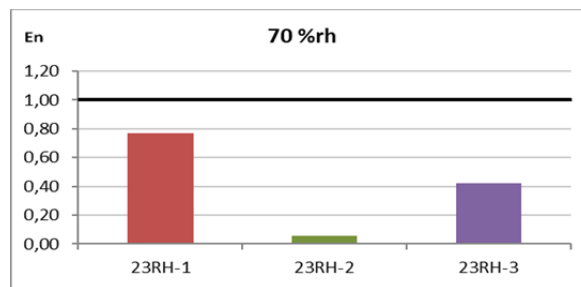


Fig. 8. Criteria E_n in point 70 %rh

5. Conclusion

The participation of NPP Temperature Measurements Laboratory in the BIM-T-RH-2023 shows that:

- the laboratory demonstrates that it is technically competent and can produce technically valid results in calibration it performs for its clients;

- the laboratory met the general requirements defined in ISO/IEC 17025 and confirmed the efficiency of the procedures, instructions and other technical documentation needed to ensure the results of the digital hygrometer calibration;

- the laboratory improved its claimed calibration and measurement capabilities (CMC) and may reduce it.

References

- 1.EN ISO/IEC 17025:2017 – General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories.
- 2.82.MO.00.MT.1868/00 – Procedure for Calibration of Digital Calibration.
- 3.EN ISO/IEC 17043:2023 – Conformity Assessment. General Requirements of Proficiency Testing Provider.
- 4.JCGM100:2008 Evaluation of Measurement Data. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. BIPM, Sèvres, France;
- 5.ISO IEC Guide 2014, International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3);
- 6.Technical protocol BIM-T-RH-2023-01- Calibration of a Digital Hygrometer;
- 7.Final report dated 17 November 2023 on the proficiency testing scheme by inter-laboratory comparison BIM-T-RH-2023-01.

Надійшла (Received) 14.01.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 16.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Красимір Босілков – керівник лабораторії вимірювання температур відділу метрологічного забезпечення атомної електростанції Козлодуй, Болгарія; e-mail: kkbosilkov@npp.bg.

Krasimir Bosilkov – Head of temperature measurement laboratory of metrological assurance department of Nuclear Power Plant, Kozloduy, Bulgaria; e-mail: kkbosilkov@npp.bg.

Олена Ніколова – Головний експерт з метрологічного забезпечення атомної електростанції Козлодуй, Болгарія; e-mail: enikolova2@npp.bg.

Elena Nikolova – Chief expert in metrological assurance of Nuclear Power Plant, Kozloduy, Bulgaria; e-mail: enikolova2@npp.bg.

Сніжана Спасова – експерт-метролог відділу метрологічного забезпечення АЕС, Козлодуй, Болгарія; e-mail: sgspasova@npp.bg @ npp.bg

Snezhana Spasova – expert metrologist of metrological assurance department of Nuclear Power Plant, Kozloduy, Bulgaria; e-mail: sgspasova@npp.bg @ npp.bg

Калібрування цифрових гігрометрів

Красимір Босілков, Олена Ніколова, Сніжана Спасова

Анотація

У цьому документі міститься інформація про калібрування цифрових гігрометрів у діапазоні від 10% відносної вологості до 95% відносної вологості. В лабораторії «Вимірювання температури» АЕС розроблено методику. Гігрометри були відкалібровані за стандартним цифровим гігрометром з метрологічною простежуваністю до одиниць SI. Процес отримання показань стандартного гігрометра автоматизований. Розроблено модель вимірювання, яка зв'язує вхідні величини з вихідними. Стаття також описує деталі оцінки та вираження розширеної невизначеності вимірювання. Лабораторія демонструє свою компетентність у вимірюванні відносної вологості шляхом участі в схемі перевірки кваліфікації шляхом міжлабораторного порівняння BIM-T-RH-2023-01. Результати представлені та проаналізовані. Метою цього порівняння є оцінка продуктивності лабораторій і підтвердження їхньої технічної компетентності у сфері вимірювання відносної вологості.

Ключові слова: метрологія, цифровий гігрометр, калібрування, невизначеність, міжлабораторні порівняння.

ЩОДО ПИТАННЯ СТАНДАРТИЗАЦІЇ МЕТОДИК КАЛІБРУВАННЯ РОБОЧИХ ЕТАЛОНІВ

О.А. Новосолов

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, oonovoselov@ukr.net

Анотація

У статті розглянуто питання щодо розробки стандартизованих методик калібрування робочих еталонів, які використовують під час повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології. Проведено аналіз чинних методик калібрування, які зазначені у «Сферах акредитації» акредитованих калібрувальних лабораторій.

Ключові слова: калібрування, методика калібрування, робочий еталон, невизначеність вимірювань, метрологічна простежуваність.

1. Вступ

З 03.07.2020 року згідно з розділом II «Прикінцеві положення» Закону України від 06.06.2019 № 2740-VIII «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо імплементації актів законодавства Європейського Союзу у сфері технічного регулювання» набрали чинності зміни до статті 27 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] щодо калібрування робочих еталонів.

Відповідно до другої частини статті 27 [1], Міністерство економіки України своїм наказом від 10.08.2020 за номером № 1518 «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів» [2] затвердило порядок калібрування вторинних та робочих еталонів, який установлює процедуру та умови калібрування вторинних та робочих еталонів, які використовують під час повірки засобів вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології.

Серед основних положень [2], є вимоги до виконавців калібрування робочих еталонів, які стосуються власних можливостей щодо їх калібрування – діапазонів вимірювань з встановленими значеннями розширеної невизначеності та переліків методик калібрування, що повинні бути розміщені на своїх офіційних веб-сайтах.

Мета статті – привернути увагу вітчизняної метрологічної спільноти до питання стандартизації методик калібрування робочих еталонів, які використовують під час повірки законодавчо регульованих ЗВТ.

2. Виклад основного матеріалу

Відповідно до [1] еталони можуть бути первинними, вторинними та робочими. Слід зазначити, що у Міжнародному словнику з метрології (ISO/IEC Guide 99:2007) (VIM3) [3] є ще термін «вихідний еталон», який означає еталон, призначений для калібрування інших еталонів для величин даного роду в даній організації або в даному місці.

Калібрування вторинних еталонів проводять із застосуванням первинного еталона для величини того самого роду. Еталони, які використовуються для регулярних калібрувань або повірки ЗВТ, є робочими еталонами. Таким чином, маємо ієрархію калібрувань еталонів – первинний еталон → вторинний еталон → робочий еталон → робочі ЗВТ, які застосовуються безпосередньо для вимірювань.

Ієрархія калібрування – послідовність калібрування, починаючи від основи для порівняння і закінчуючи вимірювальною системою, причому в цій послідовності результат кожного калібрування залежить від результату попереднього калібрування.

Елементами ієрархії калібрування є один або більше еталонів та вимірювальні системи, що застосовуються відповідно до методики вимірювань. Основою для порівняння може бути визначення одиниці вимірювання через її практичну реалізацію, або опорне значення величини, або ЗВТ, яке застосовується для передавання розміру одиниць, та є еталоном для конкретних повірочних та калібрувальних лабораторій. Функція робочого еталона якраз й полягає у передачі одиниці вимірювань іншим ЗВТ, для встановлення його відповідності застосованій методиці вимірювання.

Згідно з [3]: «методика вимірювання – це детальний опис вимірювання у відповідності з одним або більше принципами вимірювань та даним методом вимірювань, який заснований на моделі вимірювань і включає обчислення, необхідні для отримання результату вимірювання». Слід зазначити, що термін «метод», використовуваний у ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [4], вважається синонімом терміна «методика вимірювання». Методику вимірювань зазвичай описують досить докладно та подають у вигляді документа, що дозволяє оператору виконати вимірювання так, щоб одержати достовірний результат.

Методика вимірювань (калібрування) повинна включати три взаємопов'язані елементи – метод, технічні засоби та правила підготовки та виконання вимірювань, обробки та подання їх результатів. Методика калібрування може включати інформацію про цільову невизначеність вимірювань, що є важливим для оцінювання придатності ЗВТ згідно із застосованою методикою.

Якщо ознайомитися зі сферами акредитації калібрувальних лабораторій, акредитованих Національним агентством з акредитації України (далі – НААУ) на відповідність [4] на предмет нормативних документів на методи калібрування, то можна відмітити, що переважна більшість методик калібрування є розробками лабораторій. Показовим прикладом у цьому питанні є «Сфера акредитації» калібрувальної служби Державного підприємства «Всеукраїнський держав-

ний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»).

Більш 500 методик калібрування за усіма видами вимірювань (AUV – акустика, ультразвук, вібрація; ЕМ – електрика та магнетизм; L – довжина; М – маса та пов'язані з нею величини; PR – фотометрія;

QM – хімія (кількість речовин); RI – іонізуюче випромінювання; Т – термометрія; TF – час і частота), складають методики, розроблені калібрувальною службою. І лише, більш тридцять методик, це національні стандарти, гармонізовані з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документи, прийняті міжнародними та регіональними організаціями з метрології (табл. 1).

Таблиця 1 – Виписка зі «Сфери акредитації» Калібрувальної служби ДП «Укрметртестстандарт» щодо стандартизованих методик калібрування вимірювального обладнання за видами вимірювань

№	Позначання нормативних документів на методи калібрування за видами вимірювань
AUV – акустика, ультразвук, вібрація	
1	ДСТУ ISO 16063-21:2006 Методи калібрування давачів вібрації і удару. Частина 21. Калібрування давачів вібрації методом порівняння з еталонним давачем (ISO 16063-21:2003, IDT)
2	ДСТУ ISO 16063-22:2006 Методи калібрування давачів вібрації і удару. Частина 22. Калібрування давачів удару методом порівняння з еталонним давачем (ISO 16063-22:2005, IDT)
М – маса та пов'язані з нею величини	
3	ДСТУ EN ISO 376:2014 Матеріали металеві. Калібрування силомірів, застосовуваних для верифікації одноосних випробувальних машин (EN ISO 376:2011, IDT)
4	ДСТУ EN ISO 7500-1:2017 Матеріали металеві. Калібрування та перевірка машин для статичних одновісних випробувань. Частина 1. Випробувальні машини на розтягування та стиснення. Калібрування та перевірка силовими-рювальних систем (EN ISO 7500-1:2015, IDT; ISO 7500-1:2015, IDT)
5	ДСТУ EN ISO 6789:2014 Інструменти кріплення для гвинтів і гайок. Ручні динамометричні інструменти. Вимоги та методи випробувань для перевірки сумісності конструкції, відповідності якості вимогам і для повторної процедури калібрування (EN ISO 6789:2003, IDT)
6	ДСТУ EN ISO 148-2:2019 Матеріали металеві. Випробування впливу маятника Шарпі. Частина 2. Перевірення випробувальних машин (EN ISO 148-2:2016, IDT; ISO 148-2:2016, IDT)
7	ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 2. Перевірення та калібрування випробувальних машин (EN ISO 6506-2:2018, IDT; ISO 6506-2:2017, IDT)
8	ДСТУ ISO 6507-2:2008 Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 2. Перевірка та калібрування приладів для вимірювання твердості (ISO 6507-2:2005, IDT)
9	ДСТУ EN ISO 6508-2:2017 Матеріали металеві. Вимірювання твердості за шкалою Роквелла. Частина 2. Перевірка та калібрування випробувальних машин і наконечників (EN ISO 6508-2:2015, IDT; ISO 6508-2:2015, IDT)
10	ДСТУ ISO 8655-6:2018 Пристрої мірні поршневі. Частина 6. Гравіметричний метод для визначення похибки вимірювання (ISO 8655-6:2002; Cor 1:2008, IDT)
11	ДСТУ 7472:2013 Метрологія. Резервуари сталеві циліндричні вертикальні з еліптичними днищами. Методика перевірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів
12	ДСТУ 7473:2016 Метрологія. Резервуари стаціонарні вимірювальні вертикальні. Методика перевірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів
13	ДСТУ 7474:2016 Метрологія. Резервуари для скрапленого газу сталеві сферичні. Методика перевірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів
14	ДСТУ 7475:2016 Метрологія. Резервуари сталеві циліндричні горизонтальні. Методика перевірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів
15	ДСТУ 7364:2016 Метрологія. Резервуари для скрапленого газу сталеві циліндричні горизонтальні. Методика перевірки (калібрування) геометричним методом
16	ДСТУ OIML R 111-1:2008 Гирі класів точності E ₁ , E ₂ , F ₁ , F ₂ , M ₁ , M ₁₋₂ , M ₂ , M ₂₋₃ і M ₃ . Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробувань (OIML R 111-1:2004, IDT) (Додаток С)
17	ISO 4545-2:2017 Metallic materials — Knoop hardness test. Part 2: Verification and calibration of testing machines
18	ISO 18898:2016 specifies procedures for the calibration and verification of durometers of types A, D, AO and AM
19	ISO 21509:2006 concerns the verification of type A and D Shore hardness durometers used to conduct hardness tests as described in ISO 868
20	ISO 14577-1:2015 Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters
21	ISO 4787:2021 Laboratory glass and plastic ware — Volumetric instruments — Methods for testing of capacity and for use
22	ISO 7971-1:2009 Cereals — Determination of bulk density, called mass per hectoliter. Part 1: Reference method
23	EURAMET Calibration Guide № 18 Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments (Настанов-ва з калібрування неавтоматичних зважувальних приладів)
24	EURAMET cg-4 Version 2.0 Uncertainty of Force Measurements
25	EURAMET Calibration Guide cg-19 Guidelines on the Determination of Uncertainty in Gravimetric Volume Calibration
26	EURAMET cg-21 Guidelines on the Calibration of Standard Capacity Measures using the Volumetric Method
L – довжина	
27	Calibration Guide EURAMET/cg-06/v.01 Extent of Calibration for Cylindrical Diameter Standards
28	Calibration Guide EURAMET cg-2 Version 2.0 Calibration of Gauge Block Comparators
29	ДСТУ ISO 3310-2016 Сита. Технічні вимоги та випробування
30	ISO 9513:2012 Metallic materials — Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing

При цьому серед них є скасовані на міжнародному рівні стандарти, наприклад, ISO 18898:2016, який замінено на ISO 48-9:2018 Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of hardness. Part 9: Calibration and verification of hardness testers.

Таким чином, на цей час маємо невелику кількість стандартизованих методик калібрування, а за такими видами вимірювань, як EM, PR, QM, RI, T та TF, стандартизованих методик не має взагалі.

Серед деяких фахівців науково-метрологічних інститутів нашої країни існує думка, що стандартизація якомога більшої кількості методик калібрування «накладає певні обмеження, що протирічить самій філософії калібрування щодо гнучкості його застосування» [5].

За [1], метрологічна система України створює необхідні засади для забезпечення єдності вимірювань у державі та основним завданням цієї системи є захист громадян і національної економіки від наслідків недостовірних результатів вимірювань. Як раз, стандартизовані методики калібрування, принаймні на робочі еталони, що використовуються під час повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, є запорукою забезпечення єдності вимірювань, тому що це насамперед стосується сфери законодавчо регульованої метрології, де порушення стану вимірювань, за якого характеристики похибок або невизначеності вимірювань відомі з певною ймовірністю і не виходять за встановлені границі, може привести до тяжких наслідків в економіці, а значить, ні про яку «гнучкість калібрування» не може йти мова.

Слід зазначити, що за ДСТУ ISO 10012:2005 «Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання» [6] калібрування входить до сукупності операцій, необхідних для гарантування того, що вимірювальне обладнання відповідає метрологічним вимогам щодо його використання за призначеністю. Ця сукупність операцій є метрологічним підтвердженням вимірювального обладнання, яке не вважають виконаним доти, доки придатність вимірювального обладнання до використання за призначеністю не буде доведено та задокументовано.

Вимоги до використання за призначеністю охоплюють такі метрологічні характеристики, як діапазон вимірювань, максимально допустимі похибки, які можуть бути визначні через клас точності відповідної категорії ЗВТ, роздільна здатність тощо.

Умовами забезпечення єдності вимірювань є відомі характеристики похибок або невизначеності вимірювань, які прописуються у методиках вимірювань, у технічній документації на продукцію, в нормативно-правових актах та необхідна тотожність одиниць, в яких проградуйовані всі ЗВТ однієї і тієї ж величини.

У [1] також встановлено, що для вимірювань у сфері законодавчо регульованої метрології застосовуються ЗВТ, які відповідають регламентованим вимогам щодо точності, тобто до їх похибки [3], які в свою чергу, прописуються у технічній специфікації на ЗВТ, у методиках повірки та калібрування ЗВТ. Найбільш важлива регламентована вимога щодо точності ЗВТ стосується максимальної допустимої похибки або класу точності ЗВТ.

Слід зазначити, що робочий еталон це ЗВТ, з притаманними для ЗВТ встановленими метрологіч-

ними вимогами, що підтверджує міжнародний документ з метрології OIML D 8 «Еталони. Вибір, визнання, застосування, зберігання і документація» [7]:

«7.3 Документи до еталона повинні містити таку основну інформацію:

g) точність або клас точності, невизначеність вимірювання разом з інформацією про її оцінювання».

У [3] визначено, що клас точності є «класифікаційною характеристикою ЗВТ або вимірювальних систем, які відповідають встановленим метрологічним вимогам, дотримання яких необхідно для підтримки похибок вимірювань або інструментальних невизначеностей у встановлених межах за певних умов експлуатації».

Термін «еталон» у [1]: визначено так, як і у [3]: – «реалізація визначення даної величини із встановленим значенням величини та пов'язаною з ним невизначеністю вимірювання, що використовується як основа для порівняння», а далі у словнику метрологічних термінів, йде пояснення, що «реалізація визначення даної величини» може забезпечуватися вимірювальною системою, матеріальною мірою або стандартним зразком, тобто ЗВТ.

Результатом калібрування робочих еталонів не є невизначеність вимірювань, бо вона характеризує метрологічні можливості калібрувальної лабораторії та саму якість проведення калібрування. При калібруванні оцінюється систематична похибка робочих еталонів і розширена невизначеність вимірювань її визначення. Саме ці обидва значення й вказуються у сертифікаті калібрування. Те, що дані сертифікату калібрування свідчать про докази метрологічної простежуваності, не дає гарантії достовірних результатів вимірювань робочим еталоном. Це слідує з примітки до терміну «метрологічна простежуваність» з [3] про те, що «метрологічна простежуваність результату вимірювання не гарантує, що невизначеність вимірювань відповідає заданій меті або що немає помилок». Особливо коли надається як відхилення систематична похибка, а випадкова не враховується. Тому для практичного застосування краще надавати максимальне відхилення показів від еталонного значення.

Тобто, виконання умови з метрологічної простежуваності не дає гарантій, що робочі еталони, які використовуються під час повірки законодавчо регульованих ЗВТ, після калібрування будуть відповідати технічній специфікації. Таку гарантію дасть тільки визначення відповідності робочого еталону заданим метрологічним вимогам. Тому, підмінити поняття «єдність вимірювання» на поняття «метрологічна простежуваність» тільки на тій підставі, що його немає у [3], є помилковим твердженням. Метрологічна простежуваність необхідна для метрологічної порівнянності результатів вимірювань для величин даного роду.

Об'єднаний комітет з настанов у метрології (JCGM) в документі JCGM 106:2012 [8] вказує:

«При оцінці відповідності результат вимірювання використовується для того, щоб визначити, чи відповідає даний об'єкт заданим вимогам. Об'єктом може бути, наприклад, набір кінцевих мір довжини або цифровий вольтметр, що калібрується відповідно до ISO/IEC 17025 або повіряються відповідно до ISO 3650, або проба промислових стічних вод. Вимоги зазвичай

подаються у вигляді однієї або двох меж поля допуску, які визначають інтервал допустимих значень вимірюваного властивості об'єкта, званий полем допуску. Прикладами таких властивостей можуть бути: довжина кінцевої міри, похибка показів вольтметра та масова концентрація ртуті в пробі стічних вод».

Варто також зауважити, що правила прийняття рішення про відповідність робочого еталону вимогам його технічної специфікації, повинні бути об'єктивними та зрозумілими власникам цих еталонів. Якщо враховувати, що невизначеність вимірювань під час калібрування поперед всього це якість роботи калібрувальної лабораторії – її калібрувальні можливості, тоді стає зрозумілим, чому у [2] досить багато уваги приділено визначенню та документуванню власних можливостей виконавців щодо калібрування еталонів.

Можливі заперечення, що калібрування не є оцінкою відповідності та не передбачає функції метрологічного контролю, тобто визначення придатності чи непридатності вимірювального обладнання до застосування, спростовуються вимогою [4], яка чітко вимагає від акредитованого виконавця калібрування:

«7.8.6.2 Лабораторія має звітувати стосовно заяви про відповідність, щоб у ній чітко було зазначено:

а) яких результатів стосується ця заява про відповідність;

б) які специфікації, стандарти чи їхні частини виконують або не виконують».

Калібрування робочих еталонів є обов'язковим для лабораторій уповноважених на перевірку законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, для яких придатні робочі еталони одне з головніших умов отримання достовірних результатів вимірювань. Тому, заяву про відповідність робочих еталонів технічній специфікації від калібрувальної лабораторії, треба розглядати як основну умову виконання калібрування. Для цього треба знати цільову невизначеність під час калібрування, при якій еталон придатний для застосування, наприклад, як встановлена цільова невизначеність еталону, призначеного для перевірки законодавчо регульованого ЗВТ.

Експериментування зі складниками невизначеності вимірювань та різними моделями вимірювань, що розглядається як «гнучкість калібрування», можливо для первинних еталонів, щоб одержати найкращу оцінку невизначеності значення величини, що використовується як основа для порівняння. Необхідно відзначити, що за визначенням, первинний еталон установлюється з використанням первинної референтної методики вимірювань. Однак, для визначення первинного еталона краще застосовувати те, що він є реалізацією визначення даної величини із встановленим значенням величини. Бо приклади в примітках до п. 5.4 [3] вже застаріли.

Якщо ознайомитися зі сферами акредитації калібрувальних лабораторій, акредитованих НААУ на калібрування таких робочих еталонів, як міри електричного опору однозначні, виписка з яких наведена у таблиці 2 (дані взяті зі сайту НААУ, написання метрологічних характеристик залишено відповідно до оригіналів), то можна відзначити наступне:

1 – усі калібрувальні лабораторії проводять калібрування мір електричного опору однозначних згідно зі своїми методиками калібрування.

2 – майже всі калібрувальні лабораторії у графі «Устаткування (об'єкт вимірювань)» разом із мірами електричного опору однозначними вказали й інші засоби вимірювання опору, наприклад, шунти, калібратори, магазини опору, омметри, мікроомметри, міліомметри, мегаомметри, тераомметри, мультиметри, мости, вимірювачі опору, вимірювачі електропровідності, вимірювальні канали. Таке подання інформації про калібрувальні та вимірювальні можливості (Calibration and Measurement Capability - CMC) лабораторій не дозволяє замовникам послуг розібратися в дійсних калібрувальних можливостях лабораторії з калібрування мір електричного опору однозначних.

3 – усі калібрувальні лабораторії застосовували один метод для вираження CMC - діапазон вимірювання. Але як показує практика та досвід європейських акредитованих калібрувальних лабораторій, у цьому випадку неможливо забезпечити належну лінійну інтерполяцію, щоб знайти невизначеність при середніх значеннях, тому треба вказувати CMC єдиним значенням, яке є дійсним для усього діапазону вимірювання або вираженою функцією вимірюваної величини.

Аналіз звіту перевірки професійного рівня калібрувальних лабораторій з калібрування міри електричного опору однозначної, під координацією акредитованого НААУ відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17043 [9] провайдера Державного підприємства «Харківстандартметрологія», свідчить, що обчислені розширені невизначеності калібрування міри електричного опору однозначної P321 номінального значення $R_n = 10$ Ом відрізняються між собою в 55 раз.

Причини виникнення такої розбіжності можуть бути наступні:

1 – використання різних методів вимірювання: пряме вимірювання за допомогою цифрового омметра, вимірювання за допомогою моста постійного струму, вимірювання за допомогою компаратора опорів, вимірювання за допомогою компаратора напруги або потенціометра постійного струму.

Хоча, метод вимірювання за допомогою компаратора опорів є найбільш точним і поширеним методом калібрування мір електричного опору однозначних.

2 – використання різного вимірювального обладнання: цифровий омметр, компаратор опорів, компаратор напруги, потенціометр постійного струму.

3 – оцінювання лабораторіями складових бюджету невизначеності вимірювань за різними модельними рівняннями, що призводить до суттєво різних значень розширених невизначеностей.

Точність результатів вимірювань може бути достовірно оцінена лише на основі попереднього аналізу можливих причин та джерел невизначеності вимірювань та апіорної оцінки цих невизначеностей.

Для забезпечення єдності вимірювань у сфері законодавчо регульованої метрології необхідно створити і регламентувати такі правила підготовки та проведення калібрування робочих еталонів, обробки та оформлення їх результатів, дотримання яких гарантують певну точність всіх калібрувань, що виконуються за даними правил.

Саме це, досягається стандартизацією методик калібрування.

Таблиця 2 – Виписка зі «Сфер акредитацій»
акредитованих калібрувальних лабораторій з калібрування мір електричного опору

№	Найменування КЛ	Устаткування (об'єкт вимірювань)	Діапазон або точка вимірювань, у яких проводиться калібру- вання	Розширена невизначеність вимірювань $U (k=2)$	Позначання нормативних документів на мето- ди калібрування та метод (принцип) вимірювання
1	2	3	4	5	6
1	ДП «Укрметр- тестстандарт»	Шунти, калібратори, магазини та міри електричного опору	$(25 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{15}) \text{ Ом}$	$(1 \times 10^{-9} - 8 \times 10^3) \text{ Ом}$	МКУ 397-25/08 Метод опосередко- ваних вимірювань МКУ 416-25/08 Метод порівняння з мірою МКУ 417-25/08 Метод порівняння з мірою МКУ 418-25/08 Метод порівняння з мірою МКУ 419-25/08 Прямі вимірювання Метод порівняння з еталоном МКУ 429-25/08 Прямі вимірювання МКУ 443-25/08 Метод порівняння з мірою МКУ 444-25/08 Метод порівняння з мірою
2	Криворізька фі- лія ДП «Дніпро- стандарт- метрологія»	Магазин опору та міри опору однозначні	Режим відтворення $(0,01 - 100) \text{ мОм}$ $(1 - 100) \text{ Ом}$ $(1 - 100) \text{ кОм}$ $(1 - 1000) \text{ МОм}$ 10000 МОм 100 ГОм 1000 ГОм	Режим відтворення $(0,0025 - 0,006) \text{ мОм}$ $(0,000025 - 0,001) \text{ Ом}$ $(0,00003 - 0,0015) \text{ Ом}$ $(0,000025 - 0,1) \text{ МОм}$ $2,0 \text{ МОм}$ $0,25 \text{ ГОм}$ $10,0 \text{ ГОм}$	МК-08/02 Прямі вимірювання
3	ДП «Одеса- стандарт- метрологія»	Міри електричного опору однозначні, мага- зини навантаження та опору	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{12} \text{ Ом}$	$(1,7 \times 10^{-9} - 5,8 \times 10^7) \text{ Ом}$	МК0327 Метод порівняння з еталоном за допомо- гою компаратора
4	Житомирська філія ДП «Він- ницястандарт- метрологія»	Міри електричного опору постійного стру- му однозначні та бага- тозначні	$0 - 1 \times 10^7 \text{ Ом}$	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^5 \text{ Ом}$	МК 08-12 Прямі вимірювання
5	Запорізька філія ДП «Дніпро- стандарт- метрологія»	Магазини та міри елек- тричного опору	$(1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^9) \text{ Ом}$	$(3,6 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^7) \text{ Ом}$	МК 1-08-04:2020 Прямі виміри
6	Черкаська філія ДП «Полтава- стандарт- метрологія»	Міри електричного опору одно- та багатозначні	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^9 \text{ Ом}$	$0,0001 - 7000 \text{ Ом}$	МК 06-08-03 Метод прямих вимірювань, Метод непрямих вимірювань
7	ДП «Харків- стандарт- метрологія»	Міри електричного опору постійному та змінному струму одно- значні та багатозначні, міри-імітатори	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{13} \text{ Ом};$ постійна часу: $1 \times 10^{-8} - 2,5 \times 10^{-6} \text{ с};$ в діапазоні частот $0 - 1 \times 10^4 \text{ Гц}$	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^5 \text{ Ом}$	СОУ 74.3-04725906- 0066:2012 Прямі вимірювання, звірення допомогою компаратора

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6
8	ДП «Дніпро-стандарт-метрологія»	Міри електричного опору однозначні	$(1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^3) \Omega$ (Ом)	$2 \times 10^{-9} \Omega - 9 \times 10^{-2} \Omega$	МК Д 11/18-2017 Метод зрівняння
		Міри електричного опору багатозначні	$(1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{12}) \Omega$ (Ом)	$2,4 \times 10^{-6} \Omega - 5 \text{ G}\Omega$	МК Д 11/21-2017 Прямі вимірювання
9	ДП «Івано-Франківськ-стандарт-метрологія»	Омметри, мегомметри, вимірювачі опору, міри опору одно- та багатозначні	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{12} \text{ Ом}$	0,01 – 6,67 Ом	МК 012 РД/08:2018 Метод прямих вимірювань
10	Калібрувальна лабораторія ПП «НВ Центр оцінки відповідності «ЮГ»	Вимірювачі (омметри, мікро-, мілі-, мега-, тераомметри, мультиметри, мости) та міри опору (шунти, однозначні міри опору, магазини опору)	1 ТОм – 10 ТОм 1 МОм – 1 ТОм 10 мкОм – 1 ГОм	(0,1 – 10) % (0,01 – 10) % від 0,003 %	МК-02 Прямі вимірювання. Опосередковані вимірювання Заміщення
11	Калібрувальна лабораторія ТОВ «ЛАБ-ТЕСТ»	Засоби для вимірювання та (або) відтворення опору (омметри, вимірювачі опору, вимірювачі електропровідності, електролітичні розчини, міри опору, вимірювальні канали)	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^9 \text{ Ом}$ $1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{-3} \text{ См}$	$(0,19 \cdot 10^{-4} - 0,2 \cdot 10^6) \text{ Ом}$ $(0,19 \cdot 10^{-4} - 0,2 \cdot 10^6) \text{ См}$	МК-08-06

3. Висновки

1. Для забезпечення єдності вимірювань у законодавчо регульованій сфері метрології необхідно застосування в Україні міжнародної практики зі стандартизації методик калібрування та методів оцінки невизначеності, інакше, коли кожна калібрувальна лабораторія проводить калібрування робочих еталонів та оцінює невизначеність вимірювань за

своїм розумінням, це веде до хаосу метрологічної діяльності.

2. Достовірність оцінки щодо відповідності робочого еталона зазначеним метрологічним характеристикам істотно залежить від коректності процедур оцінювання невизначеності вимірювання при калібруванні, що досягається їх стандартизацією.

Список літератури

1. Закон України від 05.06.2014 № 1314–VII «Про метрологію та метрологічну діяльність».
2. Наказ Мінекономіки України від 10.08.2020 № 1518 «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів».
3. ISO/IEC Guide 99:2007 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM3).
4. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій».
5. Samoilenko O. The calibration and uncertainty evaluation by elementary measurement models // *Measurements infrastructure*. 2021, vol. 1 MI_005180321 № 1, pp. 1-10.
6. ДСТУ ISO 10012:2005 «Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання».
7. OIML D 8 «Еталони. Вибір, визнання, застосування, зберігання і документація».
8. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
9. ДСТУ EN ISO/IEC 17043 «Оцінка відповідності. Основні вимоги до проведення перевірки кваліфікації».

Надійшла (Received) 15.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 29.10.2024

Відомості про авторів / About the authors

Новосьолов Олег – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: oanovoselov@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

Novoselov Oleg – graduate student IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: oanovoselov@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

On the issue of standardization of procedures for calibration of working standards

Oleg Novoselov

Abstract

The article deals with the development of standardized methods of calibration of working standards, which are used during the verification of measuring equipment in operation and used in the field of legally regulated metrology. The analysis of current calibration methods, which are specified in the "Scope of accreditation" of accredited calibration laboratories, was carried out.

Key words: calibration, calibration technique, working standard, measurement uncertainty, metrological traceability.

MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION OF OBJECT COORDINATES IN PLANE BY THE GONIOMETRIC METHOD

Olesia Botsiura, Iryna Zadorozhna, Igor Zakharov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Abstract

The features of the uncertainty evaluation of measuring the coordinates of an object in plane by the goniometric method (theta position fixing) are discussed. Measurement model are presented that relate objects coordinates in the local rectangular coordinate system with the angles found using goniometers. The model includes corrections for determining the location of base stations, and correction associated with inaccuracies in the location of stations to the north. Uncertainty budgets for measurements of rectangular coordinates are given, which can be the basis for creating software for automating the calculation of measurement uncertainties. The estimates of the expanded uncertainties are found by the kurtosis method.

Keywords: coordinate metrology; goniometric method; measurement uncertainty, kurtosis method

1. Introduction

The problem of an object coordinates in plane determining is widely used in geodesy, radio navigation, radio-, optical and acoustic locations [1–4]. Depending on the number of base stations (BS) used in this case (radar, optoelectronic or acoustic) and their capabilities, this problem is solved by various methods.

The theta fixing (goniometric method) [5], considered in this article, is limited to the use of only one RS containing a rangefinder and a goniometer (direction finder). It belongs to the active methods of location, since it requires radiation from the BS to determine the distance to the object.

The goniometry method (theta location determination) considered in this article requires the presence of at least two BSs containing only goniometers (direction finders). It refers to passive location methods, since the BS radiation is not required to determine the distance to the object.

The report considers the features of measurement uncertainty evaluation the coordinates of an object in a plane using the goniometric method.

2. Justification of Measurement Models

Fig. 1 shows a diagram of the implementation of coordinates measuring of an object on a plane using the goniometric method.

The axis OY is directed to the north, the axis OX is drawn so as to form a right-hand rectangular coordinate system. The diagram shows basic stations O_1 and O_2 , located at points with coordinates (x_1, y_1) and (x_2, y_2) , respectively. The object P has the desired coordinates (x, y) .

From the points of locations of the first and second stations O_1 and O_2 , the direction to the target is

established by direction finders, i.e. its azimuths α_1 and α_2 , which are counted in the direction of movement of the clockwise from the direction to the north.

These parameters are used to determine the local Cartesian coordinates of the object (x, y) in accordance with the equations [6]:

$$x = x_1 + L_1 \cos \alpha_1, \quad (1)$$

$$y = y_1 + L_1 \sin \alpha_1, \quad (2)$$

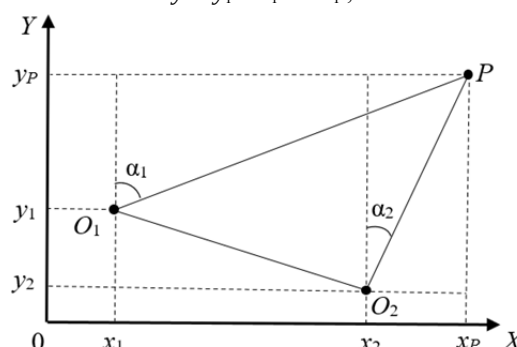


Fig. 1. Scheme of implementation of measurement of coordinates of an object on a plane by the goniometric method

where L_1 is the distance from the location of the first station point O_1 to point P , and:

$$L_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}. \quad (3)$$

Similar expressions can be written for the second station:

$$x = x_2 + L_2 \cos \alpha_2, \quad (4)$$

$$y = y_2 + L_2 \sin \alpha_2 \quad (5)$$

in which L_2 is the distance from the location of the second station point O_2 to the point P , and:

$$L_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}. \quad (6)$$

From Fig. 1 it can be seen that:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 + (y - y_1) \operatorname{ctg} \alpha_1 \\ x &= x_2 + (y - y_2) \operatorname{ctg} \alpha_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Solving system (7) for y , we have:

$$y = \frac{(x_2 - x_1) + (y_1 \operatorname{ctg} \alpha_1 - y_2 \operatorname{ctg} \alpha_2)}{\operatorname{ctg} \alpha_1 - \operatorname{ctg} \alpha_2}. \quad (8)$$

Substituting this solution into the first equation of system (7), we obtain an expression for the x coordinate of the object:

$$x = x_1 + \operatorname{ctg} \alpha_1 \cdot \left[\frac{(x_2 - x_1) + (y_1 - y_2) \operatorname{ctg} \alpha_2}{\operatorname{ctg} \alpha_1 - \operatorname{ctg} \alpha_2} \right]. \quad (9)$$

Thus, the obtained equations (8) and (9) allow us to obtain the coordinates of the object (x, y) through the coordinates of the locations of the station points (x_1, y_1) and (x_2, y_2), as well as the target azimuths α_1 and α_2 , measured by both stations.

3. Evaluation of Numerical Values and Measurement Uncertainties of Object

The numerical values of the measurands $\hat{x}, \hat{y}$ can be determined from expressions (8)-(9) by substituting the values of the input quantities $\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$ into them:

$$\hat{x} = \hat{x}_1 + \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 \left[\frac{(\hat{x}_2 - \hat{x}_1) + (\hat{y}_1 - \hat{y}_2) \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2} \right]; \quad (10)$$

$$\hat{y} = \frac{(\hat{x}_2 - \hat{x}_1) + (\hat{y}_1 \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \hat{y}_2 \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2)}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}. \quad (11)$$

According to the obtained measurement models (10), (11) of the object coordinates, in accordance with the rule of summation of variances [7], it is possible to write expressions for the standard uncertainties of their measurement.

For coordinate x :

$$u^2(\hat{x}) = \{ [c_{x_1}(\hat{x})u(\hat{x}_1)]^2 + [c_{x_2}(\hat{x})u(\hat{x}_2)]^2 + [c_{y_1}(\hat{x})u(\hat{y}_1)]^2 + [c_{y_2}(\hat{x})u(\hat{y}_2)]^2 + [c_{\alpha_1}(\hat{x})u(\hat{\alpha}_1)]^2 + [c_{\alpha_2}(\hat{x})u(\hat{\alpha}_2)]^2 \}^{0.5}, \quad (12)$$

where the corresponding sensitivity coefficients $c_{x_1}(\hat{x})$, $c_{x_2}(\hat{x})$, $c_{y_1}(\hat{x})$, $c_{y_2}(\hat{x})$, $c_{\alpha_1}(\hat{x})$ и $c_{\alpha_2}(\hat{x})$ are determined by the expressions:

$$c_{x_1}(\hat{x}) = \frac{\partial \hat{x}}{\partial \hat{x}_1} = \frac{-\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (13)$$

$$c_{x_2}(\hat{x}) = \frac{\partial \hat{x}}{\partial \hat{x}_2} = \frac{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (14)$$

$$c_{y_1}(\hat{x}) = \frac{\partial \hat{x}}{\partial \hat{y}_1} = \frac{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (15)$$

$$c_{y_2}(\hat{x}) = \frac{\partial \hat{x}}{\partial \hat{y}_2} = \frac{-\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (16)$$

$$c_{\alpha_1}(\hat{x}) = \frac{\partial \hat{x}}{\partial \hat{\alpha}_1} = \frac{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2 [(\hat{x}_2 - \hat{x}_1) + \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2 (\hat{y}_1 - \hat{y}_2)]}{[(\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2) \sin \hat{\alpha}_1]^2}; \quad (17)$$

$$c_{\alpha_2}(\hat{x}) = \frac{\partial \hat{x}}{\partial \hat{\alpha}_2} = \frac{(\hat{y}_2 - \hat{y}_1) \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 + (\hat{x}_2 - \hat{x}_1)}{[(\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2) \sin \hat{\alpha}_2]^2}. \quad (18)$$

Similarly, we can write an expression for the standard measurement uncertainty of the coordinate y :

$$u(\hat{y}) = \{ [c_{x_1}(\hat{y})u(\hat{x}_1)]^2 + [c_{x_2}(\hat{y})u(\hat{x}_2)]^2 + [c_{y_1}(\hat{y})u(\hat{y}_1)]^2 + [c_{y_2}(\hat{y})u(\hat{y}_2)]^2 + [c_{\alpha_1}(\hat{y})u(\hat{\alpha}_1)]^2 + [c_{\alpha_2}(\hat{y})u(\hat{\alpha}_2)]^2 \}^{0.5}, \quad (19)$$

in which the corresponding sensitivity coefficients $c_{x_1}(\hat{y})$, $c_{x_2}(\hat{y})$, $c_{y_1}(\hat{y})$, $c_{y_2}(\hat{y})$, $c_{\alpha_1}(\hat{y})$ and $c_{\alpha_2}(\hat{y})$ are found as:

$$c_{x_1}(\hat{y}) = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \hat{x}_1} = \frac{-1}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (20)$$

$$c_{x_2}(\hat{y}) = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \hat{x}_2} = \frac{1}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (21)$$

$$c_{y_1}(\hat{y}) = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \hat{y}_1} = \frac{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (22)$$

$$c_{y_2}(\hat{y}) = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \hat{y}_2} = \frac{-\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}{\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}; \quad (23)$$

$$c_{\alpha_1}(\hat{y}) = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \hat{\alpha}_1} = \frac{(\hat{x}_2 - \hat{x}_1) + (\hat{y}_1 - \hat{y}_2) \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2}{[(\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2) \sin \hat{\alpha}_1]^2}, \quad (24)$$

$$c_{\alpha_2}(\hat{y}) = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \hat{\alpha}_2} = \frac{(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + (\hat{y}_2 - \hat{y}_1) \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1}{[(\operatorname{ctg} \hat{\alpha}_1 - \operatorname{ctg} \hat{\alpha}_2) \sin \hat{\alpha}_2]^2}. \quad (25)$$

In expressions (12) and (19) $u(\hat{\alpha}_1)$, $u(\hat{\alpha}_2)$ are the standard measurement uncertainties $\hat{\alpha}_1$, $\hat{\alpha}_2$, defined as:

$$u(\hat{\alpha}_1) = \sqrt{u_I^2(\hat{\alpha}_1) + u_N^2(\hat{\alpha}_1)}; \quad (26)$$

$$u(\hat{\alpha}_2) = \sqrt{u_I^2(\hat{\alpha}_2) + u_N^2(\hat{\alpha}_2)}, \quad (27)$$

where $u_I(\hat{\alpha}_1)$, $u_I(\hat{\alpha}_2)$ are the standards instrumental measurement uncertainties of the angular coordinates $\hat{\alpha}_1$ and $\hat{\alpha}_2$ with the help of a goniometer; $u_N(\hat{\alpha}_1)$, $u_N(\hat{\alpha}_2)$ are the component of uncertainty associated with the inaccuracy of binding the BS to the direction to the north.

Standard uncertainties $u(\hat{x}_1)$, $u(\hat{y}_1)$ and $u(\hat{x}_2)$, $u(\hat{y}_2)$ determinations of the locations standing points O_1 and O_2 , respectively, are found from the corresponding boundaries of the maximum permissible error $\pm \theta(\hat{x}) \pm \theta(\hat{y})$ under the assumption of an uniform distributions of the errors in the estimates $\hat{x}_1$, $\hat{y}_1$, $\hat{x}_2$, $\hat{y}_2$ within these boundaries:

$$u(\hat{x}_1) = u(\hat{x}_2) = \theta(\hat{x}) / \sqrt{3}; \quad (28)$$

$$u(\hat{y}_1) = u(\hat{y}_2) = \theta(\hat{y}) / \sqrt{3}. \quad (29)$$

Instrumental uncertainties in measuring angular coordinates α_1 and α_2 using goniometers $u_I(\hat{\alpha}_1)$, $u_I(\hat{\alpha}_2)$, which can be found through the boundaries of

the maximum permissible instrumental error in measuring azimuth $\pm\hat{\theta}_\alpha$, assuming an uniform distribution of instrumental errors within these boundaries as:

$$u_I(\hat{\alpha}_1) = u_I(\hat{\alpha}_2) = \hat{\theta}_\alpha / \sqrt{3}; \quad (30)$$

If the limits of the maximum permissible error of reference to the direction to the north are taken to be equal to $\pm\hat{\theta}_N$, then, assuming an uniform distribution of the reference error within these limits, we can write:

$$u_N(\hat{\alpha}_1) = u_N(\hat{\alpha}_2) = \hat{\theta}_N / \sqrt{3}. \quad (31)$$

Since the standard uncertainties of all input quantities were determined according to type B and were assigned an uniform distribution, the expanded uncertainties of coordinate measurement (x, y) are best found using the kurtosis method [8]:

$$U(x) = k(\eta_x)u(x); \quad (32)$$

$$U(y) = k(\eta_y)u(y), \quad (33)$$

where the coverage factors for the confidence level of 0.95 and 0.9545 are found using the formula:

$$\left. \begin{aligned} k_{0,95} &= 0,1085\eta^3 + 0,1\eta + 1,96 \\ k_{0,9545} &= 0,12\eta^3 + 0,1\eta + 2,0 \end{aligned} \right\}, \quad (34)$$

and the kurtosis of the distribution for (x, y) will be equal to:

$$\eta(x) = \frac{-1,2}{u^4(\hat{x})} \{ [c_{x_1}(\hat{x})u(\hat{x}_1)]^4 + [c_{x_2}(\hat{x})u(\hat{x}_2)]^4 + [c_{y_1}(\hat{x})u(\hat{y}_1)]^4 + [c_{y_2}(\hat{x})u(\hat{y}_2)]^4 + [c_{\alpha_1}(\hat{x})u_I(\hat{\alpha}_1)]^4 + [c_{\alpha_1}(\hat{x})u_N(\hat{\alpha}_1)]^4 + [c_{\alpha_2}(\hat{x})u_I(\hat{\alpha}_2)]^4 + [c_{\alpha_2}(\hat{x})u_N(\hat{\alpha}_2)]^4 \}; \quad (35);$$

$$\eta(y) = \frac{-1,2}{u^4(\hat{y})} \{ [c_{x_1}(\hat{y})u(\hat{x}_1)]^4 + [c_{x_2}(\hat{y})u(\hat{x}_2)]^4 + [c_{y_1}(\hat{y})u(\hat{y}_1)]^4 + [c_{y_2}(\hat{y})u(\hat{y}_2)]^4 + [c_{\alpha_1}(\hat{y})u_I(\hat{\alpha}_1)]^4 + [c_{\alpha_1}(\hat{y})u_N(\hat{\alpha}_1)]^4 + [c_{\alpha_2}(\hat{y})u_I(\hat{\alpha}_2)]^4 + [c_{\alpha_2}(\hat{y})u_N(\hat{\alpha}_2)]^4 \}. \quad (36)$$

Formulas (35), (36) take into account that the kurtosis of all input values that have an equally probable distribution are equal to (-1.2).

The uncertainty budgets of the object coordinate (x, y) measurements will have the form given in Tables 1 and 2.

Table 1 – Uncertainty budget for the measurement of the x-coordinate

Input quantities	Values of input quantities	Standard uncertainties of input quantities	Kurtosis of input quantities	Sensitivity coefficients	Uncertainty contributions
x_1	$\hat{x}_1$	(28)	-1,2	(13)	(28)·(13)
x_2	$\hat{x}_2$	(28)	-1,2	(14)	(28)·(14)
y_1	$\hat{y}_1$	(29)	-1,2	(15)	(29)·(15)
y_2	$\hat{y}_2$	(29)	-1,2	(16)	(29)·(16)
α_1	$\hat{\alpha}_1$	(30)	-1,2	(17)	(30)·(17)
		(31)	-1,2		(31)·(17)
α_2	$\hat{\alpha}_2$	(30)	-1,2	(18)	(30)·(18)
		(31)	-1,2		(31)·(18)
Measurand	Measurand value	Combined standard uncertainty	Measurand kurtosis	Coverage factor	Expanded uncertainty
x	(10)	(12)	(35)	(34)	(32)

Table 2 – Uncertainty budget for the measurement of the y-coordinate

Input quantities	Values of input quantities	Standard uncertainties of input quantities	Kurtosis of input quantities	Sensitivity coefficients	Uncertainty contributions
x_1	$\hat{x}_1$	(28)	-1,2	(20)	(28)·(20)
x_2	$\hat{x}_2$	(28)	-1,2	(21)	(28)·(21)
y_1	$\hat{y}_1$	(29)	-1,2	(22)	(29)·(22)
y_2	$\hat{y}_2$	(29)	-1,2	(23)	(29)·(23)
α_1	$\hat{\alpha}_1$	(30)	-1,2	(24)	(30)·(24)
		(31)	-1,2		(31)·(25)
α_2	$\hat{\alpha}_2$	(30)	-1,2	(25)	(30)·(26)
		(31)	-1,2		(31)·(27)
Measurand	Measurand value	Combined standard uncertainty	Measurand kurtosis	Coverage factor	Expanded uncertainty
y	(11)	(19)	(36)	(34)	(33)

4. Conclusions

1. The advantage of the goniometric method for determining the coordinates of an object on a plane is the absence of radiation from basic stations (passive location). Its implementation requires the presence of at least two basic stations equipped with goniometers.

2. The proposed scheme for implementing the measurement of the coordinates of an object on a plane using the goniometric method made it possible to obtain mathematical models for measuring the Cartesian coordinates of an object.

3. For the obtained mathematical models, based on the law of uncertainty propagation, expressions

for standard uncertainties of measuring the coordinates of an object using the goniometric method were written, and calculations of sensitivity coefficients were made.

4. It is shown that for evaluation the expanded uncertainty of measuring the coordinates of an object using the goniometric method, it is advisable to use the excess method.

5. The uncertainty budgets of measuring the rectangular coordinates of an object are given, which can serve as a basis for automating the calculation of the uncertainty of measuring the coordinates of an object on a plane.

References

1. Zhiping Lu, Yuning Qu, and Shubo Qiao. *Geodasy: introduction to geodetic datum and geodetic systems*. Springer, 2014, 401 p.
2. David Bartlett. *Essentials of Positioning and Location Technology*. Cambridge University Press, 2013, 212 p.
3. Shostko I., Tevyashev A., Kulia, Y., Koliadin A. Optical-electronic system of automatic detection and high-precise tracking of aerial objects in real-time // *The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, CMIS, 2020*, 784–803.
4. H. Dean Parry, Melvin J. Sanders. *The Design and Operation of an Acoustic Radar* // *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1972, Volume, 10, Issue 1, pp. 58 – 64.
5. Zadorozhnaya I., Tevyashev A., Zakharov I. The measurement uncertainty of air object spatial coordinates by rho-theta fixing // *Ukrainian Metrological Journal*, 2022, No 1, c. 51-56 (WOS). DOI: 10.24027/2306-7039.1.2022.258821 (WOS).
6. Bronshtein I.N., Semendyayev K.A. *Handbook of Mathematics*. Springer, 2015, 972 p.
7. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva: ISO, 1993.
8. Zakharov, I.P., Botsyura, O.A. Calculation of Expanded Uncertainty in Measurements Using the Kurtosis Method when Implementing a Bayesian Approach // *Measurement Techniques*, 2019, Volume: 62, Issue: 4, pp. 327-331.

Надійшла (Received) 14.09.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 18.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Олеся Боцюра – к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: olesia.botsiura@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9063-9657>;

Olesia Botsiura – PhD, docent, assistance of professor department of High Mathematic Khariv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: olesia.botsiura@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9063-9657>.

Ірина Задорожна – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: iryna.zadorozhna1@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2862-1875>,

Iryna Zadorozhna – post-graduate student of the Department of Information and Measurement Technologies of the Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: iryna.zadorozhna1@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2862-1875>

Ігор Захаров – д.т.н., проф. завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: igor.zakharov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3852-4582>;

Igor Zakharov – DSc, professor, Head of the Department of Information and Measurement Technologies of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: igor.zakharov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3852-4582>.

Оцінювання невизначеності вимірювань координат об'єкту на площині гоніометричним методом

Боцюра Олеся, Задорожна Ірина, Захаров Ігор

Анотація

Обговорено особливості оцінки невизначеності вимірювання координат об'єкта на площині гоніометричним методом (тета-фіксація положення). Представлені вимірювальні моделі, які зв'язують координати об'єктів у локальній прямокутній системі координат з кутами, знайденими за допомогою гоніометрів. Модель включає поправки для визначення розташування базових станцій, а також поправки, пов'язані з неточностями в розташуванні станцій на північ. Наведено бюджети невизначеностей вимірювань прямокутних координат, які можуть бути основою для створення програмного забезпечення для автоматизації розрахунку невизначеностей вимірювань. Оцінки розширених невизначеностей знайдено методом ексцесу.

Ключові слова: координатна метрологія; гоніометричний метод; невизначеність вимірювань, бюджет невизначеності, метод ексцесів.

ПОЛУМ'ЯНО-ФОТОМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СУЛЬФАТ-ІОНІВ У ВОДАХ З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

О.І. Юрченко, І.Р. Шевченко, Л.В. Бакланова, Т.В. Черножук, О.М. Бакланов

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна, yurchenko@karazin.ua

Анотація

Вивчено використання ультразвуку при полум'яно-фотометричному визначенні сульфат-іонів у водах непрямым методом по калію. При цьому, осадження сульфат-іонів проводили надлишком малорозчинної сухої солі фосфату калію барію. Показано, що кількість калію, що перейшов у розчин, є пропорційною кількості сульфат-іонів у аналізованій пробі. Для покращення відтворюваності та правильності отриманих результатів, а також для підвищення експресності аналізу, осадження сульфат-іонів проводили при дії ультразвуку частотою 5,0 – 7,0 МГц, інтенсивністю 3,0 – 5,0 Вт/см² протягом $\geq 2,0$ хв. Розроблено методику визначення сульфат-іонів у водах з мінералізацією до 50 г/л, діапазон визначуваних концентрацій сульфат-іонів 10 – 150 мг/л. Правильність отриманих результатів (визначали з використанням стандартних зразків води УкрНДІсіль СЗВ 022.3-20с, СЗВ 022.3-20м та СЗВ 022.3-20вм) була для води з мінералізацією 50 г/л - 92,5 – 93,1 %, а для води з мінералізацією до 10 г/л - 99,2 – 99,6 %. Відносне стандартне відхилення отриманих результатів аналізу не перевищувало 0,051. Без використання ультразвуку кількісне визначення вмісту сульфат-іонів можливе лише у водах з мінералізацією до 10 г/л з правильністю 90,2 – 91,0%.

Ключові слова: сульфат-іони, полум'яно-фотометричне визначення, калій, вода, стандартні зразки, правильність, відносне стандартне відхилення.

1. Вступ

Кількісне визначення сульфат-іонів необхідно для оцінки якості питної води, а також при розв'язанні різноманітних технологічних задач [1, 2].

Існує багато прямих методів визначення сульфат-іонів у водах. Гравіметричний метод є дуже тривалим і багатостадійним і його використання у промисловості не дозволяє ефективно контролювати технологічні процеси [2-7].

Більш експресними є об'ємні і фотометричні методи з застосуванням органічних реагентів. Всі ці методи ґрунтуються на утворенні забарвлених комплексних сполук іонів металів з органічними реагентами і подальшому руйнуванні цих комплексних сполук SO_4^{2-} -іонами із зникненням або зміною забарвлення розчину [2-6]. Однак, ці методи погано піддаються автоматизації. Крім того, такі методи не дозволяють кількісне визначення вмісту SO_4^{2-} -іонів у водах з мінералізацією ≥ 10 г/л та вимагають використання дорогих органічних реагентів, що також ускладнює їхнє використання [2-6]. Турбідиметричні методи визначення сульфатів в водах мають низьку точність визначення, особливо у мінералізованих водах і практично не піддаються автоматизації [2, 7].

Описано [8] непрямий метод полум'яно-фотометричного визначення вмісту сульфат-іонів у водах по залишковій кількості барію, що полягає в додаванні до аликвоти аналізованої проби води відомої кількості розчину хлориду барію з хлористим воднем. Нерозчинна сполука сульфату барію, що утворюється, знижує вихідну концентрацію хлориду барію. Кількість хлориду барію, що залишився в розчині, визначають полум'яно-фотометричним методом і розраховують кількість сульфат-іонів. Діапазон визначених концентрацій сульфат-іонів запропонованим методом у пробах води становить від 10 до 100 мг/л [8]. Однак,

полум'яно-фотометричне визначення барію пов'язано з необхідністю використання високотемпературного полум'я. Також, полум'яно-фотометричному визначенню барію притаманні матричні заважаючі впливи, особливо у мінералізованих водах, що призводить до недостатньої відтворюваності результатів визначення сульфат-іонів $S_r \geq 0,10$ [8].

Описано [9] полум'яно-фотометричне визначення вмісту сульфат-іонів у водах непрямым методом по вмісту калію. Метод включає введення у воду, що аналізується, надлишку малорозчинної подвійної солі фосфату калію-барію, осадження сульфат-іонів у вигляді нерозчинного сульфату барію при механічному перемішуванні протягом 6-7 хв., відділення прозорого розчину центрифугуванням і визначення полум'яно-фотометричним методом вмісту сульфат-іонів по вмісту калію, що перейшов у розчин. Діапазон визначуваних концентрацій сульфат-іонів запропонованим методом у пробах води становить від 10 до 150 мг/дм³. У зв'язку з тим, що фосфат калію - барію помітно розчиняється у воді в кислому середовищі, визначення проводять при рН 5-7. Недостатня відтворюваність результатів полум'яно-фотометричного визначення сульфат-іонів, $S_r \geq 0,08$, а також недостатня правильність отриманих результатів аналізу пов'язані з неповним контактом частинок малорозчинної солі подвійного фосфату калію-барію з аналізованим розчином в умовах механічного перемішування, в результаті чого, деяка частина сульфат-іонів не може прореагувати з барієм подвійного фосфату калію-барію. Крім того, кількісне визначення сульфатів у водах з мінералізацією 50 г/л є неможливим через складність контакту частинок малорозчинної солі подвійного фосфату калію-барію з аналізованим розчином в умовах механічного перемішування [9].

Дія ультразвуку на процеси сорбції, співосадження, екстракції, спрямованої кристалізації дозволяє значно підвищити ступінь витягу компонентів, що визначаються, через більшу ефективність щодо інтенсифікації масобмінних процесів [10, 11].

Запропонована робота присвячена використанню ультразвуку при полум'яно-фотометричному визначенні сульфат-іонів у водах непрямим методом по калію шляхом осадження сульфат-іонів надлишком малорозчинної сухої солі фосфату калію барію з наступним визначенням вмісту калію, що перейшов у розчин.

2. Експериментальна частина

Застосовували атомно-абсорбційний спектрометр ААС-3 (Німеччина) у режимі емісії [12]. Полум'я пропан-бутан – повітря.

Ультразвукові коливання ініціювали п'єзоелектричними випромінювачами з робочими частотами 4, 5, 6, та 7 МГц, підключеними до лампового генератору 24-УЗГИ-К-1,6 М [12].

Використовували хлорид натрію кваліфікації х.ч. для спектрального аналізу, фосфат барію-калію кваліфікації х.ч., решта реактивів була кваліфікацією ч.д.а. Розчини готували на бідистильованій воді.

Для аналізу використовували стандартні зразки природних вод з різною мінералізацією виробництва Українського науково-дослідного інституту соляної промисловості:

- 1) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20с (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 0,5 г/л);
- 2) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20м (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л);
- 3) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20вм (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л);
- 4) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100с (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 0,5 г/л);
- 5) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100м (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л);

6) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100вм (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л).

Також для аналізу брали водопровідну воду та бутильовану питну воду «Селтерська» з вмістом сульфатів до 28 мг/л.

Методика експерименту.

У центрифужну пробірку місткістю 75 см³ вносили 30 см³ аналізованої води, додавали 2 краплі індикатору метилового помаранчевого і нейтралізували NaOH до жовто-жовтогарячого фарбування розчину. Далі додавали 50 мг сухого фосфату калію-барію і діяли на систему ультразвуком частотою 4,5 – 7,5 МГц, інтенсивністю 2,5 – 5,5 Вт/см² протягом 1,5 – 4,0 хв. Далі центрифугували на швидкості не менше ніж 8000 об/хв. і аналізували прозорий розчин полум'яно-фотометричним методом згідно [2]. Для побудови градувального графіку таким же чином обробляли стандартні розчини зі вмістом 0, 10, 50, 70, 100, 150 мг/л SO₄²⁻ іонів. За результатами фотометрування центрифугатів будували градувальний графік та за ним визначали вміст сульфат-іонів у пробах.

Крім того, проводили дослідження де замість ультразвукового перемішування використовували механічне перемішування зі швидкістю 1000 об/хв.

3. Результати та їх обговорення.

У табл. 1 наведено порівняння полум'яно – фотометричного визначення сульфат-іонів у стандартних зразках води та у водопровідній і бутильованій водах з використанням перемішування дією ультразвуку частотою 7,0 МГц, інтенсивністю 3,0 Вт/см² протягом 2,0 хв. та з використанням магнітної мішалки зі швидкістю 1000 об/хв. протягом 60 хв.

Із табл. 1 видно, що при ультразвуковому перемішуванні правильність та відтворюваність отриманих результатів аналізу є кращими ніж у найближчого аналога.

Таблиця 1 - Порівняння полум'яно – фотометричних способів визначення сульфат-іонів у стандартних зразках води та у водопровідній і бутильованій водах за найближчим аналогом та за запропонованим способом.

Найменування проби та паспортне значення концентрації SO ₄ ²⁻ для стандартних зразків, мг/л	Введено SO ₄ ²⁻ , мг/л	Знайдено SO ₄ ²⁻ , мг/л / Sr	Ступінь витягу введеної частини SO ₄ ²⁻ , або правильність визначення SO ₄ ²⁻ у стандартних зразках, %
1	2	3	4
Ультразвукове перемішування			
1) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20с (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 0,5 г/л)	0 10,0	19,89/0,034 29,80/0,025	99,5 99,1
2) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20м (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)	0 10,0	19,80/0,032 29,68/0,031	99,6 98,8

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
3) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20вм (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л)	0 10,0	18,54/0,040 27,80/0,051	93,1 92,6
4) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100с (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 0,5 г/л)	0 50,0	100,12/0,023 149,53/0,025	99,6 99,0
5) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100м (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)	0 50,0	99,21/0,024 149,03/0,027	99,2 98,0
6) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100вм (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л).	0 50,0	92,52/0,043 138,65/0,050	92,5 92,3
7) вода водопровідна	0 10,0	16,75/0,042 26,61/0,041	- 98,6
8) бутильована питна вода «Селтерська» зі вмістом сульфатів до 28 мг/л.	0 10,0	25,81/0,040 35,70/0,033	- 98,9
Механічне перемішування			
1) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20с (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 0,5 г/л)	0 10,0	18,10/0,085 27,11/0,087	91,0 90,1
2) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20м (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)	0 10,0	17,95/0,093 26,92/0,092	90,2 90,0
3) стандартний зразок води СЗВ 022.3-20вм (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л)	0 10,0	16,32/0,103 24,42/0,099	82,0 81,1
4) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100с (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 0,5 г/л)	0 50,0	91,14/0,087 136,12/0,085	91,1 90,1
5) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100м (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)	0 50,0	90,18/0,087 135,11/0,088	90,2 90,0
6) стандартний зразок води СЗВ 022.3-100вм (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л).	0 50,0	80,43/0,098 120,53/0,097	80,4 80,2
7) вода водопровідна	0 10,0	15,59/0,084 24,74/0,085	- 91,5
8) бутильована питна вода «Селтерська» зі вмістом сульфатів до 28 мг/л.	0 10,0	24,22/0,082 33,32/0,083	- 91,0

Так при ультразвуковому перемішуванні полум'яно-фотометричне визначення сульфат-іонів у водах забезпечує:

1) для вод з мінералізацією до 10 г/л правильність – 99,2 – 99,6 %, відносне стандартне відхилення отриманих результатів аналізу – 0,023 – 0,034;

2) для вод з мінералізацією 50 г/л правильність – 92,5 – 93,1 %, відносне стандартне відхилення отриманих результатів аналізу – 0,040 – 0,051;

Ступінь витягу введеної частини сульфатів для способу, що пропонується складає:

1) для вод з мінералізацією до 10 г/л – 98,6 – 99,1 %;

2) для вод з мінералізацією 50 г/л – 92,3 – 92,6 % (табл.1).

При механічному перемішуванні полум'яно-фотометричне визначення сульфат-іонів у водах забезпечує:

1) для вод з мінералізацією до 10 г/л правильність – 90,2 – 91,0 %, відносне стандартне відхилення отриманих результатів аналізу – 0,085 – 0,093;

2) для вод з мінералізацією 50 г/л правильність – 80,4 – 82,0 %, відносне стандартне відхилення отриманих результатів аналізу – 0,097 – 0,103;

Ступінь витягу введеної частини сульфатів при ультразвуковому перемішуванні складає:

1) для вод з мінералізацією до 10 г/л – 90,0 – 90,1 %;

2) для вод з мінералізацією 50 г/л – 80,2 – 81,1 % (табл.1).

Таким чином, ультразвукове перемішування дозволяє проводити кількісне визначення вмісту сульфат-іонів у водах з мінералізацією до 50 г/л (табл. 1). А механічне перемішування дозволяє проводити кількісне визначення вмісту сульфатів у водах з мінералізацією до 10 г/л з правильністю 90,2 – 91,0% (табл.1). У водах з мінералізацією в 50 г/л кількісне визначення сульфатів при механічному перемішуванні є неможливим, оскільки правильність отриманих менше 90 % (табл. 1) [2].

У табл. 2 наведено вплив частоти ультразвуку на правильність та відтворюваність результатів визначення сульфат-іонів при використанні ультразвукового перемішування. Як видно з табл. 2, оптимальною частотою ультразвуку є 5,0 – 7,0 МГц. При використанні ультразвуку частотою менше ніж 5,0 МГц правильність та відтворюваність отриманих результатів аналізу погіршується. При збільшенні частоти ультразвуку більше, ніж 7,0 МГц також погіршується правильність та відтворюваність отриманих результатів аналізу

Таблиця 2- Вплив частоти ультразвуку на правильність та відтворюваність результатів визначення сульфат-іонів у водах.

Частота УЗ, МГц	Правильність, %	Відносне стандартне відхилення (S_r)
Стандартний зразок води СЗВ 022.3-20м (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)		
4,5	97,0	0,054
5,0	99,6	0,032
6,0	99,3	0,034
7,0	99,5	0,032
7,5	96,5	0,051
Стандартний зразок води СЗВ 022.3-100вм (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л).		
4,5	89,4	0,057
5,0	92,5	0,043
6,0	92,3	0,045
7,0	92,4	0,043
7,5	82,9	0,059

У цій таблиці та у наступних наведено усереднені результати шести дослідів. Було використано ультразвук інтенсивністю 3,0 Вт/см², час дії ультразвуку – 2 хв.

У табл. 3 наведено вплив інтенсивності ультразвуку на правильність та відтворюваність результатів визначення сульфат-іонів при використанні ультразвукового перемішування. Як

видно з табл. 3, оптимальною інтенсивністю є 3,0 – 5,0 Вт/см². При використанні ультразвуку інтенсивністю менше, ніж 3,0 МГц правильність та відтворюваність отриманих результатів аналізу погіршується. При збільшенні інтенсивності ультразвуку більше, ніж 5,0 Вт/см² також погіршується правильність та відтворюваність отриманих результатів аналізу.

Таблиця 3- Вплив інтенсивності ультразвуку на правильність та відтворюваність результатів визначення сульфат-іонів у водах.

Інтенсивність УЗ, Вт/см ²	Правильність, %	Відносне стандартне відхилення (S_r)
Стандартний зразок води СЗВ 022.3-20м (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)		
2,5	95,0	0,059
3,0	99,6	0,032
4,0	99,1	0,038
5,0	99,0	0,036
5,5	97,3	0,063
Стандартний зразок води СЗВ 022.3-100вм (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л).		
2,5	56,4	0,059
3,0	92,5	0,043
4,0	92,5	0,043
5,0	92,0	0,044
5,5	67,2	0,080

Було використано ультразвук частотою 5 МГц, час дії ультразвуку – 2 хв.

У табл. 4 наведено вплив часу дії ультразвуку на правильність та відтворюваність результатів

визначення сульфат-іонів. Як видно з табл. 4, час дії ультразвуку повинен бути не менш, ніж 2 хв.

При використанні дії ультразвуку протягом часу менше, ніж 2 хв. правильність та відтворюваність.

Таблиця 4- Вплив часу дії ультразвуку на правильність та відтворюваність результатів визначення сульфат-іонів у водах.

Час дії УЗ, хв.	Правильність, %	Відносне стандартне відхилення (S_r)
Стандартний зразок води СЗВ 022.3-20м (атестований вміст сульфат-іонів 19,90 – 20,10 мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 10,0 г/л)		
1,5	76,0	0,065
2,0	99,6	0,032
3,0	99,5	0,034
4,0	99,5	0,035
Стандартний зразок води СЗВ 022.3-100вм (атестований вміст сульфат-іонів 99,1 – 100,7мг/л, загальна мінералізація(NaCl) 50,0 г/л).		
1,5	54,1	0,080
2,0	92,5	0,043
3,0	92,5	0,043
4,0	92,0	0,043

отриманих результатів аналізу є незадовільними. Збільшення часу дії ультразвуку понад 2 хв. не призводить до покращення правильності та відтворюваності отриманих результатів аналізу.

Було використано ультразвук частотою 5 МГц, інтенсивністю - 3,0 Вт/см².

4. Висновок

Вивчено використання ультразвуку при полум'яно-фотометричному визначенні сульфат-іонів у водах непрямим методом по калію. При цьому, осадження сульфат-іонів проводили надлишком малорозчинної сухої солі фосфату калію барію. Показано, що кількість калію, що перейшов у розчин, є пропорційною кількості сульфат-іонів у аналізованій пробі. Для покращення відтворюваності та правильності отриманих результатів, а також для

підвищення експресності аналізу, осадження сульфат-іонів проводили при дії ультразвуку частотою 5,0 – 7,0 МГц, інтенсивністю 3,0 – 5,0 Вт/см² протягом $\geq 2,0$ хв. Розроблена методика визначення сульфат-іонів у водах з мінералізацією до 50 г/л, діапазон визначуваних концентрацій сульфат-іонів 10 – 150 мг/л. Правильність отриманих результатів (визначали з використанням стандартних зразків води УкрНДІсіль СЗВ 022.3-20с, СЗВ 022.3-20м та СЗВ 022.3-20вм) була для води з мінералізацією 50 г/л - 92,5 – 93,1 %, а для води з мінералізацією до 10 г/л - 99,2 – 99,6 %. Відносне стандартне відхилення отриманих результатів аналізу не перевищувало 0,051. Без використання ультразвуку кількісне визначення вмісту сульфат-іонів можливе лише у водах з мінералізацією до 10 г/л з правильністю 90,2 – 91,0%.

Список літератури

- Williams W. J. Handbook of Anion Determination October 22, 2013; Length, 622 p. ISBN: 9781483176741
- Юрченко О.І., Черножук Т.В., Пателєймонов А.В., Бакланова Л.В., Бакланов О.М. Аналітична хімія кухонної солі, розсолів та високо мінералізованих вод: монографія. Харків: Вид. ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2023. 298 с.
- Unified methods of water analysis. Ed. Lurie Yu.Yu.- 2nd ed., corrected - M., "Chemistry", 1973 - 376 p.
- Thangiah A.S.. Spectrophotometric determination of sulphate and nitrate in drinking water at asia-pacific international university campus, muak lek, thailand. *Rasayan J. Chem.* 2019, 12(3), 1503-1508 <http://dx.doi.org/10.31788/RJC.2019.1235201>
- Arup Roy, Bidus Kanti Das, Jayanta Bhattacharya. Development and validation of a spectrophotometric method for measuring sulfate concentration in mine water without interference. *Technical Article*. 2011. Vol.30, 169–174 p.
- Alhameedi D.Y., Alshirifi A.N.. Indirect spectrophotometric method for the determination of separated sulfate from the water samples. 2022, 030022. <https://doi.org/10.1063/5.0094217>
- Sheen R.T., Kahler H.L., Ross E.M.. Turbidimetric Determination of Sulfate in Water. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. 2002, 7(4). DOI:10.1021/ac50096a022
- Loginov Y., Kuznetsov V.. A New Method for the Quantitative Determination of Sulfate Ions in Aqueous Extracts from Soils and in Aqueous Media, and Analytical Equipment for Its Implementation. *Science Journal of Analytical Chemistry*. 2023, 11(1): 1-8. doi: 10.11648/j.sjac.20231101.11
- Pleskach L.I., Chirkova G.D. Method of flame photometric determination of sulfate ions. A.s. 591746. G 01 N 1/28.1978, N 5.
- Yurchenko O., Baklanov A., Chernozhuk T. Chemical applications of ultrasound. On the use of ultrasound in the analyses and technology of brains and sodium chloride solutions. *Lambert academic publishing* .2021, 185.

11. Priego Capote, F., Luque de Castro, M. D.. Ultrasound in analytical chemistry. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2007. 387, 249–257. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0966-4>
12. Yurchenko O.I., Chernozhuk T.V., Baklanov A.N., Cherginets V.L. Sonoluminescence Spectroscopy for the Analysis of Natural Brine. *Analytical letters*. 2023. 3, 1-7 p. <https://doi.org/10.1080/00032719.2023.2273906>

Надійшла (Received) 27.09.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.11.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Юрченко Олег Іванович – зав. кафедри хімічної метрології ХНУ імені В.Н. Каразіна, д.х.н., професор, e-mail: yurchenko@karazin.ua, ORCID: 0000-0002-7117-4556

Yurchenko Oleh Ivanovych – head of Department of Chemical Metrology of KhNU named after V.N. Karazina, DSc (chemistry), professor, e-mail: yurchenko@karazin.ua, ORCID: 0000-0002-7117-4556

Шевченко Іван Романович – аспірант кафедри хімічної метрології ХНУ імені В.Н. Каразіна, e-mail: i.shevchenko@karazin.ua, ORCID: 0009-0002-6944-4016

Shevchenko Ivan Romanovych – postgraduate student of Department of Chemical Metrology of the KhNU named after V.N. Karazina, e-mail: i.shevchenko@karazin.ua, ORCID: 0009-0002-6944-4016

Черножук Тетяна Василівна – доц. кафедри неорганічної хімії ХНУ імені В.Н. Каразіна, к.х.н., доцент, e-mail: t.chernohyk@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-5580-7838

Chernozhuk Tetyana Vasylivna – associate professor Department of Inorganic Chemistry of KhNU named after V.N. Karazina, PhD, associate professor, e-mail: t.chernohyk@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-5580-7838

Бакланова Лариса Володимирівна – доц. кафедри освітніх технологій та охорони праці ХНУ імені В.Н. Каразіна, к.х.н., доцент, e-mail: l.baklanova@karazin.ua, ORCID: 0000-0002-2051-0492

Baklanova Larisa Volodymyrivna – associate professor of Department of Educational Technologies and Labor Protection of V.N. Karazina, Ph.D., associate professor, e-mail: l.baklanova@karazin.ua, ORCID: 0000-0002-2051-0492

Бакланов Олександр Миколайович – проф. кафедри хімічної метрології ХНУ імені В.Н. Каразіна, д.х.н., професор, e-mail: o.baklanov@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-9396-5204

Baklanov Oleksandr Mykolayovych – prof. Department of Chemical Metrology of KhNU named after V.N. Karazina, PhD, professor, e-mail: o.baklanov@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-9396-5204

Flame-photometric determination of sulfate ions in water using ultrasound

Yurchenko O.I., Shevchenko I.R., Baklanova L.V., Chernozhuk T.V., Baklanov O.M.

Abstract

The use of ultrasound in the flame-photometric determination of sulfate-ions in water by the indirect potassium method was studied. At the same time, precipitation of sulfate ions was carried out with an excess of slightly soluble dry potassium barium phosphate salt. It is shown that the amount of potassium that has passed into the solution is proportional to the amount of sulfate ions in the analyzed sample. To improve the reproducibility and correctness of the obtained results, as well as to increase the expressivity of the analysis, the precipitation of sulfate ions was carried out under the influence of ultrasound with a frequency of 5.0 - 7.0 MHz, an intensity of 3.0 - 5.0 W/cm² for a period of time ≥ 2.0 min. A method for determining sulfate ions in waters with mineralization up to 50 g/l has been developed, the range of determined concentrations of sulfate ions is 10 – 150 mg/l. The correctness of the obtained results (determined using standard water samples UkrNDIsil CRM 022.3-20s, CRM 022.3-20m and CRM 022.3-20vm) was for water with mineralization of 50 g/l - 92.5 - 93.1%, and for water with mineralization up to 10 g/l - 99.2 - 99.6%. The relative standard deviation of the analysis results did not exceed 0.051. Without the use of ultrasound, the quantitative determination of the content of sulfate ions is possible only in waters with mineralization up to 10 g/l with an accuracy of 90.2 - 91.0%.

Key words: sulfate-ions, flame-photometric determination, potassium, water, standard samples, correctness, relative standard deviation

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ПРИЛАДИ / MEASURING TRANSDUCERS AND INSTRUMENTS

УДК 622.221

doi: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.05>

РОЗРОБКА НОВИХ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ДІЮЧИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

М.Д. Кошовий, Г.В. Павлик

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

Анотація

Актуальність. При розробці волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин є актуальними задачі подальшого підвищення їх чутливості, точності, надійності, технологічності, спрощення конструкції, зменшення масогабаритних характеристик, розширення функціональних можливостей. **Мета.** Розробка нових та удосконалення діючих волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин; створення методики їх побудови з оптимальними конструктивними параметрами. **Методи дослідження.** Методи аналізу та синтезу, схемотехніки, планування експериментів. **Результати та висновки.** Запропоновані волоконно-оптичні перетворювачі таких фізичних величин, як тиск, кутові та лінійні переміщення, вібрації, прискорення, температура, вологість, деформація, рівень рідини. Розроблена методика побудови волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин з оптимальними конструктивними параметрами.

Ключові слова: волоконно-оптичні перетворювачі, фізична величина, методика, планування експерименту, оптимізація.

1. Вступ

Волоконно-оптичні перетворювачі знаходять широке застосування в різних галузях науки, техніки та промисловості. Наприклад, волоконно-оптичні гіроскопи застосовуються в навігаційних системах літаків, кораблів, ракет; волоконно-оптичні перетворювачі вимірюють температуру у важкодоступних місцях об'єктів; застосовуються в залізничному моніторингу, вимірюванні в нафтових свердловинах, деформації залізобетонних конструкцій [1].

В першу чергу це обумовлено такими перевагами оптичних волокон: захист від електромагнітних перешкод, температуростійкість, корозійна стійкість, водонепроникливість, довговічність, малі масогабаритні характеристики [2, 3].

Характерно, що волоконно-оптичні датчики розвиваються в напрямку підвищення їх чутливості, точності, надійності, технологічності, спрощення конструкції, зменшення масогабаритних характеристик, розширення функціональних можливостей. Тому вирішення цих задач в процесі розробки волоконно-оптичних перетворювачів є актуальною проблемою. Вона також вирішується в процесі виконання договору про науково-технічне співробітництво із Міністерством освіти і науки України № 0124U002436 «Розробка сучасних вимірювальних перетворювачів фізичних величин».

Мета статті: розробка нових та удосконалення діючих волоконно-оптичних перетворювачів фізичних

величин, направлена на ліквідацію виявлених недоліків; створення методики побудови волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин з оптимальними конструктивними параметрами.

2. Виклад основного матеріалу

Співробітниками Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» та Полтавського аграрного університету запропоновано волоконно-оптичні перетворювачі таких фізичних величин: тиск, кутові та лінійні переміщення, вібрації, прискорення, температура, вологість, температура та вологість, деформація залізобетонних конструкцій, рівень рідини.

При розробці датчиків тиску були вирішені наступні задачі, які направлені на покращення їх характеристик:

- підвищення чутливості та точності вимірювання тиску;
- забезпечення автоматичної компенсації температурної похибки в процесі вимірювання тиску;
- забезпечення достатньої надійності і можливості реалізації контролю і діагностики пристрою в процесі його роботи (вбудований контроль, оцінка працездатності мембрани, забезпечення ремонтпридатності датчика);
- спрощення конструкції датчика та його налагодження, підвищення технологічності і універсальності;

- застосування для випробування мембран;
- ліквідація помилки неоднозначності кодування переміщення;
- розширення функціональних можливостей пристрою.

Розробка датчиків кутових переміщень дозволила вирішити такі задачі:

- підвищення точності та швидкодії вимірювання;
- зменшення неоднозначності зчитування інформації;
- розширення діапазону вимірювання;
- спрощення конструкції пристрою, підвищення його надійності і технологічності, зменшення масогабаритних параметрів;
- підвищення роздільності і технологічності кодового диску;
- спрощення обробки результатів вимірювання;
- розширення функціональних можливостей пристрою.

Розроблено датчик лінійного переміщення з підвищеною надійністю за рахунок введення вбудованого контролю.

В процесі розробки датчиків вібрацій були вирішені наступні задачі:

- зменшення температурної похибки та забезпечення керування джерелом світла;
- спрощення конструкції прототипу і підвищення його надійності.

Покращення характеристик датчиків прискорення досягнуто за рахунок вирішення наступних задач:

- забезпечення видачі інформації у цифровому вигляді;
- спрощення конструкції пристрою, підвищення технологічності його виготовлення та зменшення масогабаритних характеристик.

Нові датчики температури отримані в процесі вирішення таких задач:

- підвищення чутливості та точності вимірювання температури;
- забезпечення достатньої надійності, можливості реалізації контролю і діагностики пристрою в процесі його роботи;
- отримання вихідної інформації у двійковому коді;
- спрощення конструкції пристрою.

Розроблено датчик вологості з урахуванням спрощення конструкції пристрою, підвищення його технологічності, забезпечення видачі інформації в цифровому вигляді.

Датчики температури та вологості розроблені за рахунок вирішення наступних задач:

- запобігання взаємного впливу вимірюваних параметрів на результати вимірювання та підвищення технологічності виготовлення датчика;
- розширення функціональних можливостей прототипу.

Розроблено датчик деформації залізобетонних конструкцій за рахунок розширення функціональних

можливостей прототипу, спрощення конструкції та підвищення технологічності пристрою.

При розробці систем вимірювання рівня рідини вирішені такі задачі:

- спрощення конструкції системи та розширення її функціональних можливостей;
- підвищення надійності системи та її технологічності.

Розроблені волоконно-оптичні датчики та системи для вимірювання перерахованих фізичних величин захищені патентами України на корисну модель (Табл. 1).

Таблиця 1 – Перелік отриманих патентів України на корисну модель

Назва пристрою	Номер патенту України на корисну модель
Датчик тиску	91917; 92188; 98865; 98866; 101771; 102828; 118842; 124927; 119363; 124929; 130046; 136505; 143765; 146402; 147516; 147962; 151594
Датчик кутових переміщень	27040; 33044; 61840; 40489; 114368; 119374; 153841; 129946
Датчик лінійних переміщень	152117
Датчик вібрацій	121093; 143766
Датчик прискорення	153842; 154961
Датчик температури	102834; 155266
Датчик вологості	153837
Датчик вологості та температури	122987; 155988
Датчик деформацій	154907
Система рівня рідини	152268; 155846

Для подальшого удосконалення запропонованих волоконно-оптичних перетворювачів фізичних величин необхідно знайти оптимальні значення їх конструктивних параметрів. Рішення цієї задачі можливо при застосуванні методів теорії планування експериментів. А оскільки досліди з реалізації планів експерименту коштовні і вимагають значного часу, тому доцільно застосувати методи оптимального за вартісними та часовими витратами планування експерименту [4]. В роботі [5] проаналізовані методи, які можна застосувати для вирішення вказаної задачі. В таблиці 2 приведені номери свідоцтв авторського права на твір (комп'ютерна програма), які реалізують основні із цих методів.

Після реалізації оптимального за вартісними та часовими витратами плану експерименту, який синтезований комп'ютерною програмою, будується математична модель волоконно-оптичного перетворювача фізичної величини.

З використанням математичної моделі знаходять оптимальні конструктивні параметри

Таблиця 2 – Перелік свідоцтв авторського права
на твір (комп'ютерна програма)

Рік реєстрації	Номер свідоцтва
2006	18150
2009	29920; 29921; 31824
2011	36589; 36940; 40321; 40322
2012	43182; 45746; 45747
2013	48821; 50203
2014	56962
2015	59743; 59744; 62778
2016	63466; 63747; 68266; 68265
2017	71242; 71243; 74877; 74881; 74882
2018	76026; 76027; 83293; 83294; 83295
2019	89032; 89034; 93241; 93242; 93243; 93244
2021	108343
2023	120297
2024	123438; 123439

References

1. Волоконно-оптичні перетворювачі фізичних величин: монографія/ М.Д. Кошовий, О.М. Костенко, Г.В. Павлик, О.В. Світличний. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2024. 93с.
2. Чадюк В.О. Оптиелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. Кн. 1. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во «Політехніка», 2018. 376 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2005. 225 с.
4. Оптимізація планування експерименту при дослідженні технологічних процесів і систем: навч. посіб. з гриф. МОНУ/ М.Д. Кошовий та ін. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2010. 161 с.
5. Кошовий М.Д., Бурлесв О.Л., Пампуха А.І. Аналіз методів оптимального планування багатфакторного експерименту за вартісними та часовими витратами. *Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. 2022. № 75. С. 94-107.

Надійшла (Received) 24.09.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 19.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Микола Кошовий – д.т.н., професор, професор кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: m.koshovyi@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9465-4467

Mykola Koshovyi – DSc, professor, professor of department intelligent measuring systems and quality engineering of National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: m.koshovyi@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9465-4467

Ганна Павлик – к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: h.pavlyk@khai.edu, ORCID: 0009-0000-7045-5981

Hanna Pavlyk – PhD, Associate Professor of department intelligent measuring systems and quality engineering of National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: h.pavlyk@khai.edu, ORCID: 0009-0000-7045-5981

Development of new and improvement of operation fiber-optic conversion of physical quantities

M.D. Koshovyi, H.V. Pavlyk

Abstract

Relevance of the work. When developing fiber-optic converters of physical quantities, the tasks of further increasing their sensitivity, accuracy, reliability, manufacturability, simplifying the design, reducing mass-dimensional characteristics, and expanding functional capabilities are relevant. **Goal.** Development of new and improvement of existing fiber-optic converters of physical quantities; creating a method of their construction with optimal design parameters. **Research methods.** Methods of analysis and synthesis, circuitry, planning of experiments. **Results and conclusions.** Proposed fiber-optic converters of such physical quantities as pressure, angular and linear movements, vibrations, acceleration, temperature, humidity, deformation, liquid level. A technique for building fiber-optic converters of physical quantities with optimal design parameters has been developed.

Keywords: fiber optic converters, physical quantity, technique, experiment planning, optimization.

МОДЕЛЮВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОРТАТИВНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО- АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ

Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, С.Ю. Плєснецов, Ю.Ю. Кошкарів, М.Е. Кальницький
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інституту», м. Харків, Україна.

Анотація

Для контролю феромагнітних металовиробів використовують ультразвукові електромагнітно – акустичні перетворювачі (ЕМАП) з постійними магнітами. Це призводить до сильного притискання ЕМАП до металу, його зносу, появи значних когерентних завад за рахунок налипання феромагнітних часток, що часто приводить до неможливості виконання вимірювань, контролю та діагностики. Вирішити вказані недоліки можливо за рахунок використання імпульсних магнітів, що підтверджує актуальність роботи. Мета роботи визначити раціональні геометричні параметри імпульсного магніту для ЕМАП. Для досягнення вказаної мети сформульована фізико-математична задача і виконано моделювання з використанням пакету Comsol Multiphysics. Встановлено, що для забезпечення ефективної роботи ЕМАП доцільно висоту імпульсного магніту вибирати з діапазону 50...60 мм, розміри полюса 30х30...50х50 мм. Такі параметри забезпечують отримання величини індукції квазістаціонарного магнітного поля не менше 0,35 Тл в інтервалі ± 10 мм від центру полюса імпульсного магніту.

Ключові слова: контроль, вимірювання, діагностика, ультразвук, електромагнітно – акустичний перетворювач, імпульсне джерело магнітного поля

1. Вступ

На цей час розроблені і випускаються електромагнітно – акустичні (ЕМА) перетворювачі (ЕМАП) в складі яких використовують джерела постійного магнітного поля [1-2]. Такі ЕМАП мають два основні суттєві недоліки – сильне притягування до феромагнітних виробів і потужні когерентні завади, які виникають із-за налипання до перетворювача феромагнітних часточок та окалини.

В роботах [3-6] запропоновані магнітні системи, які використовують імпульсні електромагніти, що створюють потужне магнітне поле на час порядку декількох мілісекунд, тому притягування ЕМАП до феромагнітних матеріалів практично відсутнє. Як стверджується деякими фахівцями, значення індукції, створеної імпульсними електромагнітами можуть перевищувати в кілька разів значення, що формуються магнітними джерелами на постійних магнітах. Так, Альохін С.Г. [7] вважає, що нормальна компонента імпульсного магнітного поля повинна бути не менше 0,6 Тл при часовій тривалості 70 ... 300 мкс. В іншій частині дисертації він стверджує, що тривалість імпульсу намагнічування повинен бути не менше 1 мс? В той же час для постійних магнітів індукція магнітного поля досягає 1,2 Тл [5-7]. Тобто є невідповідності в побудові ЕМАП з імпульсним намагнічуванні, в порівнянні з перетворювачами з постійним намагнічуванням, які потрібно досліджувати.

Мета роботи. Визначити раціональні значення параметрів конструкції джерела імпульсного намагнічування прямого ЕМАП для ультразвукового контролю, вимірювання і діагностики.

2. Моделювання джерела імпульсного магнітного поля накладного

суміщеного електромагнітно – акустичного перетворювача для контролю феромагнітних металовиробів

На сьогоднішній день відомі два основні способи теоретичного розрахунку магнітних та геометричних параметрів магнітних ланцюгів: розв'язання системи рівнянь Максвелла та розрахунки з використанням магнітних аналогів законів повного струму, Ома та Кірхгофа [8-9].

Найчастіше для розрахунку пристроїв неруйнівного контролю використовують саме другу методику розрахунків [9-10]. Цей спосіб розрахунку передбачає ряд припущень, і вважається, що отримані результати є оціночними. Для завдань магнітостатики (в нашому випадку квазімагнітостатики), в яких амплітуда поля не змінюється в часі впродовж заданого часу t , напруженість H магнітного поля і магнітну індукцію B можна описати наступними виразами

$$\nabla \times H = j + \partial D / \partial t = J, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (2)$$

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (3)$$

де: j - щільність електричного струму (щільність струму провідності), А/м²; J - щільність повного струму (сума щільності електричного струму провідності та щільності струму зміщення), А/м²; D - електрична індукція, Кл/м²; t - час, с; μ - відносна магнітна проникність матеріалу; μ_0 - магнітна проникність вакууму, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

При нелінійних властивостях матеріалу виробу магнітна проникність буде функцією від H :

$$\mu(H) = B(H) / \mu_0 H \quad (4)$$

Для розрахунку магнітних кіл доцільно виразити поле, що задовольняє рівнянням (1) - (3)

через векторний магнітний потенціал $\mathbf{A}$. Густина магнітного потоку визначається через векторний магнітний потенціал як:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

Тоді вираз (1) можна переписати наступним чином:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A} / \mu(\mathbf{H})) = \mu_0 \mathbf{J}. \quad (6)$$

Для лінійного ізоотропного матеріалу (вважаючи, що $\nabla \times \mathbf{A} = 0$) вираз (6) буде мати вигляд:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}. \quad (7)$$

За допомогою виразу (1) можуть бути вирішені задачі квазімагнітостатики з урахуванням нелінійної залежності $\mathbf{B}(\mathbf{H})$. У загальному тривимірному випадку векторний потенціал $\mathbf{A}$ є вектором з трьома компонентами. Для двовимірного випадку плоских та осесиметричних задач два з трьох компонентів дорівнюють нулю, і для вирішення задачі залишається визначити лише одну компоненту.

Для розрахунку магнітного ланцюга необхідно обчислити всю сукупність точок в заданому об'ємі, вирішуючи в кожній з них рівняння (1) - (7). Для вирішення цієї задачі часто використовують метод кінцевих елементів.

Комп'ютерне моделювання є нині найважливішою складовою процесу проектування пристроїв різних типів, що пояснюється необхідністю скорочення термінів розробки нових пристроїв, а також наявністю ефективних алгоритмів та програм комп'ютерного моделювання електричних та магнітних ланцюгів. Для цього нами використано пакет програм Comsol Multiphysics. При дослідженнях будемо враховувати наступне: в якості ОК розглянемо виріб у вигляді напівплощини, виготовлений з феромагнітного матеріалу, рис.1; для зменшення габаритів розробці підлягає суміщений ЕМАП, що збуджує і приймає імпульси зсувних ультразвукових коливань, які мають високу виявляємість внутрішніх дефектів ОК; імпульсне джерело магнітного поля ультразвукового перетворювача повинне формувати в поверхневому шарі ОК силові лінії нормально його поверхні; магнітне поле в поверхневому шарі ОК повинне бути квазістабільним на протязі заданого проміжку часу при збудженні і прийомі ультразвукових імпульсів.

Враховуючи викладене розглянемо фізичну модель ЕМАП з імпульсним джерелом магнітного поля, яка необхідна для розрахунку магнітного поля, рис. 1. Оскільки коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову і навпаки має залежність від індукції магнітного поля квадратичну, то надалі будемо розглядати параметри джерела квазіпостійного магнітного поля. При цьому вважатимемо, що імпульс намагнічування досягає максимального значення і підтримується на протязі заданого часу, необхідного для збудження і прийому ультразвукових імпульсів з ОК.

На рис. 1 позначені: 1 – корпус; 2 – протектор; 3 – джерело магнітного поля; 4 – сердечник джерела магнітного поля; 5 – котушка намагнічування; 6 –

полюс джерела магнітного поля; 7 – плоска високо частотна котушка індуктивності; 8 – набір ізолюваних між собою тонких феромагнітних пластин; 9 – торці ізолюваних між собою тонких феромагнітних пластин; 10 – ОК. H_1 – висота пластин сердечника джерела імпульсного магнітного поля; H_2 – ширина стрічки котушки намагнічування. D – внутрішній дефект в ОК.

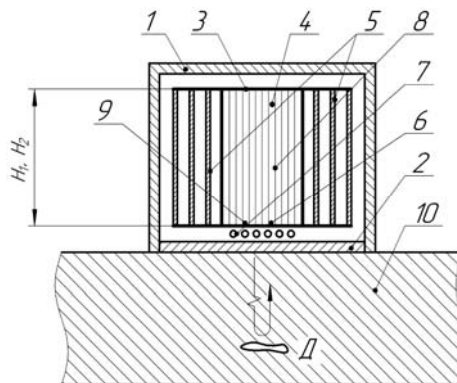


Рис. 1. Фізична схема збудження і прийому ультразвукових імпульсів електромагнітно-акустичним перетворювачем з імпульсним намагнічуванням в феромагнітному виробі

Виконання сердечника 4 з набору 8 ізолюваних між собою тонких феромагнітних пластин так, що висота H_1 пластин набагато більша ніж їх ширина, дозволяє підвищити величину індукції магнітного поля, збільшити таким чином потужність збуджених ультразвукових імпульсів та чутливість ЕМАП.

Виготовлення котушки 5 намагнічування джерела 3 магнітного поля з широкої тонкої стрічки, матеріал якої неферомагнітний і має високу електропровідність, при цьому ширина H_2 стрічки дорівнює висоті H_1 наборного сердечника 4 джерела 3 магнітного поля, що додатково збільшує величину індукції магнітного поля за рахунок перерозподілу струму по ширині котушки 5 намагнічування.

Для забезпечення гострої діаграми спрямованості ультразвукового поля зсувних лінійно поляризованих ультразвукових хвиль в об'ємі ОК нормально його поверхні робоча зона плоскої високо частотної котушки індуктивності (поз.7 рис.1), як правило [12], має розмір $30 \times 15 \text{ мм}^2$. Тому мінімальний розмір торця (полюса) сердечника імпульсного електромагніту повинен бути не менше $30 \times 30 \text{ мм}^2$. З іншої сторони максимальний розмір полюса сердечника імпульсного електромагніту повинен бути не більше $50 \times 50 \text{ мм}^2$, що визначається умовами проведення сканування поверхні ОК оператором ультразвукового портативного ЕМА приладу. При розрахунках ширина полюса магніту (в перетині) була в діапазоні $30 \dots 60 \text{ мм}$, висота сердечника $10 \dots 100 \text{ мм}$ при змінній відстані від магніту до поверхні ОК.

Встановлено, що величина амплітуди ультразвукового сигналу зростає для висоти сердечника H_1 (рис.1) близько $50 \dots 60 \text{ мм}$. Надалі його зростання практично припиняється. Приклад отриманих результатів наведено на рис.2.

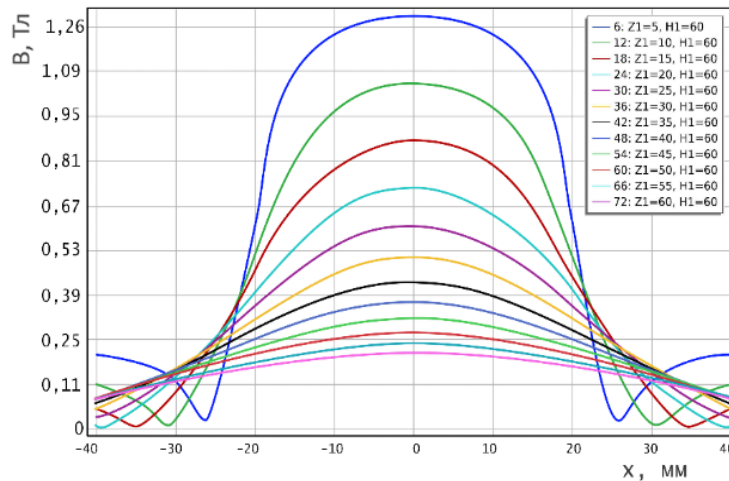


Рис. 2. Розрахунковий розподіл величини нормальної компоненти індукції квазіпостійного магнітного поля під полюсом ЕМАП в залежності від величини зазору між металом і об'єктом контролю

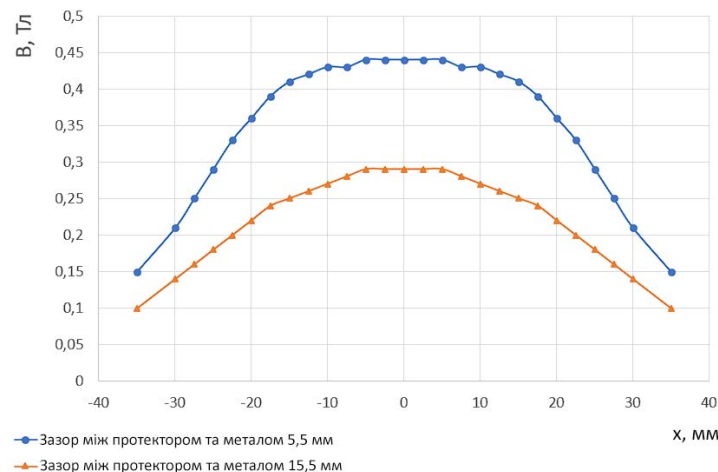


Рис.3. Розподіл величин нормальної компоненти індукції квазістаціонарного магнітного поля від центра полюса при висоті сердечника магніту 60 мм при різних зазорах від полюса до поверхні ОК, які отримані експериментально

Експериментальна перевірка результатів моделювання виконана для сердечника імпульсного магніту висотою 60 мм та розмірів його полюсів $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Один із результатів вимірювань наведено на рис. 3.

Аналіз отриманих експериментальних результатів якісно підтверджує дані моделювання. Проте збільшення індукції квазістаціонарного магнітного поля не настільки велике, як можна було чекати. Цей ефект скоріш за все обумовлений насиченням металу сердечника магніту нелінійним чином.

3. Висновки

Аналіз даних, отриманих при моделюванні, дозволяє зробити наступні висновки: для отримання достатньої для роботи ЕМАП величини нормальної

компоненти індукції квазістаціонарного магнітного поля (не менше 0,35 Тл) на відстані $Z1$ між полюсом магніту і ОК рівного 30 мм висоту магніту слід вибирати в діапазоні 50...60 мм; величина нормальної компоненти індукції магнітного поля B межах ± 10 мм від центру полюса магніту (активна зона ЕМАП) не змінюється більш, ніж на 10%, що є достатнім для формування в ОК діаграми спрямованості ультразвукового поля при прийомі та випромінюванні імпульсів ультразвукових коливань; при збільшенні зазору $Z1$ (рис.2) ширина залежності нормальної компоненти індукції магнітного поля на границі його максимального значення також збільшується, що дає можливість формувати більш гостру діаграму спрямованості ультразвукового поля за інших рівних умов.

Список літератури

1. Суворова М.Д. Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. № 1. 2019. 63-73.
2. Сайт канадської фірми Innerspec [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors>. (Дата звернення: 19.09.2021).
3. Xie C, Liu T, Pei C, Jin Y, Chen Z. A new longitudinal mode guided-wave EMAT with periodic pulsed electromagnets for non-ferromagnetic pipe. Sensor Actuat APhys. 2021;331(1):112991. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112991>.

4. Сучков Г.М., Салам Буссі. Моделирование поляризуемого магнитного поля электромагнитно-акустического перетворювача електромагнітної енергії в ультразвукову / Тези 19 міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатики та моделювання». 11-16 вересня 2019 р. – Кароліно-Бугаз. – С. 79.
5. Донченко А.В., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Кропачек О.Ю. Патент на корисну модель №156088. Накладний суміщений електромагнітно - акустичний перетворювач з імпульсним намагнічуванням для контролю ферромагнітних металовиробів. Заявка №U202304534 від 25.05.2023 р. Опубл. 08.05.2024. Бюл. №19.
6. Ambuj K. Gautam, Ching-Chung Yin, Bishakh Bhattacharya. A new chevron electromagnetic acoustic transducer design for generating shear horizontal guided wave // *Ultrasonics*. 2023. V. 135. Pp.107-137.
7. Shevaldykin V.G., Bobrov V.T., Alekhin S.G. EMAT transformation in pulsed magnetic field and its use in portable instruments for acoustic measurements. 16th World Conference on Nondestructive Testing. Montréal, Canada. August 30 – September 3, 2004. Book of Abstracts. TS3.24.3. P. 88.
8. Mihajlov A.V., Gobov Ju.L., Smorodinskij Ja.G., Shherbinin S.V. Pulsed magneto-acoustic transducer // *Defektoskopija*. 2015. №8. С. 14-23.
9. Suchkov G.M., Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Yu. Increasing the Efficiency of the Surface-Mounted Ultrasonic Electromagnetic-Acoustic Transducer Due to the Magnetic Field Source. *Технічна електродинаміка*. № 2, 2023, С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.003>.
10. Thomas, S.; Muazu, H.; Zarma, T.A.; Galadima, A. Finite Element Analysis of EMAT Using Comsol Multiphysics. In Proceedings of the 2017 13th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Abuja, Nigeria, 28–29 November 2017.
11. Буссі Салам. Електромагнітно – акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів. Дис. к.т.н. 2020. НТУ «ХПІ». 158 с.
12. Плєснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків, 2021. 40 с.

Надійшла (Received) 15.09.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 21.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Сучков Григорій – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>.

Suchkov Hryhorii – doctor of Science, Professor, Professor of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (NTU “KhPI”), E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>.

Мигущенко Руслан – доктор технічних наук, професор, проректор НТУ «ХПІ», E-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>.

Mygushchenko Ruslan – doctor of Science, Professor, vice-rector of the NTU “KhPI”, E-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>.

Плєснецов Сергій – доктор технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «ХПІ»; E-mail: rastrelly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>

Pliesnetsov Serhii – doctor of Science, Docent of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department, NTU “KhPI”, E-mail: rastrelly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>

Кошкаров Юрій – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки НТУ «ХПІ», E-mail: koshkarov@meta.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1430-0154>.

Koshkarov Yurii – PhD, senior researcher leading researcher of the research laboratory of Faculty of Weapons and Military Technology Higher Educational Institution NTU “KhPI”, E-mail: koshkarov@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1430-0154>.

Кальницький Максим — аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики НТУ «ХПІ», E-mail: kalnytsky94@gmail.com.

Kalnytsky Maksym — postgraduate student of computer and radioelectronic systems for testing and diagnostics department, NTU “KhPI”, E-mail: kalnytsky94@gmail.com.

Simulation of pulse magnetic field sources of portable ultrasound electromagnetic-acoustic transducer for measurements, control and diagnostics

Suchkov H.M. Mygushchenko R.P., Pliesnetsov S.Yu. Koshkarov Yu.Yu., Kalnytsky M.E.

Abstract

Ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers (EMAT) with permanent magnets are used in ferromagnetic metal products inspection. This leads to a strong pressing of the EMAT to the metal, its wear, the appearance of significant coherent interference due to the sticking of ferromagnetic particles, which often leads to the impossibility of performing measurements, testing and diagnostics. It is possible to solve the indicated shortcomings via introduction of pulse magnets confirming the relevance of the work. The purpose of the work is to determine the rational geometric parameters of the pulse magnet for EMAT. To achieve this goal, a physical and mathematical problem was formulated and simulations were performed using the Comsol Multiphysics package. It has been established that to ensure the effective operation of the EMAT it is advisable to set the height of the pulse magnet within the range of 50...60 mm, the dimensions of the pole 30x30...50x50 mm. Such parameters ensure that the induction value of the quasi-stationary magnetic field is not less than 0.35 T in an interval of ± 10 mm from the center of the pulse magnet pole.

Key words: testing, measurement, diagnostics, ultrasound, electromagnetic-acoustic transducer, pulsed magnetic field source.

РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ І ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ НАПРУГ У МЕТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБАХ

Б. Горкунов, С. Львов, В. Олійник, В. Вевенко

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

Анотація

Розглянуті теоретичні основи і алгоритм реалізації диференціального трансформаторного електромагнітного перетворювача накладного типу для контролю зміни електромагнітних параметрів феромагнітного вала, на який діє обертовий момент. Створена експериментальна установка та отримано характеристики перетворювача для амплітудного, фазового та змінно-частотного методів контролю. Із отриманих залежностей видно, що при використанні диференціального методу, в якості інформативних параметрів є магнітна проникність та частота струму намагнічування, які є найбільш чутливими до зміни механічних навантажень циліндричного виробу. Встановлено, що така система має високу розрізняльну здатність і розширені функціональні можливості.

Ключові слова: обертовий момент, діагностування, електромагнітний метод, трансформаторний електромагнітний перетворювач, диференціальний метод, функції перетворення.

1. Вступ

До теперішнього часу підвищений науковий та практичний інтерес представляє розвиток і вдосконалення методів та засобів для визначення фізико-механічних величин. Визначення механічних зусиль необхідне в багатьох галузях народного господарства, так як є невід'ємною частиною різних випробувань, наукових досліджень, технологічних процесів, технічної та медичної діагностики та в інших випадках [1-6,10,11]. Діапазони виміру зусиль досить широкі: внутрішні напруження в матеріалах становлять $0 \div 2000$ МПа, сили - від 0 до 10^9 Н, моменти - від 0 до 10^8 Н·м, тиску – $0 \div 10^3$ МПа. Вимір зусиль потрібно робити в різних середовищах, в умовах дії різноманітних величин, що впливають, у широкому діапазоні температур та частотному спектрі.

Досить актуальне завдання створення засобів контролю та технічної діагностики різноманітних машин, механізмів і елементів їх конструкцій при динамічних режимах роботи. Для їх вирішення досить перспективним є використання електромагнітних методів, які дозволяють створити перетворювачі з такими позитивними якостями, як слабка залежність від зміни властивостей навколишнього середовища (вологість, забруднення поверхні та ін.), безконтактність, простота конструкції, висока швидкодія, надійність, універсальність і технологічність електрична форма вихідного сигналу [2-6].

2. Мета статті

Вирішення питань розробки, дослідження нових електромагнітних методів і пристроїв для визначення фізико-механічних параметрів, а також завдання вдосконалення існуючих методів і засобів є досить актуальним і перебуває постійно в центрі

уваги фахівців різних науково-дослідних інститутів і лабораторій. Тому, метою роботи є, вдосконалення існуючих і створення нових електромагнітних методів і пристроїв для безконтактного контролю фізико-механічних величин (механічних напруг, деформацій, зусиль, моментів скручування та ін.).

Дослідження показують, що для абсолютних методів безконтактного електромагнітного контролю відносні похибки визначення магнітних μ_r і електричних ρ параметрів циліндричних виробів навіть у раціональній області зміни узагальненого параметра x складають 2% і 4% відповідно. Остання обставина вказує на те, що зміна електромагнітних параметрів, вимірюваних абсолютним методом, повинна перевищувати хоча б на порядок, тобто в 10 разів більше при переході від одного стану виробу до іншого. Тому абсолютними методами практично неможливо користуватися для контролю механічних напруг, оскільки чутливість перетворювача не дозволяє контролювати досить незначні зміни електромагнітних параметрів μ_r і ρ виробів при впливі на них механічних зусиль у рамках застосовності закону Гука [2,7].

3. Виклад основного матеріалу

У роботі запропоновані диференціальний електромагнітний перетворювач. Диференціальні методи широко використовуються у вимірювальній техніці для підвищення розрізняльної здатності (чутливості) пристроїв і підвищення точності контролю. За допомогою приладів, які працюють на основі диференціального методу, визначаючи зміну контрольованого параметра навіть із не високою точністю, одержують абсолютні значення контрольованого параметра з досить високою точністю [7].

Для підвищення чутливості безконтактного контролю механічних напруг у металевих зразках в роботі запропоновано один з варіантів диференціального трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП) накладного типу для безконтактного контролю механічних моментів скручування вала.

На рис. 1 наведена функціональна схема розміщення диференціального ТЕМП накладного типу та досліджуваного циліндричного зразка, який в середині жорстко затиснений, на один кінець діє момент $M = 0$, а на другий діє момент скручування $M \neq 0$.

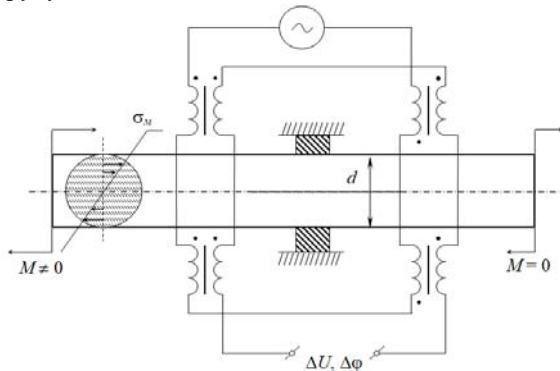


Рис. 1. Диференціальний ТЕМП накладного типу для контролю електромагнітних параметрів феромагнітного вала, на який діє момент скручування M

Диференціальний ТЕМП складається із двох пар ідентичних трансформаторів, причому одна пара трансформаторів розташована з обох сторін зразка на який діє механічний момент скручування, а друга пара трансформаторів розташована по обидва боки ненавантаженого зразка.

Всі чотири первинні (намагнічуючі) обмотки ТЕМП з'єднані між собою послідовно узгоджено та підключені до генератора синусоїдального струму. Вторинні (вимірювальні) обмотки кожної пари з'єднані послідовно узгоджено, а між собою пари обмоток з'єднані послідовно зустрічно. Тому на виході диференціального ТЕМП отримаємо різницеве значення напруги та фази. Варто відмітити, що таке включення обмоток перетворювача і їхнє розміщення в першому наближенні зменшує вплив зазору на результати контролю [2,11].

Так, наприклад, для ТЕМП накладного типу, розташованого над криволінійною поверхнею (циліндр, сфера) формула для напруги вихідного сигналу в загальному вигляді буде [1-3]:

$$\dot{U}_{\text{вн}} = j\mu_0 W_n W_u \omega I R \pi \times \int_0^{\infty} \phi_{\text{ок}} \exp(-xh_*) J_1(x\sqrt{a_n/a_u}) J_1(x\sqrt{a_u/a_n}) dx, \quad (1)$$

де $R = \sqrt{a_n a_u}$ – еквівалентний радіус ЕМП;

$h_* = (h_n + h_u)/R$ – узагальнений параметр, що характеризує відстань між центрами обмоток ЕМП і поверхнею ОК; h_n і h_u – відстань від центра відповідної обмотки ЕМП до зовнішньої поверхні ОК; $J_1(x\sqrt{a_n/a_u})$, $J_1(x\sqrt{a_u/a_n})$ – функції Бесселя [8] першого роду першого порядку; $\phi_{\text{ок}}$ – функція впливу ОК, тобто комплексна функція, що залежить від граничних умов і характеризує вплив ОК із площинно-паралельними шарами та обумовлена питомою електричною провідністю, магнітною проникністю та товщиною відповідних шарів

$$\phi_{\text{ок}} = \frac{\mu_r x - \sqrt{x^2 + j\mu_r \beta^2}}{\mu_r x + \sqrt{x^2 + j\mu_r \beta^2}}. \quad (2)$$

В роботі проведені експериментальні дослідження безконтактного контролю механічного навантаження циліндричних феромагнітних виробів з допомогою диференціального ТЕМП накладного типу, при реалізації змінно-частотного методу при фіксованому значенні узагальненого параметру x [9].

Суть змінно-частотного методу полягає в тому, щоб зміною частоти f струму намагнічування ЕМП домогтися сталості величини $x = \text{const}$, а значить і глибини проникнення магнітного поля в досліджуваний виріб.

На рис. 2 показана лабораторна установка, яка використовувалась для дослідження залежності вихідного сигналу диференціального ТЕМП накладного типу від величини механічного моменту скручування циліндричного феромагнітного виробу.

В якості об'єкта дослідження обрано циліндричний вал, що піддається механічній деформації під дією моменту скручування. Діаметр вала із початковими (без навантаження) значеннями $\mu_r = 500$ і $\rho = 1,210 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.



Рис. 2. Лабораторна установка для дослідження залежності вихідного сигналу диференціального ТЕМП накладного типу від величини механічного моменту скручування циліндричного феромагнітного виробу

Поблизу нього розташований диференціальний ТЕМП накладного типу з феромагнітним осердям, що підвищує його чутливість. ТЕМП містить намагнічуючу обмотку, із числом витків $W_n = 100$, намотану дротом ПЕВ - 0,2 мм і чотири вимірювальні обмотки із числом витків $W_b = 50$ витків кожна, намотаними дротом ПЕВ - 0,1 мм. Всі обмотки розташовані на П - образному феритовому осерді.

У табл. 1 і табл. 2 наведені результати експерименту отримані на дослідній установці, що реалізує змінно-частотний метод визначення μ_r і ρ для двох фіксованих значень узагальненого параметра x .

Таблиця 1 – Залежність μ_r і ρ від механічного напруження σ_m для $x = 2$.

σ_m , МПа	f , Гц	U , В	ϕ , град	μ_r	$\rho \cdot 10^{-7}$, Ом·м
0,00	1178	0,220	22,1	340	1,11
2,26	957	0,224	22,4	432	1,15
4,53	874	0,230	22,6	490	1,19
6,79	824	0,235	22,7	534	1,22
9,05	788	0,238	22,8	564	1,23
11,32	774	0,240	22,9	582	1,25

Таблиця 2 – Залежність μ_r і ρ від механічного напруження σ_m для $x = 3$.

σ_m , МПа	f , Гц	U , В	ϕ , град	μ_r	$\rho \cdot 10^{-7}$, Ом·м
0,00	2634	0,576	31,2	350	1,14
2,26	2215	0,585	31,4	435	1,19
4,53	2028	0,596	31,6	488	1,22
6,79	1903	0,604	31,9	532	1,25
9,05	1802	0,613	32,0	569	1,27
11,32	1734	0,622	32,2	600	1,28

Отримані дані з табл. 1 і табл. 2 дозволяють визначити диференціальні чутливості параметрів U , ϕ , f , μ_r і ρ до механічної напруги σ_m .

Як відомо [7], відносні чутливості зазначених параметрів до величини σ_m можна визначаються похідними вихідних величин до σ_m . Тому, відносні зміни $\delta U/U_0$, $\delta \phi/\phi_0$, $\delta f/f_0$, $\delta \mu_r/\mu_{r0}$ і $\delta \sigma/\sigma_0$ можна визначити як:

$$\frac{\delta U}{U_0} = \frac{\partial U}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{U_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (3)$$

$$\frac{\delta \phi}{\phi_0} = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{\phi_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (4)$$

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{f_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (5)$$

$$\frac{\delta \mu_r}{\mu_{r0}} = \frac{\partial \mu_r}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{\mu_{r0}} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (6)$$

$$\frac{\delta \rho}{\rho_0} = \frac{\partial \rho}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{\rho_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}. \quad (7)$$

На графіках рис. 3–7 наведені зображення залежностей відносних збільшень вимірюваних величин U , ϕ , f , μ_r і ρ від відносного збільшення величини σ_m , тобто від $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$, де σ_{m0} – середнє значення механічної напруги у виробі.

Всі результати, які наведені на рис. 3–7, отримані для режиму роботи ТЕМП при $x = 2$, а в якості робочого (середнього) був обраний режим, що відповідає значенням: $U_0 = 0,233$ В; $\phi_0 = 22,6$ град; $f_0 = 846$ Гц; $\mu_{r0} = 500$; $\rho_0 = 1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м і $\sigma_{m0} = 5,69$ МПа.

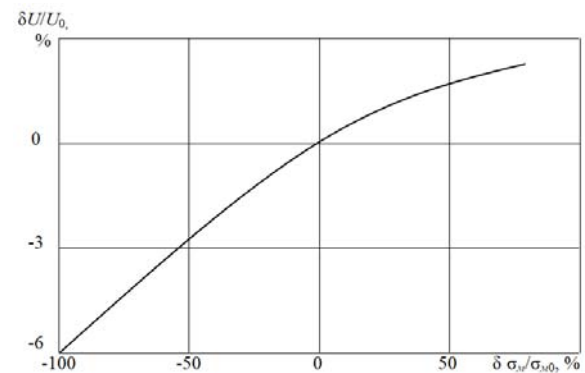


Рис. 3. Відносні збільшення величини U від дії відносного механічного навантаження $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$

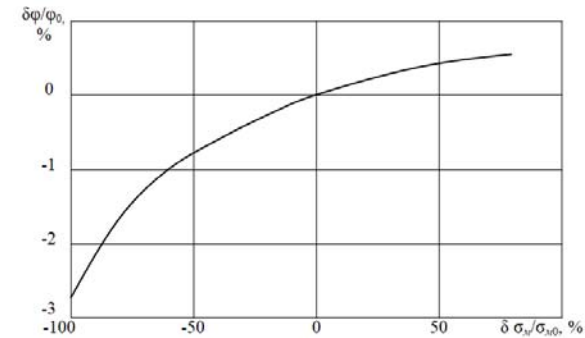


Рис. 4. Відносні збільшення величини ϕ від дії відносного механічного навантаження $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$

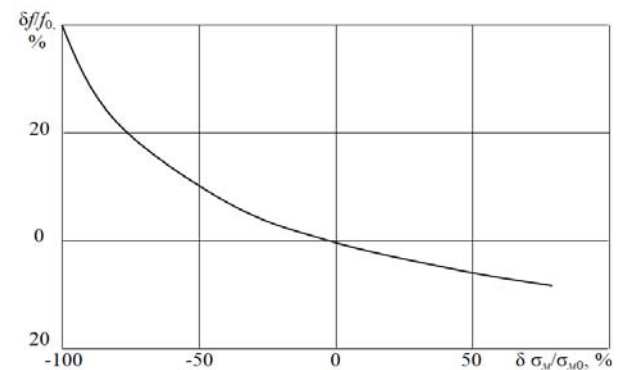


Рис. 5. Залежність відносних збільшень величини f від дії відносного механічного навантаження $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$

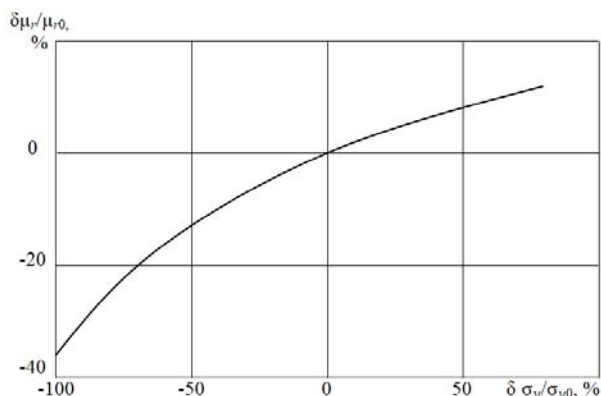


Рис. 6. Відносні збільшення величини μ_r від дії відносного механічного навантаження $\delta\sigma_m / \sigma_{m0}$

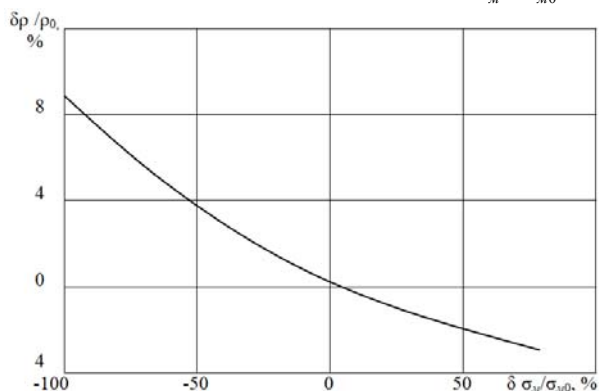


Рис.7. Відносні збільшення величини ρ від дії відносного механічного навантаження $\delta\sigma_m / \sigma_{m0}$

З отриманих графіків видно, що при використанні диференціального методу доцільне застосування як інформативні параметри відносної магнітної проникності μ_r і частоти струму намагнічування f . Саме ці параметри, у порівнянні з іншими, дають найбільшу чутливість ТЕМП до зміни механічної напруги σ_m . Приміром, середня чутливість до частоти $(\delta f / f_0) \approx 47\%$, а до магнітної проникності $\delta\mu_r / \mu_{r0} \approx 45\%$.

Це підтверджує той факт, що вплив механічного навантаження більшою мірою відбивається на магнітних властивостях феромагнітного матеріалу зразка й визначення σ_m через μ_r дає більшу чутливість у порівнянні із залежністю σ_m від ρ .

Диференціальний ТЕМП в комплексі об'єднує магнітопружний і тензометричний ефекти, його легко адаптувати на розв'язання задач визначення механічних моментів скручування, що виникають у циліндричних виробах (валах), виготовлених як з феромагнітних, так і немагнітних металів. Формування ТЕМП в якості інформаційного електричного сигналу дозволяє розширити функціональні можливості розробленого датчика при використанні в автоматизованих системах безперервного безконтактного контролю параметрів окремих елементів кінематичних схем.

Як показано раніше, а також у роботах [2-6,11] розглянуті три методи (амплітудний, фазовий та

змінно-частотний), що використовуються для контролю механічних напружень, деформацій, зусиль, моментів. Суть амплітудного та фазового методів полягає в тому, що при механічному впливі на феромагнітний зразок, розміщений в електромагнітний перетворювач, вимірюють амплітуду U або фазу ϕ вихідного сигналу перетворювача. Приміром, формули для визначення механічної напруги σ_m при використанні амплітудного та фазового методів у межах закону пружності мають вигляд [2]:

$$\sigma_m = \pm k_a \left(\frac{x^2(U)}{x_0(U)} - 1 \right); \quad (8)$$

$$\sigma_m = \pm k_\phi \left(\frac{x^2(\phi)}{x_0(\phi)} - 1 \right), \quad (9)$$

де «+» і «-» - відповідають розтягуванню та стисканню виробу відповідно; k_a і k_ϕ - розмірний коефіцієнт; $x(U)$, $x(\phi)$ - залежність узагальненого параметра x від U і ϕ при навантаженому виробі $x_0(U)$, $x_0(\phi)$ - ті ж функції з виробом, але без навантаження.

Змінно-частотний метод (амплітудний і фазовий) полягає в тому, що спочатку, під час відсутності механічного навантаження у виробі, встановлюють значення частоти поля намагнічування f_n , що відповідає раціональному режиму роботи ЕМП. При цьому, фіксують значення U або ϕ вихідного сигналу ЕМП. Потім, при кожному фіксованому механічному навантаженні зразка, змінюють значення частоти поля доти, поки амплітуда (фаза) вихідного сигналу ЕМП стане такою ж, як U і ϕ при відсутності механічного навантаження. Для змінно-частотного методу формула для визначення σ_m має вигляд:

$$\sigma_m = \pm k_f \left(\frac{f_k}{f_n} - 1 \right), \quad (10)$$

де k_f - розмірний коефіцієнт; f_k і f_n - частоти поля навантаженого й ненавантаженого зразка.

4. Висновки

Вирази (8)-(10) і отримані залежності U , ϕ і f від механічної напруги σ_m дозволяють визначити розрізняльну здатність ЕМП. Приміром, в області пружної деформації розрізняльна здатність ЕМП при використанні амплітудного, фазового та змінно-частотного методів становить 6,6 мВ/МПа; 0,3 град/МПа і 25 Гц/МПа відповідно. Звідси можна зробити висновок, що змінно-частотний метод дозволяє одержати максимальну чутливість до механічної напруги. Описані в роботі методи спільного визначення μ_r і ρ дозволяють установити функціональні залежності $\mu_r = f(\sigma_m)$ і $\rho = f(\sigma_m)$ та визначити відносні чутливості S_{μ_r} і S_ρ , які становлять 10% і 5% відповідно.

Список літератури

1. Патон Б.Є. Неразруйний контроль якості в Україні / Б.Є. Патон, В.А. Троїцький, Ю.М. Посипайко / Неруйнівний контроль та технічна діагностика: наук.-техн. конф., 19 – 23 травня 2003р.: матер. конф. К.: 2003. С. 11–14.
2. Горкунов Б.М., Львов С.Г., Борисенко Є.А. Теоретичні та практичні основи побудови електромагнітних перетворювачів для багатопараметрового контролю металевих виробів. Монографія, Харків: Факт, 2022. 349 с.
3. Gorkunov B., Lvov S., Borysenko Y., Saliba Abdel Nour. Contactless electromagnetic method for monitoring mechanical stresses in cylindrical products. The scientific heritage. Budapest, Hungary, N 70 Vol.1 (2021). PP 35-42.
4. Горкунов Б.М., Львов С.Г., Сиренко М.М., Шибан Тамер. Багатопараметровий електромагнітний перетворювач для систем контролю та діагностики. Електротехнічні та комп'ютерні системи. Одеса: ОНПУ, 2019. №30(106). С.218-225.
5. Gorkunov B., Lvov S., Borysenko Y., Issam Chahine. Aspects of the design of the electromagnetic transducer for diagnosing machinery elements. / 3rd Conference proceedings. Week on Advanced Technology IEEE. October 03-07, 2022, Kharkiv, Ukraine. P. 390-393. doi:10.1109/KhPI 57572.2022.9916376.
6. Gorkunov B., Lvov S., Borysenko Y. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing. Системи обробки інформації. 2018. Вип.4(155). С.92-97. doi:10.30748/soi.2018.155.12.
7. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. за ред. Б.І.Стадника. Т.2. Вимірювальна техніка. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. 656 с.
8. Dvait G. Tables of integrals and other mathematical data. Herbert Bristol Dwight Fourth Edition. .NEW YORK the Macmillan company, 1961. 234 p.
9. Горкунов Б.М., Борисенко Є.А., Шибан Тамер. Нормовані функції перетворення під час здійснення вихорострумowego контролю. Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіта, здоров'я" Ч.ІІ Харків: НТУ "ХПІ", 2018. С.15.
10. ISO/IEC 17025:2017 "Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій".
11. Горкунов Б.М., Тищенко А.А., Горкунова І.Б. Вихорострумний контроль фізико-механічних параметрів металевих виробів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2014: стан і перспективи, 23-24 квітня 2014р., м.Київ, ПБФ НТУУ "КПІ", 2014. С.182-183.

Надійшла (Received) 23.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.11.2024

Відомості про авторів / About the authors

Горкунов Борис – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", E-mail: borys.horkunov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8175-858X>

Gorkunov Boris – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" E-mail: borys.horkunov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8175-858X>

Львов Сергій – Кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", E-mail: , serhii.lvov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3830-0570>

Lvov Serhii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department Information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" E-mail: serhii.lvov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3830-0570>

Олійник Василь – аспірант кафедри Інформаційно- вимірювальних технологій і систем Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: oleynikwasya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3568>

Oliinyk Vasyly – PhD student, Department of Information and Measurement Technologies and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute," Email: oleynikwasya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3568>

Вевенко Віталій – Аспірант кафедри Інформаційно- вимірювальних технологій і систем Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", E-mail: Vitalii.Vevenko@cit.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9589-0287>

Vevenko Vitaliy – PhD student, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", E-mail: Vitalii.Vevenko@cit.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9589-0287>

Expansion of the functional capabilities of electromagnetic methods and devices for monitoring mechanical stresses in metal cylindrical products

Boris Gorkunov, Lvov Serhii, Vasyli Oliinyk, Vevenko Vitaliy

Abstract

This study addresses the theoretical foundations and the implementation algorithm of a differential transformer electromagnetic overlay transducer designed for monitoring variations in the electromagnetic parameters of a ferromagnetic shaft subjected to torque. An experimental setup was created, and the transducer's characteristics for amplitude, phase, and variable-frequency control methods were obtained. The obtained dependencies show that using the differential method, magnetic permeability and magnetizing current frequency serve as informative parameters, being the most sensitive to changes in mechanical loads on the cylindrical product. It has been established that such a system has high resolution and expanded functional capabilities.

Key words: torque, diagnostics, electromagnetic method, transformer electromagnetic converter, differential method, transformation functions.

ЯКІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ / QUALITY OF TECHNICAL SYSTEMS AND PROCESSES

УДК 629.7.067.8

doi: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.1.08>

METHOD OF DETECTING ABNORMAL CHANGES IN THE FUNCTIONING OF A TECHNICAL OBJECT USING SINGULAR VALUES DECOMPOSITION OF EXPERIMENTAL DATA MATRIX

O. Poliarus, O. Koval, A. Koval, Ya. Medvedovska
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,

Abstract

The behavior of the dynamic system is characterized by a large set of experimental data, which is well studied for normal conditions of its functioning. The character of this data changed in abnormal case of functioning or in system faults. There are many statistical methods, which allow to detect these changes. The identification of the considerable changes from measurement results almost no using statistical methods is the feature of the article. For this purpose, the experimental data matrix and the singular value decomposition (SVD) method are used to analyze the singular modes of this matrix. The change in singular values occurs as a result of a significant change in the nature of the data. To make a decision regarding the system transition into anomalous mode, the distance in Euclidean space between the set of singular values for normal conditions of system operation and the set of such values for possible anomalous conditions is estimated. If this distance will exceed the given threshold, then a decision is made to transfer the system to abnormal mode. Threshold determination can be carried out using statistical methods.

Key words: measuring information system, singular values decomposition, experimental data matrix, abnormal changing the parameters, distance between sets of singular values.

1. Introduction

Detection of anomalies in the functioning of technically complex objects (TCO) is reduced to identification of experimental results that deviate from standard or expected ones, which makes them incompatible with other data sets. The anomalies of behavior of random processes parameters in the form of amplitude jumps of various duration are dealt with in the article. Detecting jumps or outliers can be difficult because anomalies often do not occur, and the characteristics of normal behavior against which the anomaly parameters are compared can be described by complex dependencies. Automatic identification of sudden changes in the normal behavior of a data set is currently based on artificial intelligence and machine learning. Data anomalies can affect the reliability of decision-making about the state of a dynamic system, leading to false conclusions. Just one powerful outlier can significantly distort the mean of a data set, which is often considered a reference for comparison. In addition, anomalies in the behavior of data can influence the quality of algorithms of machine learning, because they can cause adjustment of model for noise, and not to basic template in the data. Detection and processing of anomalies in measurement data allows to improve their quality, increase the reliability of the decisions making, and also optimize the performance of machine learning.

2. The problem statement

Outliers of random processes parameters or jumps in their amplitude can be of short, medium or long duration. Short-term jumps of not very large amplitude practically do not change the spectrum of the input realization of random processes measured by a multi-channel measurement information system (MIS). If the MIS bandwidth is consistent with the spectrum of the process, then no significant changes in the output of the measuring system are observed, that is, a jump in the amplitude of the process is not registered. To measure such jumps, a system optimal according to the maximum posterior probability density criterion was synthesized in [1], which adjusts its bandwidth to the local time spectrum of the signal with an amplitude jump. At this time, there are no significant difficulties in measuring long-term outliers of the amplitude of a random process realization. The main problem here is to prove that the measured outlier is anomalous. Different approaches may be used for build a system of anomaly detection: the visualization through charts and graphs; the statistical tests, which compare statistical distributions of the received data with templates (tests by Grabs, Kolmogorov, etc.); the machine learning algorithms based on artificial neural networks etc. The methods based on mathematical statistics are used to automatically form a decision about the state of technical objects. The preparatory work for such methods needs to large time-consuming and should be repeated periodically.

An overview of statistical methods used in dynamic systems is given in [2]. Among them, deviations from the average can be distinguished: the parameters of each observation are compared with the average value of the data. The value that differs significantly from the average can be classified as abnormal [3]. In the estimation method [4], the number of standard deviations of each observation from the average is determined. The nearest neighbor method [5] compares the distance of each observation with its nearest points in the data space. If this distance is varies widely from reference, then the measurement can be classified as abnormal. The clustering method [6] groups data based on their similarity, and observations that do not belong to any of the clusters are defined as anomalous. The statistical methods are used widely in the machine learning algorithms. Therefore, in practical terms, to detect abnormal changes in measurement data, it is advisable to reduce the amount of work on statistical data preparation. For this purpose, a different principle of data analysis should be used.

3. Analysis of recent publications

The analysis of the results of the experiments without extensive use of statistical methods is based on singular values decomposition (SVD) of measured data matrix. The rows of this matrix are the numbers of measuring channels, and the columns of the matrix are numbers of time discrete. The theoretical basis of the method is described in [8]. This method was originally used on hydrodynamics [9], and then began to introduce in other industries [10]. In [11], it forms the basis of the face recognition algorithm. A new approach to speech signal enhancement based on SVD is described in [12]. Decomposition by singular values is also used in the analysis of spectroscopic data due to the qualitative separation of noise from the signal [13]. The possibility of applying SVD for diagnostic tasks is analyzed in [14]. In [15], a compromise between the algorithms of recursive eigendecomposition of the autocorrelation matrix and SVD of measurement data for tasks of adaptive spatio-temporal signal processing is discussed. An improved method of noise removal using SVD not only for periodic signals is described in [16]. It should be noted that in many cases the problem of noise reduction is best provided by the SVD method in signal processing [17, 18]. The matrix filter based on SVD has demonstrated a comparative improvement in the compression ratio, resolution, and signal-to-noise ratio in radars compared to the matched filter under the same conditions [19]. The SVD method is used in both signal and image processing [20]. It is promising to use this method in the diagnosis of technical and other objects [21]. One of the main advantages of SVD is a significant reduction in the dimensionality of the experimental data matrix [22], which simplifies signal processing and increases the performance of real-time systems. The number of scientific works that use SVD is constantly growing and covers different areas of human activity. The article analyzes the possibilities of using this method in the

field of diagnostics of technical systems, which is related to the detection of abnormal changes in the measured parameters of random processes.

The article is aimed at developing an effective method for detecting abnormal changes in signal parameters of a technical object using a multi-channel measuring information system without statistical parameter estimation.

The article is illustrative in nature and reveals the stages of using SVD to the experimental data obtained by the authors. Based on these results, the recommendations given by the MIS are formed.

4. The description of the experiment

The structure of the measuring complex is presented in Fig. 1. It contains four digital strain gauges (DSG) for measuring the deformation of the mechanical installation. The external appearance of the measuring channel is shown in Fig. 2. Calibration of the measuring complex was carried out by determining the calibration coefficient for each sensor separately. Amplitudes of mechanical deformations on four sensors in the experiment are shown in Fig. 3.

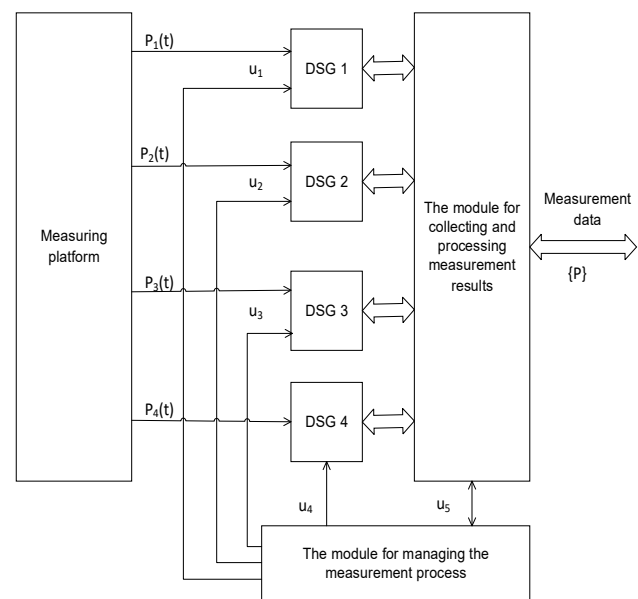


Fig. 1. The structure of the measuring complex

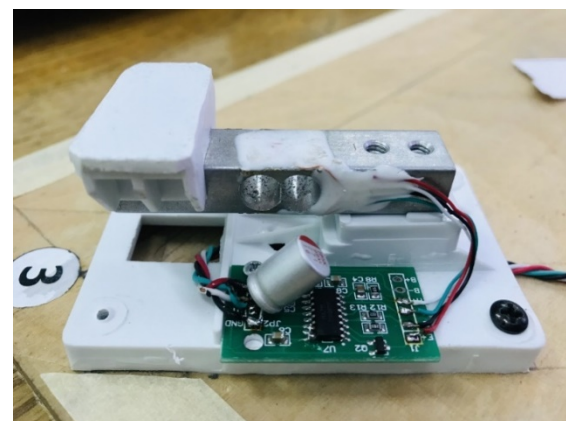


Fig. 2. Appearance of the measuring channel

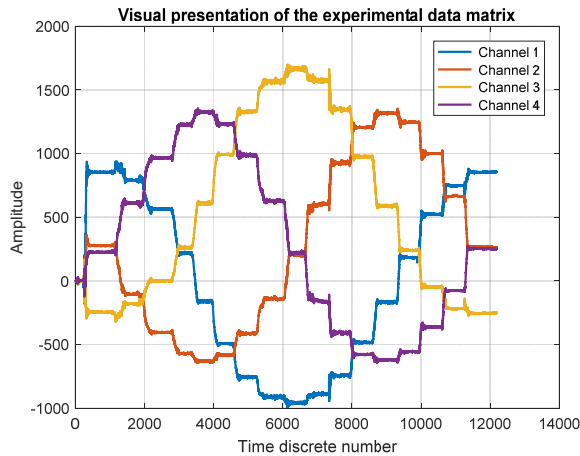


Fig. 3. The time distributions of deformations on four channels of measuring system for normal operating conditions

Fig. 3 is obtained for normal operating conditions of the technical object. The method of detecting anomalous changes in parameters is based on the comparison of the averaged dependence of the parameters of the random process in each measuring channel during regular system operation modes and the current dependence, which is directly measured at the selected time interval.

This interval for the specified object can be metrological normalized. The averaged dependence is recorded in the computer memory and periodically updated during the operation of the technical object. The periodicity of updating the average dependence is determined by the requirements of metrological support. The results of many experiments for the normal conditions of the functioning of the dynamic system are entered into the database, and further statistical processing of the data is carried out in order to determine the average dependence. This method cannot completely reject the statistical methods. The time distributions of deformations along the four channels of the measuring system (Fig. 3) are close to the averaged ones. The SVD method significantly reduces the scope of the application of statistical data processing at the stage of current measurement of physical quantities.

5. The result of SVD application for normal operation conditions of the object

The SVD method is used to non-symmetric matrices and is analog of square matrices diagonalization. The matrix of experimental data L can be expressed as

$$L = U\Sigma V^T, \quad (1)$$

where Σ is the matrix of singular values; the matrix U and V contain, respectively, left and right orthonormal singular vectors for which $U^T U = I$ and $V^T V = I$, when I - identity matrix. For this experiment data matrix L has dimensions 4×12193 , though, matrix dimensions U is 4×4 , and matrix V - 12193×12193 . The matrix dimensions Σ coincide with dimensions L . In the article,

for the purpose of the research, the main attention is paid to the matrix Σ , which contains singular values placed diagonally in descending order. Decomposition of singular values is carried out in the Matlab package using the svd operator. The results of the decomposition of the L matrix are shown in Figs. 4 and 5.

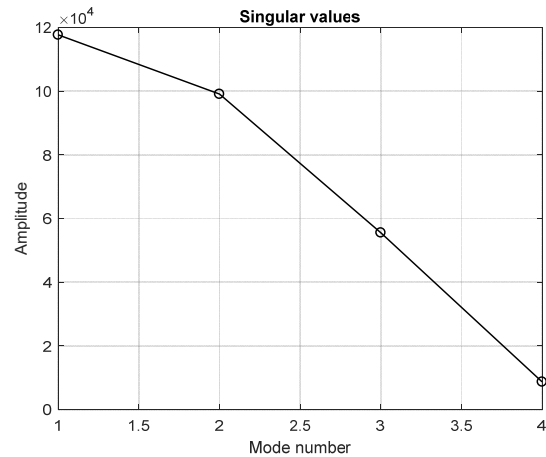


Fig. 4. Dependence of the singular values of the matrix on the mode number for normal conditions

Singular values of matrix Σ for four modes are shown in Fig. 4. The nature of the graph is descending for all experiments. The distribution of modes according to their relative energy characteristics is shown in Fig. 5. There are actually four modes, but in practice it may be reasonable to use three, since the fourth mode has much lower energy. This, however, depends on the tasks that the researcher solves and the dynamic characteristics of the technical object.

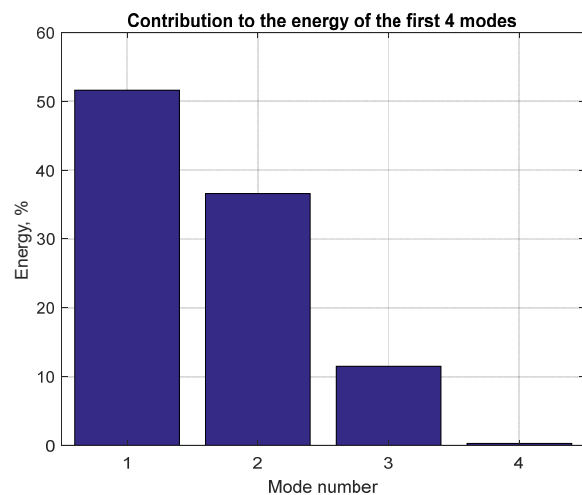


Fig. 5. The relative energy characteristics of modes for normal conditions

Matrix L describes the average distribution of parameter values measured by sensors. It is logical to assume that under abnormal conditions, for example, in case of a faulty sensor or malfunctions in the technical object operation, the nature of the singular values distribution will change.

6. The result of SVD application for abnormal conditions of considered object

Let us consider the results of SVD application for anomalous conditions, which will be formed by changing the L matrix. For example, in the range of column numbers from 6000 to 8000 for the first row (first sensor), we replace the measured values on their modules. As a result, the L matrix is changed to the B matrix. The time distributions of measured data for four channels of the system are presented in Fig. 6. In contrast to Fig. 3, here the distribution of data in the first channel has changed in the range of time samples from 6000 to 8000.

For anomalous operating conditions, the nature of the singular values distribution and their energy characteristics has changed significantly (Figs. 7, 8). First of all, the relative contribution to the total energy of the first mode decreased, and all other modes increased. Even the fourth mode cannot be neglected.

Comparison of Figs. 5 and 8 shows that the energy characteristics of the first mode under abnormal conditions significantly decreased, and they became almost the same for the first and second modes, and

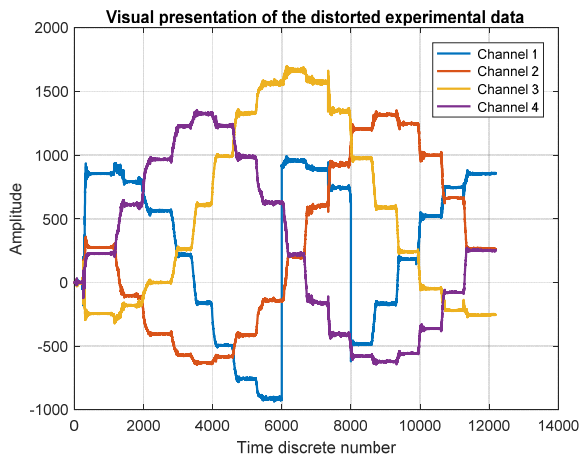


Fig. 6. The time distributions of deformations on four channels of measuring system for abnormal operating conditions

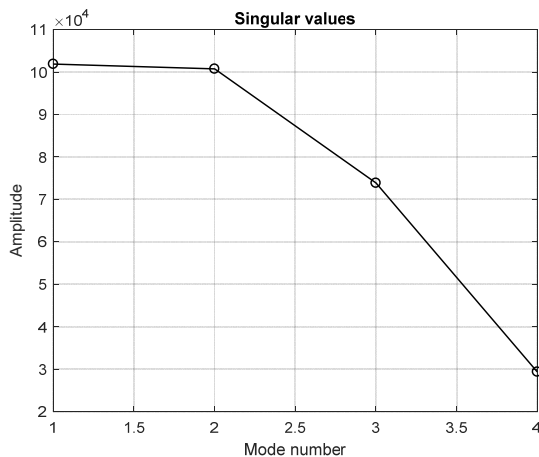


Fig. 7. Dependence of the singular values of the matrix on the mode number for abnormal conditions

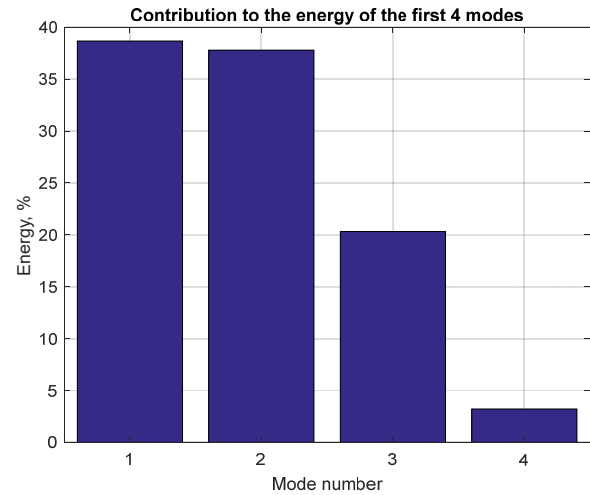


Fig. 8. The relative energy characteristics of modes for abnormal conditions

increased for the third mode. A significant increase in the energy characteristics of the fourth mode can be considered the main feature. Therefore, this example shows that abnormal operating conditions of a technical object change the magnitude and distribution of singular values of the matrix of experimental data, which creates an opportunity to detect these conditions.

7. The criteria of normal and abnormal operating conditions comparison for the object

So, for normal and abnormal conditions there are two sets consisting of four modes ($K = 4$) or singular values of matrix Σ . The number K is not known in advance, but it is known for the matrix of reference averaged dependences of the parameter in the channels for normal conditions. The singular values for these conditions let denote as σ_{L_k} , and for abnormal conditions - σ_{B_k} . Then, the distance d (metric) in Euclidean space between these sets is determined by the known ratio:

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^K (\sigma_{L_k} - \sigma_{B_k})^2}. \quad (2)$$

This formula provides a single number, that is, the distance between two sets. To assess the behavior of the distance d for different anomalous situations, we will create four model cases. In all cases, the measurement data changes only in the first channel, and in the range of time samples from 6000 to 8000. In the first case, the modular values of the amplitudes for this range are multiplied by 0.5, in the second - by 1, in the third - by 1.5, and in the fourth - by 2. Then the obtained 4 values of the distance between sets of singular values are illustrated in Fig. 9.

The reduction of the distance for the second case is due to the equality of the singular modular values with the reference set of experimental data in the first

channel. This special case does not happen often. In

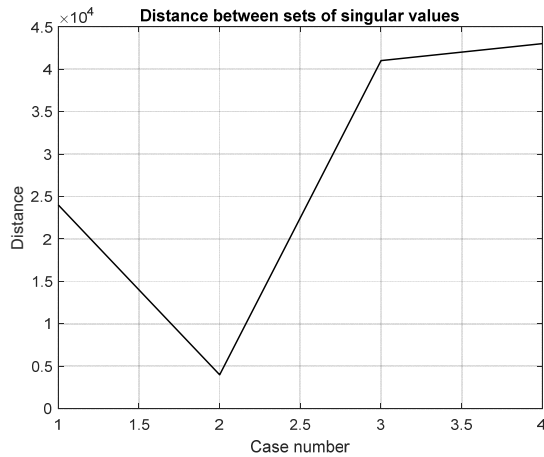


Fig 9. Distance between sets of singular values for four model cases

general, for physical reasons, a regularity should be observed: the greater the deviations in experimental data, the greater the distance between singular values. If, instead of the distance d , the cosine of the angle θ between the matrices L and B , is used, then a similar relationship can be obtained:

$$\cos \theta = \frac{\langle L, B \rangle}{\|L\| \cdot \|B\|} \quad (3)$$

when $\langle L, B \rangle$ is the scalar product of matrices L and B , which is determined by the formula: $\langle L, B \rangle = Sp(L^T B)$. Here Sp means the trace of the product of the matrices in parentheses, that is, the sum of the values of the elements of the main diagonal. Norms of matrices L and B are determined by similar formulas: $\|L\| = \sqrt{\langle L, L \rangle}$, $\|B\| = \sqrt{\langle B, B \rangle}$. The values of the cosine of the angle between the matrices describing the experimental data for normal and abnormal conditions are shown in Fig. 10. If the angle $\theta=0^\circ$, and $\cos \theta=1$, then the matrices coincide and, on the contrary, at $\theta=90^\circ$ and $\cos \theta=0$ the matrices completely lose their similarity.

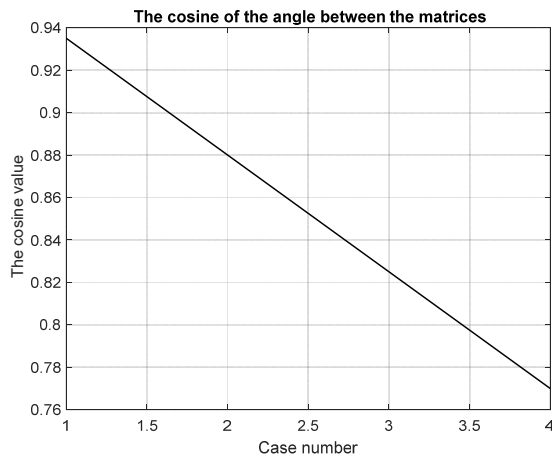


Fig. 10. The value of the cosine of the angle between the matrices describing the experimental data for four model cases

Fig. 10 shows that for selected cases, with an increase in the amplitude of the data in the first channel in the previously specified time interval, the cosine of the angle between the matrices decreases almost linearly. There are no violations of the monotonicity of the graph here, as can be seen in Fig. 9. This is an advantage of the approach compared to determining the distance between sets of singular values. However, in Fig. 10, in the range of considered cases, the value of the cosine of the angle changes by approximately 20%, while in Fig. 9, it changes several times. In addition, matrices of a large dimension were used to obtain Fig. 10, and matrices of a smaller dimension, which was commensurate with the rank of large dimension matrix, were used for Fig. 9. Therefore, for practical needs, the method of determining the distance between sets of singular values of the matrix of averaged experimental data for normal conditions and the same set of the matrix of current data is more suitable. A combination of these approaches is also possible. Since the singular values for the modes are related to the variances of the measured values, the first modes contain the most information that is important for practice.

8. The main stages of the method of detecting abnormal operating conditions of a technical object

Therefore, the method of classifying the experimental values of the multi-channel measuring information system as abnormal includes the following stages:

- 1) formation of a database for experimental values obtained under normal operating conditions and determination of averaged distributions across all channels, as well as other statistical characteristics, if they are required;
- 2) obtaining similar data for abnormal conditions based on modeling, and if possible, experimentally;
- 3) determination of the criterion for identifying abnormal conditions and justification of the threshold, which indicates the transition of the measurement information system to such conditions;
- 4) obtaining a set of singular values for the matrix of averaged experimental data and the matrix of current data obtained by the measurement information system; the specified matrices must have the same size;
- 5) estimating the distance between two sets of singular values; if this distance exceeds the previously determined threshold, then a decision is made to classify the received data as abnormal.

9. Conclusions

The article proposes a method of detecting abnormal operating conditions of a technical object based on the use of data from a multi-channel measurement information system. The results of the

authors' experimental research were used to illustrate the method. The method of estimating the singular values of the data matrix can be used without restrictions for the results of other measurements. It is advisable to use the method for technical objects in which the time dependences of the parameters in the measuring channels have stable statistical characteristics over a period of time, that is, the object performs the same work. The proposed method is also suitable for recognizing the operating conditions of the object. A significant advantage of the SVD method is the ability

to process large data sets, as they can be described by several modes. The left and right singular vectors of the data matrix characterizing the spatial and temporal modes are not considered in the article, but they can also be useful in the processing of measurement information. Determining the distance threshold between two sets of singular values requires separate studies for each technical object. The effectiveness of recognizing abnormal operating conditions of a technical object can be increased with the complex application of other known methods.

References

1. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lindner L. Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters. The 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington D. C., USA, October 21-23, 2018. Pp 3165-3170. DOI:10.1109/IECON.2018.8591362
2. Uri Lerner, Ronald Parr, Daphne Koller, Gautam Biswas. Bayesian Fault Detection and Diagnosis in Dynamic Systems. Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-00). Austin, Texas, August, 2000. Pp 531-537.
3. Wojbor A. Woyczyński. A First Course in Statistics for Signal Analysis. Birkhäuser, Boston, 2006. 207 p.
4. Jeremy Boettinger. Math and Statistics Guides from UB's Math & Statistics Center. University of Baltimore, 2019. 226 p.
5. Robert Nisbet, Gary Miner, Ken Yale. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications. Second Edition. Elsevier, Academic Press, 2018. 795 p.
6. Marcos Quiñones-Grueiro, Alberto Prieto-Moreno, Cristina Verde, Orestes Llanes-Santiago. Data-driven monitoring of multimode continuous processes: A review. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 15 June 2019. Volume, 189. Pp. 56-71.
7. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman. The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction.. Springer, 2001. 533 p.
8. Weiss, S., Proudler, I. K., Barbarino, G., Pestana, J., & McWhirter, J. G. Properties and structure of the analytic singular value decomposition. IEEE Transactions on Signal Processing, 2024. Pp. 1-15.
9. Rowley, C.W., Mezić, I., Bagheri, S., Schlatter, S., Henningson, D.S. Spectral analysis of nonlinear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009. Pp. 115–127.
10. Ahmed F. Mabied, Shunsuke Nozawa, Manabu Hoshino, Ayana Tomita, Tokushi Satob and Shin-ichi Adachi. Application of singular value decomposition analysis to time-dependent powder diffraction data of an in-situ photodimerization reaction. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014. Vol. 21. Pp. 554–560.
11. Yuanyuan Ma, Dengyin Zhang. A New Face Recognition Method Based On SVD. - Advances in Computer Science Research. Vol. 62. 2nd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2017). Pp. 291–294.
12. Amin Zehtabian, Hamid Hassanpour, Shahrokh Zehtabian, Vicente Zarzoso. A Novel Speech Enhancement Approach Based on Singular Value Decomposition and Genetic Algorithm. Proc. SoCPar-2010, 2nd Int. Conf. on Soft Computing and Pattern Recognition, Cergy Pontoise, France, Dec. 7-10, 2010. Pp. 430–435.
13. Marius Schmidt, Sudarshan Rajagopal, Zhong Ren, and Keith Moffat. Application of Singular Value Decomposition to the Analysis of Time-Resolved Macromolecular X-Ray Data. *Biophysical Journal*, Volume 84, March 2002. Pp. 2112–2129.
14. Czeslaw Cempel. Double Singular Value Decomposition of Symptooobservation Matrix in Machine Condition Monitoring. *Diagnostyka*, 2010. Vol. 1(53). Pp. 3–12.
15. Manuel Duarte Ortigueira and Miguel-Angel Lagunas. Eigendecomposition vs Singular Value Decomposition in Adaptive Array Signal Processing. - Signal Processing. Vol. 25. Issue 1, October 1999. Pp. 35-49.
16. Xiaoming Zhang, Jian Tang, Meijun Zhang, Qunce Ji. Noise subspaces subtraction in SVD based on the difference of variance values. - JVE International Ltd. *Journal of Vibroengineering*. 2016. Vol. 18. Issue 7. Pp. 4852–4861.
17. Thomas Schanze. Removing noise in biomedical signal recordings by singular value decomposition. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2017. Vol. 3(2). Pp. 253–256.
18. Xianbo Yin, Yang Xu, Xiaowei Sheng and Yan Shen. Signal Denoising Method Using AIC–SVD and Its Application to Micro-Vibration in Reaction Wheels. *Sensors*, 2019. Vol. 19. 5032. Pp. 1–18.
19. Asenso Kwarteng, Yaw Marfo Missah. Radar Signals Compression using Singular Value Decomposition (SVD) Approach. *International Journal of Computer Applications*, 2016. Vol. 150. No.12. Pp. 14–19.
20. Rowayda A. Sadek. SVD Based Image Processing Applications: State of The Art, Contributions and Research Challenges. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. Vol. 3. No. 7. 2012. Pp. 26–34.
21. Zijian Qiao and Zhengrong Pan. SVD principle analysis and fault diagnosis for bearings based on the correlation coefficient. *Measurement Science and Technology*, 2015. No 26. Pp. 1–15.
22. Hussam D. Abdulla, Abdella S. Abdelrahman, Vaclav Snasel. Using Singular Value Decomposition (SVD) as a Solution for Search Result Clustering. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 2014. No. 80. Pp. 71–78.

Надійшла (Received) 15.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 27.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Полярус Олександр – доктор технічних наук, професор кафедри метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: poliarus.kharkov@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8023-5189>

Poliarus Oleksandr – Doctor of Eng. Science, Professor, Department of metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: poliarus.kharkov@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8023-5189>

Коваль Олександр, кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: koval_al@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>;

Koval Oleksandr, PhD, Associate Professor, Department of metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: koval_al@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>.

Коваль Андрій, кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: koval_andrey79@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>;

Koval Andrii, PhD, Associate Professor, Department of metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: koval_andrey79@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>

Медведовська Яна, кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: yana.brovko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9212-6166>

Medvedovska Yana, PhD, Associate Professor, Department of metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: yana.brovko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9212-6166>

**Метод виявлення аномальних змін у функціонуванні технічного об'єкту з використанням декомпозиції
сингулярних значень матриці експериментальних даних**
О.В. Полярус, О.А. Коваль, А.О. Коваль, Я.С. Медведовська

Анотація

Поведінка динамічної системи характеризується великим набором експериментальних даних, який для нормальних умов її функціонування є добре вивченим. При несправності системи або аномальних умовах функціонування характер цих даних змінюється. Існує багато статистичних методів, які дозволяють виявити ці зміни. Особливістю статті є виявлення істотних змін в результатах вимірювання майже без використання статистичних методів. Для цього використовується матриця експериментальних даних і з допомогою методу декомпозиції сингулярних значень здійснюється аналіз сингулярних мод цієї матриці. При істотній зміні характеру даних відбувається змінювання сингулярних значень. Для прийняття рішення щодо переходу системи в аномальний режим оцінюється відстань у евклідовому просторі між множиною сингулярних значень для нормальних умов функціонування системи і множиною таких значень для можливих аномальних умов. Якщо ця відстань буде перевищувати наперед встановлений поріг, то приймається рішення щодо переходу системи в аномальний режим. Визначення порогу може здійснюватися статистичними методами.

Ключові слова: вимірювальна інформаційна система, декомпозиція сингулярних значень, матриця експериментальних даних, аномальні змінювання параметрів, відстань між множинами сингулярних значень

КВАЛІМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ВИПРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ

Р.М. Тріш¹, М.Ю. Яковлев², В.М. Бурдейна¹, Е.А. Хом'як¹, І.І. Гуртовий¹, А.О. Євтушенко¹

¹Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», кафедра мехатроніки та електротехніки Харків, Україна, trich_@ukr.net

²Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, myug2015@gmail.com

Анотація

Важливою складовою впровадження системи управління якістю на підприємстві являється процедура оцінювання ризиків. На сьогодні не існує універсального методу оцінювання ризиків, тому кожне підприємство самостійно розробляє відповідні методики та приймає управлінські рішення щодо ризиків, у залежності від особливості продукції чи послуг, обсягу наявної інформації та компетентності персоналу. Одним із найвагоміших ризиків виступає ризик випуску продукції недостатньої якості, оскільки він безпосередньо впливає на конкурентоспроможність компанії. У статті проаналізовано наукові дослідження, присвячені оцінюванню якості виробництва продукції, виявлено їх недоліки та обмеження у застосуванні. У статті запропоновано застосовувати функціональні залежності для визначення оцінок показників якості на безрозмірній шкалі. Пропонується побудувати функцію щільності імовірностей випадкових величин оцінок показників якості. Знаючи функцію щільності оцінок показників якості, пропонується розрахувати ймовірності ризиків потрапляння оцінок показника якості в заданий інтервал оцінювання. Запропоновано покрокову методику оцінки ризиків виготовлення продукції неналежної якості.

Ключові слова: кваліметрія; оцінювання ризиків; ризик низької якості; узагальнений показник; багатокритеріальне оцінювання якості; безрозмірна шкала.

1. Вступ

Оцінювання ризиків являється одним із ключових принципів розроблення та впровадження міжнародного стандарту [1] в організаціях та підприємствах будь якого профілю не залежно від виду промисловості, до якої вони мають відношення. Цей принцип передбачає, що підприємства та організації повинні розробляти методики для аналізу, прогнозування та управління ризиками. Міжнародний стандарт [1] включає вимоги щодо оцінювання ризиків та можливостей. При цьому вимагає, щоби процес оцінювання був регулярним, результати якого дадуть можливість отримувати інформацію для своєчасного реагування на можливі загрози щодо якості продукції чи послуг та дозволить зменшити імовірність настання несприятливих ситуацій.

Ризики можуть стосуватися не лише основних процесів, які забезпечують випуск продукції чи послуг, але також супутніх та допоміжних процесів, серед яких можуть бути процеси, пов'язані з фінансовим сектором чи забезпеченням кадрами або матеріалами, процесами логістики та енергозабезпечення. Ефективність управління будь якими процесами залежить від ефективності процесу оцінювання ризиками на усіх етапах виробництва продукції чи надання послуг.

На сьогодні не існує універсального методу оцінювання ризиків, тому кожне підприємство самостійно розробляє відповідні методики та приймає управлінські рішення щодо ризиків, у залежності від особливості продукції чи послуг, обсягу наявної інформації та компетентності персоналу. Кожне підприємство самостійно обирає методи аналізування,

зважаючи на доцільність та складність продукції чи послуги, методи контролю та моніторингу, можливість простежуваності, повторюваності та контрольованості процесів. Оптимальним виходом із такої ситуації може бути розробка типової методики оцінювання ризиків для класифікації різних процесів. Особливу увагу представляють процеси виробничого циклу продукції.

Метою статті являється розроблення універсальної методики оцінювання ризиків виробництва продукції низької якості. Тобто продукції, показники якості якої знаходяться на краях поля допуску, установленого нормативними та конструкторськими документами. Така методика має бути придатною для використання на різних підприємствах незалежно від типу продукції, що дозволить підвищити її універсальність та ефективність у різних галузях виробництва.

2. Матеріали та методи

Традиційно оцінювання ризиків виконують різними методами, які базуються на поєднанні спостережень, аналізі тенденцій та інших даних. Часто застосовуються не складні методи управління ризиками, серед яких блок-схеми та контрольні карти, а також аналіз дерева помилок (FTA), методи аналізу наслідків та критичності відмов (FMEA, FMECA), системи контролю експлуатаційної безпеки, наприклад НАССР, та методи, спрямовані на оцінку працездатності (HAZOP, PHA). Окрім цього, застосовують також ранжування, фільтрацію ризиків і статистичні методи та ін.

Наразі методи оцінювання ризиків можна розділити на дві групи, якісні та кількісні. Під якісними методами розуміють отримання оцінок

ризиків, застосовуючи експертів або опитування. Кількісні методи застосовують статистичні підходи для оцінювання ризику в однорідних групах продукції або в певній популяції та розрахункові (індивідуальні) методи для оцінювання ризику конкретної продукції.

Концептуальні підходи до управління ризиками розглядалися багатьма науковцями. Зокрема, О. Білявська відзначає, що через зміну суспільних пріоритетів управлінські структури постійно адаптуються, що зменшує ефективність існуючих методів [2].

Результати досліджень міжнародного досвіду оцінювання ризиками показують, що найбільша увага таким процесам приділяється у державному секторі, де існують аналітичні центри та відповідного рівня фахівці, але у приватному секторі такі можливості обмежені. Тому науковці з різних країн активно працюють над розробленням ефективних методів оцінювання ризиків [3].

Результатом цих досліджень, зокрема в Японії, Новій Зеландії, Австралії та інших країнах світу, стало розроблення міжнародних стандартів ISO 73:2009 «Менеджмент ризику. Словник» та ISO 31000:2009 «Менеджмент ризику. Принципи та керівні вказівки». Ці стандарти є дієвими інструментами, які використовуються підприємствами та організаціями для розроблення своїх методик оцінювання ризиками з метою їх ефективного застосування при розробленні системи управління якістю підприємством [4].

А. Грушевицька та Т. Головач пропонують теоретичне бачення процесу оцінювання ризиками та пропонують практичні рекомендації щодо ризик-менеджменту та реалізації його на підприємствах [5].

Аналізуючи міжнародний стандарт управління ризиками ISO 31000:2009, Н. Стрельбицька вивчає взаємозв'язок між системою і процесом управління ризиками та існуючими принципами. Також досліджує правильність відповідної термінології [6]. У своїх наукових працях О. Непомнящий вивчає та аналізує основні підходи та принципи побудови системи оцінювання та управління ризиками. Він вважає, що ефективність впровадження такої системи пов'язана з кваліфікацією персоналу та наявністю спеціальних аналітичних груп, які займаються моніторингом та збиранням інформації, необхідної для прийняття управлінських рішень [7].

Існує багато підходів до визначення ризику, запропонованих як вітчизняними, так і зарубіжними авторами. Деякі з них розглядають ризик як потенційну можливість втрат, що може бути чисельно виміряною, і пов'язують його з невизначеністю та ймовірністю несприятливих подій під час реалізації проекту. Інші визначають ризик як імовірність виникнення фінансових втрат, недоотримання доходів або прибутків. Наприклад, J.P. Morgan розглядає ризик через призму невпевності у можливості отримання прибутків.

Також існує ще одне визначення ризику, акцентує увагу на можливості зменшення ресурсів

(фінансових, матеріальних) через непередбачувані зміни умов, що можуть відрізнятися від запланованих. Окрім того, відповідно до міжнародного стандарту, ризик можна визначити як вплив невизначеності на досягнення мети.

У діяльності підприємства ризики відіграють важливу роль, і хоча фахівці усвідомлюють необхідність їх управління, на практиці виникає багато дискусійних питань. Це пов'язано з відсутністю цілісної теорії ризик-менеджменту та неоднозначним підходом до застосування різних методологій оцінювання ризиків.

З метою ефективного оцінювання ризиків був розроблений міжнародний стандарт [11], що містить рекомендації з управління ризиками, з якими організації стикаються на різних етапах виготовлення продукції та надання послуг. Цей стандарт регламентує універсальний підхід до процесу управління ризиками, який можливо адаптувати під потреби будь-якої організації та не є спеціалізованим чи галузевим, дозволяючи використовувати його на всіх етапах діяльності організації, включно з прийняттям рішень на всіх рівнях.

З метою розширення цього стандарту було розроблено стандарт [12], що надає рекомендації з вибору існуючих методик щодо оцінки ризиків. Він носить рекомендаційний характер і може використовуватися як керівництво для різних типів систем управління, а організації, що створюють системи управління якістю відповідно до [1], мають створювати свої процедури з оцінювання та управління ризиками.

Також, існують кваліметричні методи оцінювання ризиків, які пропонують математичні моделі для отримання оцінок на безрозмірній шкалі. Наприклад, у роботах [13-15] використовувалася подвійна експонентна залежність для обчислення оцінок різнорозмірних показників якості. Інші автори [16-19] застосовували залежності з порядковими статистиками для тієї ж мети.

Деякі дослідники застосовують метод SAW (просте адитивне зважування), який базується на використанні вагових коефіцієнтів для оцінки окремих показників якості [20, 21]. Інший популярний метод - TOPSIS, який забезпечує багатокритеріальне оцінювання за допомогою еталонного значення якості і часто використовується для комплексної оцінки показників [22-25]. У соціальних дослідженнях для оцінювання процесів використовуються методи PROMETHEE, MOORA і WASPAS, які надають можливість багатокритеріального аналізу та рейтингового оцінювання [26-27].

Отже, аналіз досліджень показує, що кваліметричні методи широко застосовуються для оцінки якості об'єктів різного характеру та у різних наукових і практичних сферах, що дозволяє запропонувати їх для розробки методики оцінювання ризиків випуску продукції низької якості.

3. Методика оцінювання імовірності випуску продукції низької якості

Для розроблення універсальної методики оцінювання ризиків виробництва продукції низької якості необхідно вирішити ряд науково-прикладних завдань. Оскільки продукція характеризується не одним, а кількома показниками якості, які можуть мати різні шкали та діапазони вимірювання, важливо визначити функцію залежності між вимірними показниками якості та їх оцінками на безрозмірній шкалі. Це означає, що потрібно встановити функціонально залежні статистики.

Крім того, слід визначити закон розподілу функціонально залежних статистик, розглядаючи їх як випадкові величини. Для цього важливо знати функцію щільності функціонально залежних величин на безрозмірній шкалі. Знаючи закон розподілу цих випадкових величин, можна буде визначити ймовірності того, що випадкова величина потрапить у заданий інтервал оцінювання.

Для вирішення цих задач буде використано математичний апарат кваліметрії, яка є наукою про кількісне оцінювання якості. У кваліметрії важливу роль відіграє вид залежності між вимірюваними показниками якості та їх оцінкою на безрозмірній шкалі, оскільки показники якості не завжди розподілені рівномірно і можуть мати нелінійну залежність від своїх оцінок. При управлінні якістю об'єктів часто використовуються статистичні методи, і для них важливо знати не закон розподілу показника якості в його одиницях вимірювання, а закон розподілу оцінок на безрозмірній шкалі. Тому в рамках цієї статті будуть досліджуватися закономірності розподілу оцінок одиничних безрозмірних показників якості.

Відомо, що технологічний процес є складною системою, стан якої потребує оцінювання, аналізування та прогнозування і, за потреби, коригування для забезпечення якості продукції. У цій роботі під об'єктом кваліметрії розуміється результат технологічного процесу — отримання виробу заданої якості.

Вплив випадкових факторів на показники якості кожного виробу призводить до змінюваності результатів. У таких умовах для управління якістю використовуються методи математичної статистики, зокрема для проведення статистичного аналізу. Метою статистичного аналізу є дослідження властивостей випадкової величини. Ефективність застосування математичної статистики для оцінювання якості залежить від обсягу статистичної інформації, що базується на знанні закону розподілу показників якості як випадкової величини та наявності достатньої кількості вибірових значень.

Якщо розсіювання чисельних значень одиничного показника якості об'єкту кваліметрії X підпорядкована закону нормального розподілу та має зв'язок з випадковою величиною Y у виді залежності $Y = F(x)$:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_{i\min} \\ \left[\frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \right]^k, & x_{i\min} < x_i < x_{i\max} \\ 1 & x_i \geq x_{i\max} \end{cases}, \quad (1)$$

де x_i — дійсне чисельне значення одиничного показника якості; $x_{i\min}$ та $x_{i\max}$ — відповідно допустимі значення показника якості; k — параметр форми.

Знаючи закон розподілу випадкової величини розсіювання одиничного показника якості та подівавши на функцію щільності даного закону функціональною залежністю (1), можемо отримати функцію щільності ймовірностей безрозмірної випадкової величини Y .

Рівняння визначення функції щільності ймовірності $q(y)$ випадкової величини Y має вид:

$$q(y) = f(\psi(y)) \left| \psi'(y) \right|,$$

де $f(x)$ — щільність ймовірностей випадкової величини X ; $\psi(y)$ — зворотна функція до $y = F(x)$.

Знайдемо функцію, обернену до:

$$y = \left[\frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \right]^k, \quad x_{i\min} < x_i < x_{i\max}$$

Алгебраїчні перетворень дозволяють отримати:

$$x = \psi(y) = y^{\frac{1}{k}} (x_{i\max} - x_{i\min}) + x_{i\min},$$

Похідна функції $x = \psi(y)$:

$$x' y = (\psi(y))' = \frac{1}{k} y^{\frac{1}{k}-1} (x_{i\max} - x_{i\min}),$$

$$x' y = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{k} \left(\frac{1}{y^{\frac{1}{k}-1}} \right),$$

Отже, якщо функція щільності ймовірності випадкової величини X має вид:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2)$$

то функція щільності ймовірностей $q(y)$ випадкової величини Y матиме такий вигляд:

$$q(y) = \left| \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{k y^{\frac{1}{k}-1}} \right| \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\frac{\left[y^{\frac{1}{k}}(x_{i\max} - x_{i\min}) + x_{i\min} - m_x \right]^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (3)$$

де m_x — математичне сподівання, а σ_x — середнє квадратичне відхилення значень одиничних показників якості.

У результаті проведених досліджень, можна запропонувати методику оцінювання ризиків випуску продукції низької якості, яка складається з кількох ключових етапів. Першим кроком є визначення показників якості продукції, які необхідно оцінити для отримання об'єктивної інформації про її властивості. Наступним етапом є встановлення допустимих меж для цих показників, які можуть бути визначені на основі відповідних нормативних документів. Це забезпечить основу для подальшого аналізу ризиків, пов'язаних із випуском продукції, яка не відповідає встановленим стандартам.

Визначити $x_{i\min}$ та $x_{i\max}$ мінімально та максимально-допустимі значення показників якості;

Отримати значення дійсного показника якості виробу x_i ;

Для оцінювання безрозмірного показника якості Y використовуємо формулу (1). Вона дозволяє перевести значення, отримані у вимірювальних одиницях, у безрозмірний формат, що спрощує подальший аналіз. Знаючи функцію щільності закону розподілу випадкової величини X , знаходимо функцію щільності випадкової величини Y на безрозмірній шкалі. У тому випадку, коли функція щільності відповідає нормальному закону розподілу (2), то функція щільності ймовірностей $q(y)$ випадкової величини Y матиме вид, зазначений у формулі (3).

Визначивши функцію щільності для безрозмірного показника якості, ми можемо обчислити ймовірності того, що випадкова величина потрапить у заданий інтервал на безрозмірній шкалі, використовуючи формулу (4). Це дає змогу оцінити ризики, пов'язані з випуском продукції, що не відповідає встановленим критеріям якості.

Для апробації запропонованої методики доцільно використовувати моделювання процесу розсіювання показників якості продукції, що представляють собою випадкові величини. Для цього можна застосувати метод Монте-Карло, що дозволяє отримати статистично значущі результати. Наприклад, було отримано 500 значень випадкових величин, які відповідають нормальному закону розподілу з функцією щільності (2) та заданими параметрами. Це дасть змогу більш точно аналізувати ризики і робити прогнози щодо якості продукції: $m_x=2,5$; $\sigma_x=0,8$.

4. Результат

З використанням методики оцінювання ризиків випуску продукції низької якості були отримані наступні результати, які наведені нижче. Представимо графічний вид функції щільності ймовірностей $q(y)$, при цьому параметри мають такі значення: $m_x=2,5$; $\sigma_x=0,8$, а параметр форми k змінюється.

Знання функції щільності ймовірностей випадкових величин дає можливість вирішення практичних задач з оцінювання ризиків, наприклад визначення ймовірності попадання значень випадкових величин Y в будь який проміжок. (c ; d):

$$P(c < y < d) = \int_c^d q(y) dy = F(d) - F(c),$$

де $q(y)$ - функція розподілу випадкової величини Y .

У якості прикладу можна привести деяку практичну задачу, а саме знаходження ймовірності потрапляння випадкової величини Y в заданий проміжок (c ; d). Для цього необхідно обчислити інтеграл:

$$P(c < y < d) = \int_c^d q(y) dy. \quad (4)$$

Внаслідок розрахунків отримали результати, представлені в таблиці 1.

З таблиці видно, що, знаючи параметр форми k , можна визначити ймовірності попадання

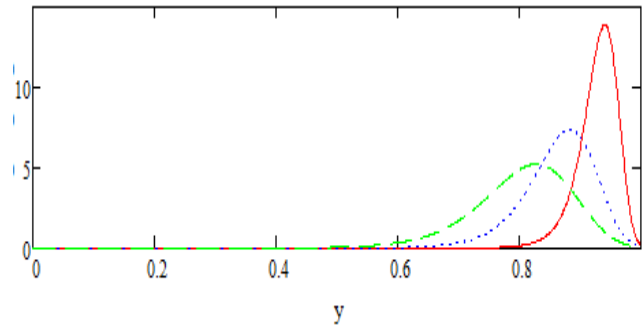


Рис. 1. Графічний вид функції щільності випадкової величини Y з параметрами: $k = 0,1; 0,2; 0,3$

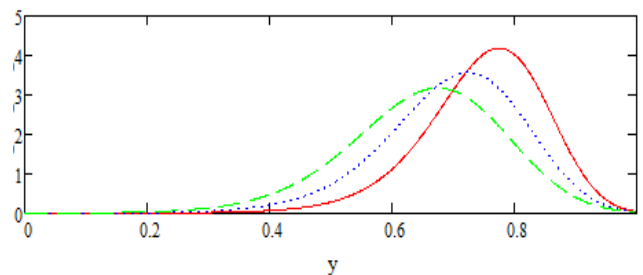


Рис. 2. Графічний вид функції щільності випадкової величини Y з параметрами $k = 0,4; 0,5; 0,6$

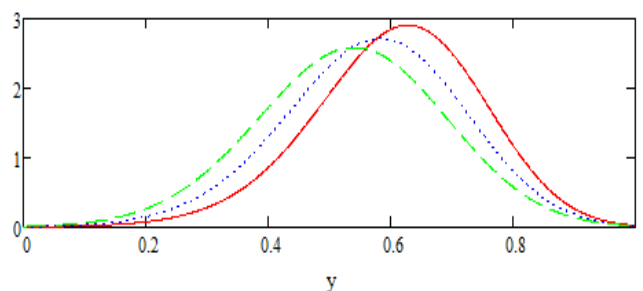


Рис. 3. Графічний вид функції щільності випадкової величини Y з параметрами: $k = 0,7; 0,8; 0,9$

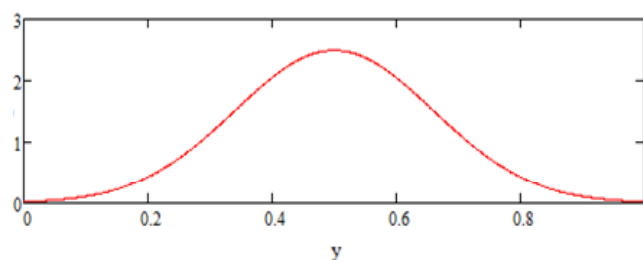


Рис. 4. Графічний вид функції щільності випадкової величини Y з параметрами: $k = 1$

безрозмірного значення оцінки показника якості в будь-який інтервал на безрозмірній шкалі. Наприклад, користуючись таблицею (1), ми можемо знайти ймовірність того, що оцінка показника якості продукції буде меншою за 0,8 при $k=0,3$. Отже, $P(0 < y < 0,8) = 0,44$. Таким чином, можна розрахувати ймовірності попадання безрозмірної оцінки показника якості в будь-який заданий інтервал на безрозмірній шкалі.

Таблиця 2 – Імовірність влучення значення випадкової величини Y в проміжок $(c; d)$ за умови, що k змінюється від 0,1 до 1 з кроком 0,1

Проміжок $c - d$											
k	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1	0-1
Імовірність $P(c < y < d)$											
0,1	$1,9 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	0,165	0,827	1
0,2	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,015	0,122	0,573	0,285	1
0,3	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	0,017	0,087	0,328	0,46	0,1	1
0,4	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0,015	0,062	0,203	0,388	0,279	0,046	1
0,5	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,012	0,042	0,132	0,284	0,334	0,164	0,025	1
0,6	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	0,027	0,085	0,2	0,303	0,255	0,101	0,016	1
0,7	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,053	0,136	0,244	0,28	0,186	0,066	0,011	1
0,8	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,087	0,182	0,26	0,24	0,136	0,045	$8,4 \cdot 10^{-3}$	1
0,9	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,015	0,05	0,124	0,215	0,254	0,198	0,1	0,032	$6,6 \cdot 10^{-3}$	1
1	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,075	0,16	0,234	0,234	0,16	0,075	0,024	$5,3 \cdot 10^{-3}$	1

5. Висновки

Результатом цієї статті є методика оцінки ймовірності випуску продукції низької якості. Для розробки методики було виконано кілька етапів:

1. Обґрунтування функції залежності між вимірними показниками якості та їх оцінками на безрозмірній шкалі, що дозволило отримати функціонально залежні статистичні дані.

2. Визначення функцій щільності (див. рисунки 1–4) для функціонально залежних випадкових величин оцінок показників якості, за умови, що ці показники підпорядковуються нормальному закону розподілу..

3. Апробація методики та визначення ймовірностей попадання випадкової величини в заданий інтервал оцінювання (див. таблицю 1).

Список літератури

1. EN ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements.
URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en> (дата звернення: 20.10.2024).
2. Білявська О. Б. Концептуальні принципи управління ризиками в державному управлінні. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2010. № 6.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2010_6_5 (дата звернення: 20.10.2024).
3. Михно П. Державне управління ризиком як механізм мінімізації невизначеності. Збірник наукових праць Національної академії державного управління при Президенті України. 2012. Вип. 2. С. 90–100.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnadu_2012_2_12 (дата звернення: 20.10.2024).
4. Лутанюк Н. В., Годіна Н. Ф. Новый стандарт ISO 31000 по управлению риском. История создания и особенности применения. Використання міжнародних стандартів ISO в цілях підвищення ефективності діяльності підприємств – 2010: матеріали міжвузів. студ. конф. Донецьк: ДонНТУ, 2010. С. 8–11.
5. Головач Т. В., Грушевицька А. Б., Швид В. В. Ризик менеджмент: зміст і організація на підприємстві. Вісник Хмельницького національного університету. 2009. № 3. Т. 1. С. 157–163.
6. Стрельбицька Н. Уніфікований міжнародний стандарт ризик-менеджменту як відповідь на виклики глобалізації. Соціально-економічні проблеми і держава. 2011. Вип. 2 (5).
URL: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2011/11snynvh.pdf> (дата звернення: 01.03.2018).
7. Непомнящий О. М. Інжиніринг: деякі аспекти підвищення кваліфікації ключового персоналу. Актуальні проблеми державного управління. 2017. Вип. 2 (52).
URL: <http://www.kbua.kharkov.ua/e-book/apdu/2017-2/doc/5/01.pdf> (дата звернення: 20.10.2024).
8. Дуднева Ю. Е. Стандартизація ризик-менеджменту як шлях підвищення його ефективності. Ринкова трансформація економіки : стан, проблеми, перспективи: матеріали V між нар. наук.-практ. інтернет-конф. (Харків, 8-10 квітня 2014 р.). ХНТУСГ, 2014. С. 84-86.
9. Лагунова І. А. Сутність та принципи концепції ризик-менеджменту. Актуальні проблеми державного управління. 2018. № 1. С. 44-51.
10. Morgan J., Reuters P. RiskMetrics – Technical Document.
URL: <http://www.jpmorgan.com/RiskManagement/RiskMetrics/RiskMetrics.html> (дата звернення: 20.10.2024).
11. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines.
URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en> (дата звернення: 20.10.2024).
12. ISO 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques.
URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iec:31010:ed-2:v1:en,fr> (дата звернення: 20.10.2024).
13. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 2020, vol. 1 (11), pp. 156–162. doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075.

14. Черняк О. М., Багаєв І. О., Катрич О. О., Теслов О. А., Косиченко О. М., Шевченко В. П. Визначення мінімальної кількості періодів для оцінювання індексів сталого розвитку країн ЄС методами порядкових статистик. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. № 1 (27). С. 215–225. doi: 10.30837/ITSSI.2024.27.215
15. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko A. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 4/3, no. 82, pp. 18–24, doi: 10.15587/1729-4061.2016.75503.
16. Ginevičius, R., Trishch, H. Petraškevičius, V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 2015, vol. 28, no. 1, pp. 1096-1110. doi:10.1080/1331677X.2015.1087676.
17. Trishch R., Cherniak O., Zdenek, D., Petraskevicius V. Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods. *Engineering Management in Production and Services*, 2024, vol. 16, no.2, pp. 118-127. doi: 10.2478/emj-2024-0017.
18. Черняк О. М., Сороколат Н. А., Багаєв І. О., Фатєєва Л. Ю. Застосування функціональної залежності для багатокритеріального оцінювання безпеки праці, як об'єкта кваліметрії. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2022. № 1 (19). С. 76–84. doi: 10.30837/ITSSI.2022.19.076.
19. Кім Н. І. Узагальнений показник якості об'єктів кваліметрії різної природи. Вісник аграрної науки Причорномор'я. 2021. Вип. 1. С. 94–101. doi: 10.31521/2313-092X/2021-1(109)-12.
20. Черняк О. М., Сороколат Н. А., Каницька І. В. Графоаналітичний метод визначення комплексного показника якості об'єктів кваліметрії. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2020. № 4 (14). С. 169–175. doi: 10.30837/ITSSI.2020.14.169.
21. Ginevičius R., Podvieszko A. The evaluation of financial stability and soundness of Lithuanian Banks. *Ekonomska istraživanja: znanstveno stručni časopis*, 2013, Vol. 26. no. 2, pp. 191–208.
22. Ginevičius R., Suhajda K., Šimkūnaitė J. Lithuanian experience of quantitative evaluation of socioeconomic system position by multicriteria methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. vol. 110. P. 952–960, doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.941.
23. Šimelytė A., Antanavičienė J. The effect of investment promotion on FDI flows: A case of the Baltic States. *Business: Theory and Practice*, 2013, vol. 14, no. 3, pp. 200–208. doi:10.3846/btp.2013.21.
24. Beinoraitė Š., Drejeris R. Model for measuring the entrepreneurship of the population. *Business: Theory and Practice*, 2014, vol. 15, no. 2, pp. 199–209. doi: 10.3846/btp.2014.20.
25. Krivka A. Complex evaluation of the economic crisis impact on Lithuanian industries. *Journal of Business Economics and Management*, 2014, vol. 15, pp. 299–315. doi: 10.3846/16111699.2013.867277.
26. Brauers W., Ginevičius R., Podvieszko A. Development of a methodology of evaluation of financial stability of commercial banks. *Panoeconomicus*, 2014, Vol. 61, no. 3, pp. 349–367. doi: 10.2298/PAN1403349B.
27. Hashemkhani Zolfanir S., Maknoon E., Zavadskas K. Multiple Nash equilibriums and evaluation of strategies. New application of MCDM methods. *Journal of Business Economics and Management*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 290–305. doi 10.3846 / 16111699.2014.967715.

Надійшла (Received) 08.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 25.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Тріщ Роман - Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», E-mail: trich_@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9503-8428>

Trishch Roman - Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: trich_@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9503-8428>

Яковлев Максим – Доктор технічних наук, професор, Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки Збройних Сил України, E-mail: myyg2015@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3009-0719>

Yakovlev Maxym – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, The Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, E-mail: myyg2015@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3009-0719>

Бурдейна Вікторія - Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», E-mail: v.burdeina@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5065-4007>

Burdeina Viktoriia - Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: v.burdeina@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/https://orcid.org/0009-0005-5065-4007>

Хом'як Едуард - Ph.D, старший викладач кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», E-mail: e.khomiak@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2579-2986>

Khomiak Eduard - Ph.D, Senior Lecturer at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: e.khomiak@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2579-2986>

Гуртовий Іван - аспірант кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», E-mail: i.i.hurtovyi@student.khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/>

Hurtovyi Ivan - Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: i.i.hurtovyi@student.khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-3425-6272>

Євтушенко Андрій – аспірант кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», E-mail: a.o.yevtushenko@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7334-6430>

Yevtushenko Andrii- Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: a.o.yevtushenko@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7334-6430>

Qualimetric method of assessing the risks of producing poor-quality products

Roman Trishch, Maxym Yakovlev, Viktoriia Burdeyna, Eduard Khomyak, Ivan Gurtovyi, Andrii Yevtushenko

Abstract

An important component of implementing a quality management system at an enterprise is the risk assessment procedure. Today, there is no universal method of risk assessment, so each company independently develops appropriate methods and makes management decisions regarding risks, depending on the nature of the product or service, the amount of available information and the competence of the staff. One of the most important risks is the risk of producing products of insufficient quality, since it directly affects the company's competitiveness. The article analyses scientific studies on assessing the quality of production, identifies their shortcomings and limitations in application. The article proposes to use functional dependencies to determine the estimates of quality indicators on a dimensionless scale. It is proposed to build a probability density function of random variables of quality indicators. Knowing the density function of quality indicator assessments, it is proposed to calculate the probabilities of risks of falling into a given assessment interval. A step-by-step methodology for assessing the risks of manufacturing products of inadequate quality is proposed.

Key words: qualimetrics; risk assessment; risk of poor quality; generalised indicator; multicriteria quality assessment; dimensionless scale.

TECHNOLOGY FOR IMPLEMENTING THE LEAN SIX SIGMA QUALITY MANAGEMENT MODEL IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. PART 1: IDENTIFICATION AND MEASUREMENT OF THE EDUCATIONAL PROCESS CRITICAL TO QUALITY CHARACTERISTICS

I.O. Moshchenko, O.V. Zaporozhets

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Abstract

The relevance of the Lean Six Sigma (LSS) quality management methodology implementation in the Ukrainian higher education institutions (HEIs) to improve the efficiency of educational and scientific business processes in accordance with the recommendations of DSTU ISO 21001:2019 Educational organizations — Management systems for educational organizations — Requirements with guidance for use (ISO 21001:2018, IDT) and Standards and Guidelines for Quality Assurance in the European Higher Education Area (ESG) is substantiated. The scientific and applied works of modern foreign and domestic scientists devoted to the adaptation of the LSS model to the conditions of HEIs functioning are analyzed. The aim of the article is analyzing the features of the technology for implementing the LSS methodology in HEIs in order to improve educational and scientific business processes and the applied application of LSS technology in the Ukrainian educational environment. The use of the DMAIC cycle as a basic LSS technology for consistent improvement of the functioning business processes of HEIs is substantiated. The tasks, tools and results of each stage of the DMAIC cycle implementation for the sphere of higher education are defined, taking into account the specific of the result of the HEIs activity which is defined as a set of educational and scientific services and products. The practical significance of the article lies in improving the quality of the educational process in HEIs through the use of the continuous improvement cycle DMAIC and LSS tools in order to increase the efficiency of the implementation of the key process "Development of educational and methodological support (EMS) for the educational process". Critical to quality characteristics (CTQC) of the educational product "Complex of Educational and Methodological Support (CEMS)" are determined. The initial CTQC of the process "Development EMS for the educational process" and its target values have been established and calculated. The prospects of the study are the application of DMAIC technology and other tools for the implementation of the LSS quality management methodology to improve the efficiency of all key educational and scientific business processes within the framework of the development of a comprehensive model of the HEIs quality management in accordance with the principles of modern International and European standards in the field of education. The perspectives of the study are a critical analysis of CTQC with the aim of determining the causes of their non-compliance with the target critical characteristics, the implementation of corrective measures in the educational process, and the development of CTQC sustainability control procedures.

Keywords: Lean Six Sigma (LSS), higher education institutions (HEIs), business process, DMAIC cycle, Value Stream Map, CTQC.

1. Introduction

The International Standard in the field of the educational process quality assurance DSTU ISO 21001:2019 Educational organizations — Management systems for educational organizations — Requirements with guidance for use (ISO 21001:2018, IDT) was introduced in Ukraine as a national standard in 2019. This normative document directly correlates with the general standard for quality management systems in organizations DSTU ISO 9001:2015 Quality Management Systems — Requirements (ISO 9001:2015, IDT) and reflects the principles of the Standards and Guidelines for Quality Assurance in the European Higher Education Area (ESG).

The ISO 21001:2018, in addition to general guidelines and principles for the implementation of quality management systems in educational institutions, contains a

list of processes, quantitative indicators and tools for quality assessment in educational organizations (Annex E. Processes, measures and tools in educational organizations). For quality management in educational institutions, the standard recommends using, along with expert quality control methods, tools that were previously used to analyze the quality of production processes, namely: statistical data analysis, functional and cost analysis (FCA) and the most modern hybrid methodology "Lean Six Sigma (LSS)", which combines all the advantages of the "Six Sigma" and "Lean Production" quality management models. The implementation of the principles and tools of the LSS quality management model in higher education institutions (HEIs) is of particular relevance in Ukraine during martial law, as LSS focuses on eliminating the causes of defects and product quality on the one hand and minimizing resource costs on the other hand.

2. Literature Review

The idea of combining the quality management methodologies of "Lean Production" and "Six Sigma", which were previously considered to be competing, appeared in the early 2000s in the works of J.H. Sheridan (2000) [1] and was quickly adopted by scientists and practitioners of quality management, namely Michael L. George (2002) [2], B. Smith (2003) [3], E.D. Arnheiter and J. Maleyeff, J. (2005) [4], R. D. Snee (2010) [5], L. Corbett (2011) [6], M. Brenig-Jones and J. Dowdall (2018) [7], J. Antony (2021) [8], etc. The appearance of such a popularizing publication as Lean Six Sigma Business Transformation for Dummies [9] testifies about the prevalence of the LSS concept, and since 2010 Emerald Publishing Limited has been publishing the Limited International Journal of Lean Six Sigma edited by Professor J. Antony.

The key principles of the LSS methodology reflect the basic Six Sigma tenets [2]:

1) emphasis on reducing the number of defects and improving the quality of products and services from a consumer point of view;

2) increasing the stability of processes;

3) use of both own and well-known statistical tools for informed decision-making, which ensures effective problem solving;

4) creating a resilient infrastructure that supports cultural changes in the organization;

and the basic Lean principles:

1) Lean considers the functioning of the organization as a continuous flow of interrelated business processes;

2) Lean distinguishes the processes that add and do not add consumer value to the product;

3) Lean uses its own tools to analyze, optimize the flow of processes and maximize the process rate;

4) Lean has a set of technologies that minimize the cost of resources of all types.

Although not so long ago these quality models were considered by some scientists as competing, today the synthesis of the main directions of Six Sigma" and "Lean Production" influence on the processes in modern models of quality management is considered mandatory [2], because:

1) "Lean Production" does not solve the problem of achieving statistical controllability of processes;

2) "Six Sigma" does not significantly affect the increase in the processes rate and the reduction of resource consumption.

The integrated use of two approaches can ensure the product and services quality increasing at the same time as accelerating and stabilizing business processes and reducing all types of wastes.

The service industry has actively adopted the philosophy, methodology and toolkit of LSS and adapted its achievements in order to reduce cycle times and improve the quality of customer service. Thus, according to a study by V. Sunder, the acceptance rate of the LSS model in service organizations in the banking and financial sector, healthcare and information technology is

98.8% [10]. Studies of practical implementation in the service sector were carried out by Frings and Grant (2005), Antony et al. (2007), Laureani et al. (2010). The theoretical basis for the adaptation of LSS in service organizations was the works of M. George (2003) [2], J. Antony (2021) [8]. In 2003, M. George, founder and president of the consulting company George Group, formulated the reasons that make the LSS model effective for use in service organizations [2]:

1) service delivery processes are often slow, i.e. costly, which causes errors and, as a result, customer dissatisfaction;

2) the service delivery rate is low due to the excess of work-in-progress that accumulates as a result of the excessive complexity of the service;

3) for slow processes, the Pareto principle is effective, according to which 80% of time and resources are spent on 20% of the activity.

The above reasons fully apply to the field of educational services. And as a result of these considerations, in 2012 J. Antony, N. Krishan, D. Cullen and M. Kumar, M. analyzed the opportunities, difficulties and conditions for the use of LSS in HEIs. Scientists have formulated the challenges posed by the implementation of LSS principles in HEIs [11]:

1) difficulties in applying the production-oriented terminology of LSS in the education sector;

2) the need for a systematic approach to the analysis and optimization of educational processes;

3) the bias of University administration regarding the effectiveness of LSS in the field of education, based on the perception of Lean as a purely production model of quality management;

4) immoderate and rapid implementation of LSS in practice, which leads to budget deficits and problems with customer satisfaction;

5) the need to apply a process approach to the analysis of the HEI functioning;

6) the HEI corporate culture should be based on the principles of openness, trust and acceptance of changes;

7) lack of understanding between all types of consumers of the educational product, namely, students, teachers, engineering and technical staff and administration;

8) lack of understanding and competition between individual departments of HEIs;

9) lack of financial and time resources;

10) weak connection between projects to improve the quality of educational services and the strategic goals of HEIs.

Some elements of LSS have begun to be implemented in the field of education (Sunder, 2016) in institutions such as Kings College, London; National University of Singapore; Valdosta State University, Georgia; Heriot Watt University, UK; Gordon State College, USA, etc. But there was no scientific literature on the methodology of LSS applying, taking into account the specifics of consumers, the result of activities, and corporate culture in HEIs.

In 2022, a full-fledged book by Antony S. and Anthony J. was published, in which the authors

theoretically substantiated the features of the use of LSS in higher education and, using specific cases as an example, analyzed the conditions and results of implementing the LSS model in UK HEIs [12]. This book has become the theoretical and practical basis for the use of the LSS model in educational institutions around the world.

In Ukraine, although there are some works on the application of the Lean Higher Education methodology in the field of higher education [13], there is no literature that analyzes the peculiarities of the LSS principles and tools implementation in HEIs, taking into account the specifics of activities, corporate culture, and the conditions of martial law in our country.

The aim of the article is analyzing the features of the technology for implementing the LSS methodology in HEIs in order to improve educational and scientific business processes and the applied application of LSS technology in the Ukrainian educational environment.

3. Research Methodology

The technology for implementing the LSS methodology is based on DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) and DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify) + DFSS (Design for

Six Sigma) improvement cycles. The DMAIC cycle is used to consistently improve the organization's already functioning business processes, while the DFSS methodology, implemented in the DMADV cycle, helps to design, develop and implement new business processes that will best meet the Six Sigma excellence criteria, namely the DPMO (Defects per Million Opportunities) has a score of 3.4. The results of improving business processes in the field of higher education with the help of the DMAIC cycle as part of the Six Sigma and LSS models implementation are presented in scientific papers [14, 10]. However, more significant results will be achieved by using a huge Lean+Six Sigma toolkit, taking into account the specifics of the results of the HEI's activities, which combine both educational services delivery and the generation of educational and scientific products. This feature must be taken into account when modeling the business processes of HEIs and determining the conditions for the use of quality management tools [15].

Table 1 shows the tasks and tools for the implementation of each stage of the DMAIC cycle for higher education, taking into account the duality of the results of HEIs.

Table 1 – Tasks, tools and results of the implementation of the DMAIC cycle in HEIs according to the LSS model (developed by the authors)

Stage 1	Tasks 2	Tools 3	Results 4
D (Define)	Determination of goals, parameters and indicators of the educational process effectiveness in HEIs. Development of a process map with the identification of "bottlenecks"	Methodology for determining key performance indicators (KPIs) of the process Methodology for Determining Indicators Critical to Quality Characteristics (CTQC) of the process Quality Function Deployment (QFD) Technology SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) diagram method Value Stream Mapping (VSM) Method	A project definition form that includes a description, goals, timelines, and process executors Process Performance Indicators SIPOC Diagram Value Stream Map
M (Measure)	Planning the collection of statistics and quantifying the performance indicators of the process. Calculation of the "sigma" coefficient of the process. Analysis of the process reproducibility. Analysis of process variability	Methodology for calculating DPMO according to ISO 13053-1:2015 Seven Classic Quality Control Tools Methodology for Calculating Value Stream Performance Indicators Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Statistical Data Analysis Methodology for Evaluating Quality Indicators Based on Process Reproducibility Coefficients	DPMO indicator Check Sheets Control Maps Quality Histogram Pareto Chart Process Cycle Efficiency (PCE) Stream Non-Defectiveness Indicator (SNI) Stream Quality Indicator (SQI) FMEA Table Process Reproducibility Index
A (Analyze)	Analysis of the KPIs for compliance with target values. Identification of influencing factors that cause non-compliance and their ranking by priority	Cause and Effect Diagram Decision Tree Correlation and regression analysis Analysis of Variance (ANOVA) Priority Matrix Method FMEA Analysis The 5-Why Method Analysis of «bottlenecks» at the VSM Pareto Chart Hypothesis testing methods	FMEA Process Results Ranked Influencing Factors Factors that cause 80% of problems Correlation coefficients "Bottlenecks" at the VSM Hypothesis test results

The end of the table 1

1	2	3	4
I (Improve)	Development of Sustainable Process Improvement Measures Identification of the most effective measures according to the established criteria Event Risk Analysis Implementation of measures	Benchmarking Total Productive Maintenance (TPM) Method Process rebalancing Just-In-Time (JIT) Methodology Kaizen Events 5S+1 Ordering System Single Minute Exchange of Dies (SMED) Experiment Design Method Value Stream Mapping Priority Matrix Method FMEA Analysis Pareto Chart Methodology for Evaluating Quality Indicators Based on Process Reproducibility Indices	Priority Decision Matrix Sustainable Process Improvement Measures FMEA-Table of the Event Risk Analysis Improved Process Reproducibility Index MPSC of Future Status Future State Process Cycle Efficiency
C (Control)	Documenting an improved process Development of a control plan Monitoring the effectiveness of activities Development of an automatic control system	Standard Operating Procedure (SOP) Map Visual Management Technique (Andon) Rule for stopping the process in case of poor-quality work (Jidoka) "Poka-Yoke" anti-bug system Control Map Method Calculation of the process economic efficiency Process Audit	Process Management Plan Control Maps Updated Metrics Critical to Process Quality (CTQC) Financial indicators of process performance Process Audit Results

Since the LSS methodology is focused primarily on the management of individual projects in order to achieve the business goals of the organization, the appropriate quality management tools are selected depending on the characteristics of the process (project), which is improved through the DMAIC cycle.

4. Results

Based on the analysis of literary sources in the article "Value Stream Map optimization model in the field of educational services [15], it is established that one of the key processes in the functioning of HEIs is the process of educational and methodological support (EMS) development for the educational process. Therefore, an important applied task of implementing the LSS concept to improve the quality of the educational process in HEIs is the development of a methodology for applying the DMAIC continuous improvement cycle in order to increase the efficiency of the process implementation "Development of the EMS for the educational process".

D (Define)

The main component of EMS for the training of higher education applicants in Ukraine is the complex of educational and methodological support (CEMS), which is a set of didactic and methodological documents aimed at the implementation of educational services of a particular science or field of knowledge.

Taking into account the requirements of the normative document "Recommendations for the

application of criteria for assessing the quality of the educational program" [16] and the internal document of NURE "Regulations on the complex for educational and methodological support of the discipline", the authors have developed a list of CTQC characteristics that are critical in terms of the process "Development of the EMS for the educational process" quality, and can be considered as criteria for the suitability of an educational product:

- 1) the volume of the CEMS material should correspond to the volume of the educational program (EP);
- 2) the structure of the CEMS should comply with the Curriculum and the content of the EP;
- 3) the content of the CEMS should provide practical training for higher education applicants in order to acquire professional competencies;
- 4) the EMS forms and methods of teaching should meet the requirements of the student-centered approach and the principles of academic freedom;
- 5) CEMS should contain clear information on the objectives, content and program outcomes of learning;
- 6) compliance of the CEMS content with modern scientific achievements and practices;
- 7) the forms of control measures and evaluation criteria should be clear and understandable;
- 8) design of CEMS should comply with the requirements of DSTU 3008:2015 "Information and documentation. Scientific and technical reports. Structure and rules of putting into official form";
- 9) the time of development and promulgation of CEMS should meet the requirements of the Order of

NURE No.170 dated 02.06.2021 "On Time Standards for Planning and Accounting of Educational, Methodological, Scientific, Organizational Work of Scientific and Pedagogical Staff of NURE".

Identification of customers, inputs, processes, outputs and consumers of the process under study, which is traditionally performed in the Six Sigma methodology by constructing a SIPOC diagram, can be more effectively implemented using the VSM method, since it allows to simultaneously visualize the information links between subprocesses and highlight the "bottlenecks" of the process.

Visualization of the value-adding stream for the process "Development of the EMS for the educational process", which is formed by the sequence of production and logistics processes of creating and transferring the value of the object (CEMS) from the customer (Ministry of Education and Science of Ukraine) to the consumer (higher education applicants) and synchronized with the flow of orders, is carried out using decomposition methods and the VSM method and is shown in Fig. 1.

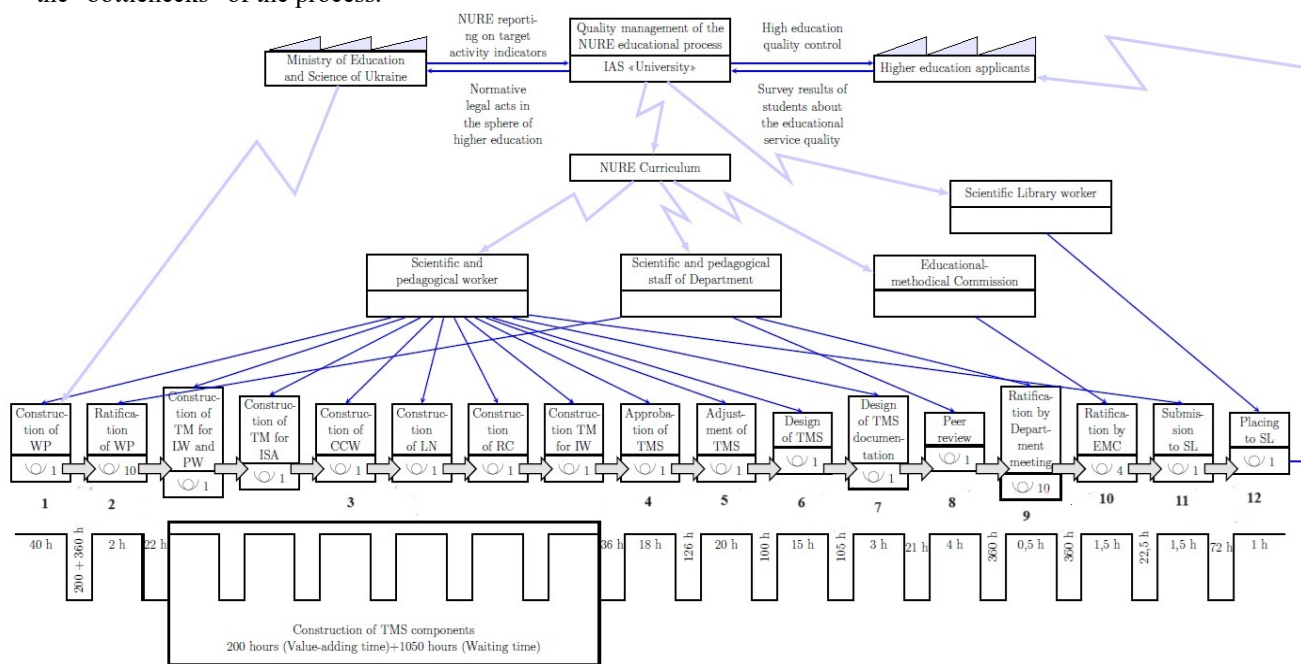


Fig. 1. The current state VSM of the process "Development of the EMS for the educational process" [15]

M (Measure)

To quantify the efficiency of the process functioning, the "Sigma" defect-free coefficient was calculated, which is based on the determination of the DPMO indicator according to the formula given in paragraph 5.2 (ISO 13053-1):

$$Y_{DPMO} = \frac{c}{n_{units} \cdot n_{CTQC}} \cdot 10^6, \quad (1)$$

where c is the total number of defects; n_{units} – the number of inspected units of production (100 CEMS over the past 5 years); n_{CTQC} – the number of characteristics critical for product quality (9).

For the critical characteristics of the process "Development of the EMS for the educational process" at the Department of Information and Measurement Technologies (IMT), NURE, the following number of inconsistencies was identified:

- 1) discrepancy of CEMS material volume with the requirements of EP - 0;
- 2) inconsistency of the CEMS structure with the Curriculum and the EP content - 0;

3) discrepancy of the CEMS content with the requirements of the regulatory documentation - 0;

4) inconsistency of the forms and methods of teaching used in the CEMS with the requirements of the student-centered approach and the principles of academic freedom - 0;

5) non-compliance of the CEMS in terms of clarity of information on the goals, content and program learning outcomes with the requirements of the regulatory documentation - 0;

6) inconsistency of the content of the CEMS with modern scientific achievements and practices - 1;

7) non-compliance of the control measures forms and evaluation criteria with the requirements of the regulatory documentation (RD) - 0;

8) non-compliance of the CEMS design with the requirements of regulatory documentation - 1;

9) failure to meet deadline on the CEMS - 4.

The DPMO of the process "Development of EMS for the educational process" at the Department of IMT is equal to:

$$Y_{DPMO} = \frac{0+0+0+0+0+1+0+1+4}{100 \cdot 9} \cdot 10^6 = 6666, (6).$$

We calculated the "sigma coefficient" of the process quality, taking into account the fact that the number of sigmas is derived from the normal distribution with a shift of 1.5σ from the mathematical expectation, using the formula:

$$Z_{\text{value}} = F_N^{-1}(P) + 1,5, \quad (2)$$

where $P = 1 - \frac{Y_{\text{DPMO}}}{10^6}$ is the probability of developing a high-quality CEMS; $F_N^{-1}(P)$ is the function of the inverse normal standard distribution.

For probability $P = 1 - \frac{6666,67}{10^6} = 0,99333$ the values $F_N^{-1}(P) = 2,47474$ and $Z_{\text{value}} = 3,974738$. The calculated number of sigmas is within the interval $Z_{\text{value}} = 3.97... 3.98$, which is given in the table in Annex A to ISO 13053-1 for $Y_{\text{DPMO}} = 6666,67$.

Thus, it can be concluded that the quality indicator of the process "Development of the EMS for the educational process" according to the LSS methodology at the Department of IMT $Z_{\text{value}} = 3,975$ corresponds to the average level of defect-free (target level $Z_{\text{value}} = 6$).

Moreover, it can be noted that the largest number of non-compliant CEMSs arises as a result of non-compliance with the criterion of "compliance of the development time with normative values". In the LSS methodology, the indicator of time spent on creating a product or providing a service is estimated by constructing a line of chronology of the process and calculating the Process Cycle Efficiency (PCE) using the formula:

$$PCE = \frac{CT}{LT} \cdot 100\%, \quad (3)$$

where CT (Cycle Time) is the average length of time it takes to complete one or more steps within the process (value-adding time);

LT (Lead Time) is the total time of the production cycle.

To analyze the efficiency of the value stream during the implementation of the process, the PCE is calculated, which characterizes the ratio of the value-adding time to the total cycle. The PCE indicator of the process "Development of EMS for the educational process" at the Department of IMT, NURE (11.3%) is far from the target value adopted by Lean management practitioners (20%) [15].

Let's calculate what target value the PCE indicator should have in order for the time of development and implementation CEMS in the educational process met the normative value. Since the CEMS should be implemented into the educational process before the start of teaching the discipline, in practice the total time for the development and implementation of the CEMS is the time from the approval of the teacher's workload to the start of teaching the discipline (approximately 3 months

or 2196 calendar hours). During the analysis of the VSM of the process under study at the Department of IMT, NURE, it was found that the value-adding time (CT) was 307.5 hours (300 hours according to the document "On the norms of time for planning and accounting of educational, methodological, scientific, organizational work of scientific and pedagogical staff of NURE" for the development of CEMS in the amount of 6 ECTS + 7.5 hours for other subprocesses). The total time of the process (LT) was 2834.5 hours (PCE = 10.8%). Based on the target time for the process implementation (2196 hours), the PCE should be at least 14.6%.

That is, when analyzing the process under study, it is necessary to focus on identifying and eliminating unproductive time expenditures in order to optimize the value stream by minimizing time wastes.

An indicator of the flow efficiency for the CEMS development in terms of satisfying the critical characteristics of the educational product, which characterize the product quality, is the Stream Non-Defectiveness Indicator (SNI), which reflects the proportion of suitable products at the output to suitable products at the flow input. It is calculated using the formula:

$$SNI = \prod_{i=1}^n \left(\frac{(100 - PD)}{100} \right) \cdot 100\%; \quad (4)$$

where PD is the share of defective products on the i-th operation;

n is the total number of operations.

Regarding the available statistical data of the process "Development of EMS for the educational process" at the Department of IMT, which consists of 12 subprocesses, according to formula (4), we get:

$$SNI = (1 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) \cdot 100\% = 98\%.$$

Thus, it was found that subprocess 3 on the VSM (Fig. 1), namely "Development of the EMS for the educational process", is the most likely place of a defective educational product occurrence. Therefore, it is necessary to develop measures to eliminate the causes of nonconformities at this stage in order to achieve the target value of SNI = 100%.

5. Conclusion and agenda for future research

The article substantiates the relevance of the LSS quality management methodology application to improve educational business processes and formulates the challenges that the implementation of LSS principles poses to HEIs. These difficulties are primarily related to the need to adapt the production-oriented concept of LSS to the field of educational and scientific services and the bias of the HEI's administration and staff regarding the effectiveness of LSS in the field of education.

The features of the DMAIC improvement cycle implementation, as the basic technology for the LSS implementation, are analyzed, taking into account the

specifics of the results of the HEI's activities, which combine both the educational services delivery and the educational and scientific products generation. The tasks, implementation tools and results of each stage of the DMAIC cycle in HEIs are formulated.

A methodology for the application of the DMAIC cycle has been developed and implemented in order to increase the efficiency of the implementation of the HEI's key process "Development of the EMS for the educational process". The criteria for the suitability of the educational product CEMS are proposed.

The identifying stages of the DMAIC cycle were implemented, the results of which were the determination of the researched process CTQC list and the calculation of their quantitative current and target values.

On the basis of the defined criteria, it is established that the studied process has a "sigma" level of defect-free $Z_{value} = 3,975$ (target value $Z_{value} = 6$). The current and target indicators of process efficiency (PCE and SNI) have been identified and calculated. The PCE current

value is equal to 11,3 %, while the PCE minimum target value is equal to 14,6 %. The SNI current value is equal to 98 %, SNI target value is equal to 100 %.

In the continuation of the study, an analysis of the process effectiveness will be carried out. The key indicators of the process will be studied and critically analyzed in order to identify the influencing factors that cause their non-compliance with the target values, and after that, the most important factors will be identified. Measures will be developed to bring the process "Development of EMS for the educational process" CTQC to the target values, namely, that the number of non-conformances for all CTQCs is equal to zero. During the implementation of the «Control» stage, it is planned to build the Future-State VSM, to implement it into the educational process, and to calculate new values of the process key indicators. Control of the process stability over time is provided by the control maps construction of the process key characteristics.

References

1. Sheridan J. Lean Sigma synergy. *Industry Week*. 2000. № 17. P. 81-82. URL: https://www.researchgate.net/publication/295733667/Lean_sigma'synergy (date of access: 06.08.2024).
2. George M. Lean Six Sigma for Service. New York: McGraw Hill Publications, 2003. DOI: 10.1036/0071436359 (date of access: 08.08.2024).
3. Smith B. Lean and Six Sigma - a one-two punch. *Quality Progress*. 2003. № 36. P. 37-41. URL: https://www.researchgate.net/publication/292791815_Lean_and_six_sigma_-_A_one-two_punch (date of access: 08.08.2024).
4. Arnheiter E., Maleyeff J. The integration of Lean Management and Six Sigma. *The TQM magazine*. 2005. № 17. P. 5-18. URL: <https://doi.org/10.1108/09544780510573020> (date of access: 21.07.2024).
5. Snee R.. Lean Six Sigma - getting better all the time. *International Journal of Lean Six Sigma*. 2010. № 1. P. 9-29. DOI:10.1108/20401461011033130 (date of access: 26.07.2024).
6. Corbett L. Lean Six Sigma: the contribution to business excellence. *International Journal of Lean Six Sigma*. 2011. № 2. P. 118-131. DOI:10.1108/20401461111135019 (date of access: 29.07.2024).
7. Brenig-Jones M., Dowdall J. Lean Six Sigma For Leaders: A practical guide for leaders to transform the way they run their organization. Wiley. John Wiley&Sons, 2018. URL: https://media.wiley.com/product_data/excerpt/4X/11193747/111937474X-105.pdf (date of access: 28.07.2024).
8. Antony J. Lean Six Sigma in Higher Education. A Practical Guide for Continuous Improvement Professionals in Higher Education. Emerald Points, 2021. DOI 10.1108/9781787699298 (date of access: 20.07.2024).
9. Burghal R., Grant V., Morgan J. Lean Six Sigma Business Transformation For Dummies. Wiley. John Wiley&Sons, 2014.
10. Sunder V. Lean Six Sigma in higher education institutions. *International Journal of Quality and Service Sciences*. 2016. № 8. P. 159 – 178. URL: <http://dx.doi.org/10.1108/IJQSS-04-2015-0043> (date of access: 06.08.2024).
11. Antony J., Krishan N., Cullen D., Kumar, M. Lean Six Sigma for Higher Education institutions (HEIs): Challenges, barriers, success factors, tools/techniques. *International Journal of Productivity and Performance Management*. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2012. № 61(8). P. 940-948. DOI:10.1108/17410401211277165 (date of access: 10.09.2024).
12. Anthony S., Antony J. Lean Six Sigma in Higher Education Institutions. The Need to Change. Emerald Points, 2022. DOI 10.1108/9781803826011 (date of access: 15.09.2024).
13. Yermakova S. S. Theoretical and methodological principles of monitoring the professional training of future teachers of higher technical educational institutions : D. Ed. dissertation, [South Ukrainian National Pedagogical University]. URL: <https://dspace.pdpu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1553> [In Ukrainian]. (date of access: 18.09.2024).
14. Prasad K., Subbaiah K., Padmavathi G. Application of Six Sigma Methodology in an Engineering Educational Institution. *Int. J. Emerg. Sci*. 2012. № 2(2). P. 222-237. URL: <https://www.researchgate.net/publication/256377930> (date of access: 14.09.2024).
15. Moshchenko I. O., Nikitenko O. M. Value Stream Map Optimization Model In The Field Of Educational Services. *Collection Of Scientific Works Of The Odesa State Academy Of Technical Regulation And Quality*. 2023. № 2(23). P. 6-15. DOI:10.32684/2412-5288-2023-2-23-6-15 (date of access: 20.09.2024).
16. Recommendations on the criteria application for evaluating the quality of an educational program. Kyiv, 2020. URL: <https://sqe.gov.ua/wp-content/uploads/2022/01/Rekomendacii-shhodozastosuvannya-kriteriiiv-ocinyuvannya-yakosti-OPP-ta-osvitnoi-diyalnosti-za-ciieyu-programoyu-1.pdf> [In Ukrainian]. (date of access: 12.09.2024).

Надійшла (Received) 01.11.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 07.11.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Мощенко Інна – кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: inna.moshchenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0037>

Moshchenko Inna – PhD, Associate Professor, IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: inna.moshchenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0037>

Запорожець Олег – кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: oleg.zaporozhets@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7831-8479>

Zaporozhets Oleg – PhD, Associate Professor, IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: oleg.zaporozhets@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7831-8479>

**Технологія реалізації моделі управління якістю “Lean Six Sigma” в закладах вищої освіти. Частина 1:
Ідентифікація та вимірювання освітнього процесу, критичного до якісних характеристик**

I.O. Мощенко, O.V. Запорожець

Анотація

Обґрунтовано актуальність впровадження методології управління якістю Lean Six Sigma (LSS) в закладах вищої освіти (ЗВО) України для підвищення ефективності освітніх і наукових бізнес-процесів згідно з рекомендаціями ДСТУ ISO 21001:2019 Освітні організації. Системи управління в освітніх організаціях. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 21001:2018, IDT) та Стандартів і рекомендацій щодо забезпечення якості в Європейському просторі вищої освіти (ESG). Проаналізовано наукові та прикладні праці сучасних закордонних і вітчизняних науковців, присвячені адаптації моделі LSS до умов функціонування ЗВО. Метою статті є аналіз особливостей технології реалізації методології LSS в ЗВО з метою покращення освітніх та наукових бізнес-процесів та прикладне застосування технології LSS в умовах українського освітнього середовища. Обґрунтовано використання циклу DMAIC як базової технології LSS для послідовного вдосконалення функціонуючих бізнес-процесів ЗВО. Визначено задачі, інструментарій та результат реалізації кожного етапу циклу DMAIC для сфери вищої освіти з урахуванням специфіки результату діяльності ЗВО, який визначається як сукупність освітніх та наукових послуг і продуктів. Практичне значення статті полягає в покращенні якості освітнього процесу в ЗВО за допомогою застосування циклу безперервного поліпшення DMAIC та інструментів LSS з метою підвищення ефективності реалізації ключового процесу «Розробка науково-методичного забезпечення освітнього процесу». Визначено критичні характеристики (СТQC) освітнього продукту «Комплекс науково-методичного забезпечення (КНМЗ)». Встановлено та розраховано початкові індикатори якості процесу «Розробка НМЗ освітнього процесу» та їх цільові значення. Перспективами дослідження є критичний аналіз СТQC з метою визначення причин виникнення їх невідповідності цільовим критичним характеристикам, впровадження корегуючих заходів в освітній процес та розробка процедур контролю сталості СТQC.

Ключові слова: Lean Six Sigma, заклади вищої освіти, бізнес-процес, цикл DMAIC, Мапа потоку створення цінності, СТQC.

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ НАВЧЕНОСТІ СУБ'ЄКТА НАВЧАННЯ

Ю.В.Козлов¹, О.В. Дегтярьов¹, Л.В. Василющенко¹, В.М. Унгер^{1,2}

¹Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, yurii.kozlov@nure

²ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", Кривий Ріг, Україна

Анотація

Розглянуто варіант методу вирішення одного із завдань педагогічної кваліметрії, сутність якого полягає у використанні моделі оцінювання у вигляді сукупності чотирибальної шкали порядку декількох різновидів, двобальної шкали, рейтингової стобальної шкали та відповідної їй ECTS-шкали, що дає змогу зіставляти оцінки, отримані за будь-якою із цих шкал, і застосувати їх для оцінювання рівня підготовленості суб'єктів навчання до визначеного виду професійної діяльності.

Ключові слова: кваліметрія, процедура оцінювання, суб'єкт навчання, шкали оцінювання.

1. Вступ

Прийнятим і пропонуваним до вжитку методам і системам оцінювання рівня підготовленості здобувачів освіти – суб'єктів навчання (СН) до визначеного виду професійної діяльності притаманні недоліки, пов'язані з використанням різноманітних шкал, відсутністю чітких критеріїв їх застосування, надмірна «заматематизованість», особливо процедур оброблення результатів оцінювання. Це обумовлює актуальність і мету статті – запропонувати варіант придатного до застосування широким колом працівників системи освіти метода кількісного оцінювання рівня навченості СН як логічне продовження попередніх оприлюднених робіт авторів, зокрема [1], яку можна вважати розгорнутим планом цієї публікації.

2. Виклад основного матеріалу

Введемо у розгляд і визначимо термін **навченість** як понятійний «цивільний» аналог терміна «виучка (військова)» [2] – показник (бажано інтегральний), що характеризує проміжний або кінцевий результат навчання як рівень засвоєння суб'єктом навчання знань, умінь та навичок у певній галузі людської діяльності і дозволяє отримати рейтинговий список групи СН.

Методологію та проблематику кількісних оцінок якості будь-яких об'єктів (предметів, явищ, процесів тощо) вивчає **кваліметрія** як частина теорії прийняття рішень. У процесі вирішення кваліметричних завдань у загальному випадку зазвичай задіяні один або декілька (група) експертів: оператори вимірювальних приладів, експерти з галузі кваліметрії, судді, викладачі [3]. Останні при цьому виконують комплексне оцінювання якості навчально-виховного процесу та його результатів через деяку сукупність показників із застосування відповідної моделі, що складає сутність **педагогічної кваліметрії** [4], розширенням якої можна вважати **психолого-педагогічну кваліметрію** [5]. У цій галузі ширяться спроби

застосування моделей, прийнятих до вжитку у психометрії для визначення рис особистості [4 – 8]. Відмітимо як приклад модель Раша [7], аналіз сутності якої [9] показав недостатню обґрунтованість використання логіт-моделі з метою оцінювання якості навчання; графічна інтерпретація пробіт-моделі нагадує так звані криві виявлення цілі в умовах перешкод, відомі з теорії радіолокації [10]. Виявлення виконують шляхом оброблення отриманої інформації за критеріями мінімуму середнього ризику, максимуму відношення правдоподоби, Неймана-Пірсона тощо, достатньо складних у алгоритмічному та обчислювальному сенсі. Алгоритми, побудовані на моделі Раша і їм подібних, не менш трудомісткі.

Зауважимо, що, на наш погляд, використання в психолого-педагогічній кваліметрії процедур оброблення, побудованих на «встановлених» законах розподілу, неправомірне, оскільки невизначеність вихідних даних (підкреслимо, нечислової природи) має нестохастичний характер.

Для оцінювання рівня навченості в системі освіти будь-якої розвинутої країни має існувати так звана **система оцінювання знань (СОЗ)** як найважливіший елемент освітнянського процесу [11].

Система оцінювання знань суб'єктів навчання у закладах освіти України передбачає використання шкал порядку: чотирибальної, десятибальної, дванадцятибальної, двадцятибальної, накопичувальних стобальної та двохсотбальної, а також декларованої у рамках Болонського процесу рейтингової стобальної шкали (РСШ) і відповідної їй ECTS шкали та їх різновидів, прийнятих у закладах вищої освіти (ЗВО), включаючи ЗВО авторів. Відмітимо, що збільшення довжини шкали (розширення діапазону вимірювання) зумовлено потребою поліпшення якості розрізнення СН.

Подання результатів оцінювання знань із залишенням двох знаків після коми відповідає відомому з метрології методу ноніуса [12] розмірністю 1/100. Абсолютна похибка при цьому не перевищить $\pm 0,010$. З тих же міркувань кожна з

поділок будь-якої із цифрових шкал може бути поділена на п'ять, десять, двадцять і більше поділок.

Чотири-, десяти-, дванадцяти- та двадцятибальні шкали при наявності ноніусу, а також стобальна і двохсотбальна шкали педагогічної кваліметрії лінійні і зв'язок між ними легко встановлюється завдяки так званим реперним точкам, як показано на рис. 1.

Чотирибальну шкалу з ноніусом 1/100 назвемо удосконаленою чотирибальною шкалою (УЧШ).

Введення такої шкали робить недоцільним застосування десяти-, дванадцяти- та двадцятибальної шкали і дозволяє використовувати прийняті у викладацькій практиці оцінки типу 2⁺ або 4⁻, еквівалентами яких в УЧШ будуть оцінки 2,33 та 3,66. У разі утруднень з визначенням відповідного бала (назвемо це «ефектом буріданова віслюка») експерт (викладач) виставляє оцінку, що дорівнює середині інтервалу між «сумнівними» оцінками або, взагалі, середині шкали, тобто 3,50.



Рис. 1. Зв'язок між шкалами педагогічної кваліметрії

Імовірісно-інформаційний підхід [13] дозволив отримати вираз для визначення оцінки Q будь-якої L -бальної логарифмічної шкали з основою «два» як функції від частки q повернутої об'єктом контролю інформації; зокрема, формула для розрахунку оцінок за логарифмічною чотирибальною шкалою (ЛЧШ) має такий вигляд:

$$Q_{\text{ЛЧШ}} = 2 + \log_2[-8/(7q - 8)]. \quad (1)$$

Аналогічний підхід викладено у випадково знайденій публікації невизначеного автора [14], в якій розглянуто п'ятибальну шкалу із застосуванням десятикового логарифма.

Частку q повернутої об'єктом контролю інформації оцінюють як результат підрахунку в

абсолютній шкалі кількості n_v вірних відповідей на запитання, правильно виконаних завдань або розв'язаних задач, віднесених до їх (запитань, завдань, задач) загальної кількості n_z :

$$q = n_v / n_z. \quad (2)$$

Контроль може бути усним, тестовим, у вигляді письмового опитування або контрольної роботи тощо.

Значення q може бути використано як деякий коефіцієнт подібності, що характеризує виражену у відсотках долю засвоєної СН інформації від усього обсягу винесеної на контроль; відповідна модель подання оцінних функцій викладача наведена на рис. 2.

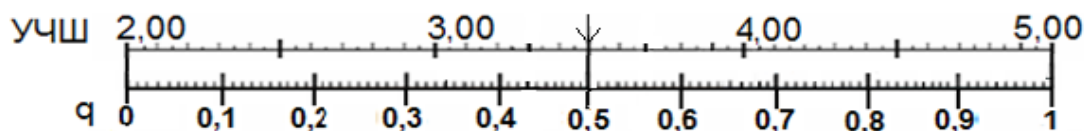


Рис. 2. Модель подання оцінних функцій викладача

Серед систем оцінювання знань найбільш розповсюджені у світі різні реалізації англо-саксонської алфавітної системи з оцінками від «А» до «F» у порядку спадання. У Сполучених Штатах Америки [15] деколи замість «F» (від англ. *fail* – провал) використовують «N» (від англ. *no credit*) або «U» (від англ. *unsatisfactory* – незадовільно), а також плюси і мінуси. Головною умовою застосування і відмінністю розглянутої вище системи є

конфіденційність оцінювання: про конкретну оцінку навчальних досягнень знають лише викладач і суб'єкт навчання.

Рейтингову стобальну шкалу (РСШ) укупі з літерною шкалою ECTS та чотирибальною шкалою (ЧШ) можна розглядати як Болонську модель оцінювання (рис. 3). Відмітимо характерну рису цієї моделі – нелінійність шкали ECTS і штучно «прив'язаної» до неї вербальної ЧШ.

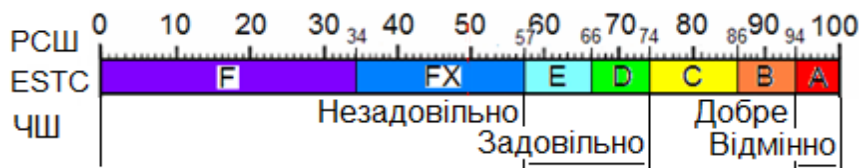


Рис. 3. Болонська модель оцінювання рівня навченості

Подання результатів контролю стобального рейтингового оцінювання за болонською моделлю можливе за виразом

$$Q_{PCШ} = q \cdot 100. \quad (3)$$

Відповідні оцінки Q_{ESTC} і $Q_{ЧШ}$ отримують за номограмою (рис. 3).

Оцінювання результатів контролю СН можна виконувати в традиційний спосіб, виставляючи оцінку за чотирибальною або удосконаленою чотирибальною шкалою. Підкреслимо, що вербальні оцінки ЧШ (відмінно, добре, задовільно, незадовільно) свідчать про її нечисловий характер. Перехід до числових значень здійснюють, виставляючи бали, що відповідають судженням щодо

твердження типу «Відповідає чи ні зміст відповіді смислу запитання?»: Так – 5, Скоріше так, чим ні – 4, Скоріше ні, чим так – 3, Ні – 2. Кінцевий результат такого оцінювання розраховують як середнє арифметичне отриманих оцінок, що для вузьких шкал не суперечить теорії, підтверджено результатами розрахунків значення X для прямокутної результуючої функції належності (РФН) $\mu(x)$ за методом центра тяжіння [16] та відомою формулою обчислення математичного сподівання $M(x)$ для графічної подоби РФН $f(x)$, як при стохастичній невизначеності. Аналітичне моделювання також підтверджує співпадіння результатів розрахунків за цими двома методами, як це показано на рис. 4 – 7, що пояснень не потребують.

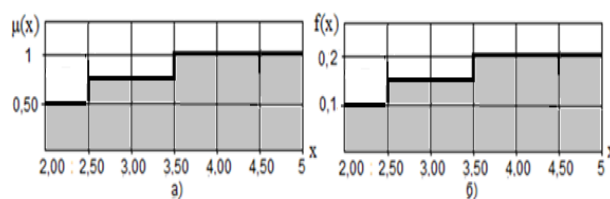


Рис. 4. $X = 3,675$; $M(x) = 3,675$

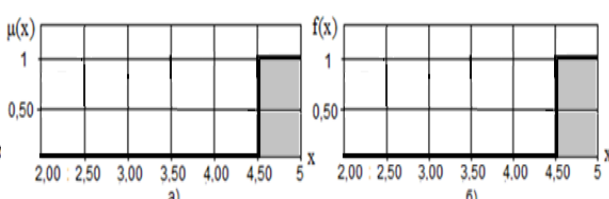


Рис. 5. $X = 4,75$; $M(x) = 4,75$

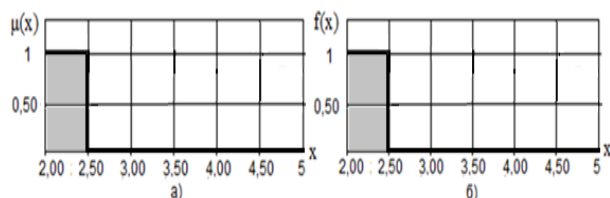


Рис. 6. $X = 2,25$; $M(x) = 2,25$

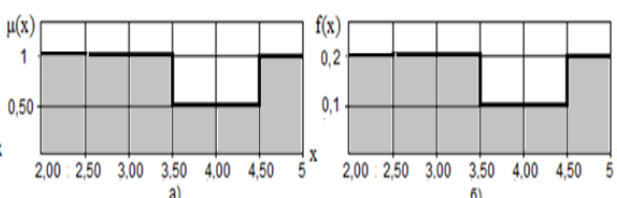


Рис. 7. $X = 3,40$; $M(x) = 3,40$

Порівняння результатів розрахунку оцінок ЛЧШ з оцінками ECTS-шкали дає змогу припустити, що в основу системи стобального рейтингового оцінювання покладена концепція імовірісно-інформаційного підходу, і запропонувати гібридну модель подання оцінних функцій викладача [17], як показано на рис. 8. На номограмі наведена апроксимована логарифмічна чотирибальна шкала (АЛЧШ), складена з трьох відрізків у діапазонах значень q $0 \dots 0,57$; $0,57 \dots 0,86$; $0,86 \dots 1$, що не змінює її логарифмічний характер, а дозволяє усунути

притаманний будь-якій логарифмічній шкалі суттєвий недолік – складність графічного відтворення. Кожен з відрізків АЛЧШ розбито на рівні інтервали визначеної довжини. Такий підхід забезпечує чітку «прив'язку» одна до одної оцінок за двобальною шкалою q , УЧШ, АЛЧШ, РСШ і ECTS шкалою [17, 18] – $0,5 \rightarrow 3,50 \rightarrow 2,87 \rightarrow 50 \rightarrow FX$ відповідно, як показує приклад на рис. 8.

Нижче наведені розрахункові вирази (4) і (5), які зв'язують значення $Q_{PCШ}$ з $Q_{УЧШ}$ і $Q_{АЛЧШ}$ відповідно.

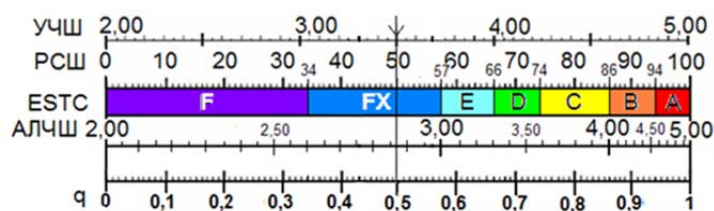


Рис. 8. Гібридна модель подання оцінних функцій викладача

$$Q_{PCШ} = \begin{cases} (Q_{УЧШ} - 2) \cdot 33, \text{ якщо } 2,00 \leq Q_{УЧШ} < 5; \\ 100, \text{ якщо } Q_{УЧШ} = 5. \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{PCШ} = \begin{cases} (Q_{АЛЧШ} - [Q_{АЛЧШ}]) \cdot 57, \text{ якщо } 2,00 \leq Q_{АЛЧШ} < 3,00; \\ (Q_{АЛЧШ} - [Q_{АЛЧШ}]) \cdot 29 + 57, \text{ якщо } 3,00 \leq Q_{АЛЧШ} < 4,00; \\ (Q_{АЛЧШ} - [Q_{АЛЧШ}]) \cdot 13 + 86, \text{ якщо } 4,00 \leq Q_{АЛЧШ} < 5; \\ 100, \text{ якщо } Q_{АЛЧШ} = 5. \end{cases} \quad (5)$$

Тут $[Q_{АЛЧШ}]$ – ціла частка оцінки за апроксимованою логарифмічною чотирибальною шкалою.

Відмітимо особливості гібридної моделі, пов'язану з РСШ, точніше, з її назвою. Для числових шкал порядку назва визначається кількістю використовуваних позначок: у РСШ їх 101: 0, 1, 2, ..., 99, 100. Тобто шкала ця стооднобальна; двобальна шкала q з ноніусом 1/100 співпадає з нею по точках – оцінка 100 балів у РСШ відповідає значенню $q = 1$ і її умовно можна вважати за бонус для відмінника.

Відмітимо також, що розрізнявальна здатність числових шкал гібридної моделі визначається абсолютною похибкою Δ подання результатів оцінювання СН і не перевищує величини поділки з урахуванням ноніусів 1/100 для УЧШ і 1/20, 1/10, 1/10 відповідно для інтервалів 2-3, 3-4, 4-5 АЛЧШ (як на рис. 8). Невизначеність результатів можна характеризувати приведеною похибкою δ – відношенням абсолютної похибки Δ до довжини шкали L. В табл.1 наведені значення цих показників.

Таблиця 1 – Характеристики шкал гібридної моделі

Шкали	q	УЧШ	АЛЧШ			РСШ
Δ	0,01	0,01	0,05	0,1	0,1	1
δ	0,01/1	0,01/300	0,05/57	0,1/29	0,1/13	1/100

Очевидно, що при поданні рейтингового списку особі, що приймає рішення, перевагу слід віддати удосконаленій чотирибальній шкалі.

Введена до розгляду модель дозволяє реалізувати метод оцінювання рівня навченості суб'єкта навчання як послідовність таких кроків:

- оцінюють частку q повернутої СН інформації або розраховують усереднені оцінки в традиційній чотирибальній шкалі (із залишенням двох знаків після коми) або в УЧШ для конкретних навчальної дисципліни, блоків змістових модулів, змістових або кредитних модулів (КМ), галузі знань як сукупності навчальних дисциплін навчального плану. Зауважимо, що усереднювати оцінки за АЛЧШ неприпустимо через логарифмічний характер самої

шкали. Відоме правило, що логарифм суми для АЛЧШ $q = 0,605 \rightarrow Q_{сер} = 3,05$ (табл. 2) не дорівнює сумі логарифмів $q = 0,5 \rightarrow Q_{АЛЧШ} = 2,87$ (див. рис. 8);

- виражають отримані оцінки у визначеній шкалі;

- розраховують (при необхідності) інтегральний показник (метрику) у вигляді модифікованого коефіцієнта конкордації або коефіцієнта відповідності для кожного з суб'єктів навчання з метою побудови їх ранжируваного списку, або ранжують їх за взірцем (типу «круглий відмінник»). Усі три методи оброблення оцінок, як показує багаторічний досвід їх застосування, інваріантні, тобто дають практично однаковий результат [17].

Таблиця 2 – Оцінки за АЛЧШ

$Q_{АЛЧШ}$	2	3	4	5	Σq	$\Sigma q/4$	$Q_{сер}$
q	0	0,57	0,86	0,99	2,42	0,605	3,05

На рис. 9 наведено фрагмент Excel-таблиці результатів оцінювання в УЧШ успішності відпрацьовування групових, практичних, лабораторних, контрольних занять і в цілому за семестр.

На рис. 10 наведено фрагмент Excel-таблиці підсумкових результатів оцінювання успішності СН в УЧШ за кредитними модулями (КМ) та семестрами і в цілому за навчальну дисципліну як середнє та в РСШ і ECTS. Рейтинговий список суб'єктів навчання відповідає стовпцю Excel-таблиці РАНГ.

Умовами застосування розглянутого методу мають бути:

- наявність специфікацій шкал – прийнятих за домовленістю документів, що містять визначення шкал вимірювань та/або опис правил і процедур їх відтворення та застосування;

- кваліфікація і неупередженість експертів-викладачів; відсутність змови і, бажано, анонімність проміжних результатів.

семестр 2	31 01 11	04 02 11	11 02 11	09 03 11	22 03 11	31 03 11		Сер	РСШ	ECTS	РАНГ
1 Б ... к	2,83	5,00	3,00	4,66	2,08	5,00	3,85	4,14	72	D	3
2 Г ... о		3,00						2,57	19	F	25
3 З ... ін	2,83	4,66	4,00	5,00	2,25	5,00	3,85	4,37	79	C	5
4 І ... о	2,67	5,00	5,00	3,66	2,29	4,66	3,85	4,19	73	D	4
5 К ... н		4,00	4,00		2,08	4,66	3,85	3,34	44	FX	22
...				...			...				
24 Ш ... к	2,50	3,00	3,00	4,66	3,00	5,00	3,39	3,76	58	E	13
25 Ш ... а	2,41	4,66	5,00	5,00	2,08	5,00	3,85	4,53	83	C	6

Рис. 9. Фрагмент Excel-таблиці результатів поточного контролю успішності СН

ИТОГ	км1	км2	км3	км4	сем-1	сем-2	сем-3	Сер	РСШ	ECTS	РАНГ
1 Б ... к	4,21	4,33	4,00	4,66	4,00	4,14	4,32	4,24	73	D	4
2 Г ... о	3,83	2,00	2,00	2,00	2,75	3,00	3,53	2,73	24	F	25
3 З ... н	4,19	4,66	4,33	4,05	4,33	4,37	4,80	4,39	79	C	5
4 І ... о	4,19	4,00	5,00	4,43	4,00	4,19	4,80	4,37	78	C	6
5 К ... н	3,54	3,69	3,33	3,14	3,66	3,34	3,69	3,48	49	FX	21
...				...							
23 Ш ... к	3,15	4,13	3,66	4,33	3,66	3,76	3,69	3,77	58	E	12
24 Ш ... а	4,18	4,66	5,00	4,33	4,55	4,53	4,66	4,56	84	C	8

Рис. 10. Фрагмент Excel-таблиці підсумкових результатів контролю успішності СН

3. Висновки

Таким чином, мета статті досягнута: запропоновано метод оцінювання рівня навченості суб'єктів навчання, простий і зручний у використанні широким колом освітян. Він передбачає застосування різних шкал педагогічної кваліметрії та звичних прийомів оброблення даних

оцінювання, навіть без наявності спеціальних програмних засобів.

Практичне застосування методу показало його придатність для експертного оцінювання знань, умінь та навичок суб'єктів навчання та побудови їх рейтингових списків з достатньою роздільною здатністю.

Список літератури

1. Козлов В.Є., Козлов Ю.В., Дубровіна Л.В. Модель і метод оцінювання рівня навченості суб'єкта навчання// Технологічні інновації та їхній вплив на сучасний світ: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф./ Міжнар. центр технол. інновацій. (Харків, 18 січня 2024 р). Research Europe, 2024. 80 с. – С. 9-13.
2. Ганич Д.І., Олійник І.С. Російсько-український словник. Київ, 1979. 1012 с.
3. Дегтярьов О.В., Дубровіна В.В., Козлов В.Є., Козлов Ю.В. Загальна теорія вимірювань як основа експертного оцінювання// Системи обробки інформації. 2015. Вип. 10(135). С. 178–181.
4. Освітній інтернет-навігатор. URL: <https://oin.in.ua/pedahohichna-kvalimetriya>.
5. Психолого-педагогічна кваліметрія в оцінці якості освіти. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e45aa890-7090-4b1e-a423-61fc273f23b6/content>
6. Козлов В.Є., Козлов Ю.В. Метод вирішення завдань педагогічної кваліметрії// 36. наук. праць Нац. акад. НГ України. 2018. Вип. 2(32). С. 34–39.
7. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests. Copenhagen: Danish Institution for Educational Research, 1960.
8. Стандарти освітнього та психологічного тестування. URL: https://www.aera.net/Portals/38/1999%20Standards_revised.pdf
9. Козлов В.Є., Козлов Ю.В. Оцінювання рівня навченості суб'єкта навчання// Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку. 36. тез доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. 15 березня 2023 року. Харків, 2023. С. 59–61.
10. Радіоелектронні системи: навч. посіб./ Баранов П.Ю., Лавриненко В.П., Мелешкевич О.М., Дмитренко В.С. Одеса: ОНАЗ, 2014. 232 с. URL: http://univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod.pdf
11. Система оцінювання знань. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Системи_оцінювання_знань
12. Метрологія та вимірювальна техніка/ Поліщук Є.С. та ін. Львів: Вид-во Львів. політехніка, 2012. 544 с.
13. Козлов В.Є., Оленченко В.Т., Юзьков І.О. Модель подання оцінних функцій викладача// Системи обробки інформації. 2009. Вип. 6(80). С. 233–236.
14. Для вимірювань потрібна шкала. HiT: 11.04.1998. URL: <https://n-t.ru/tp/iz/nsh.pdf>
15. Американська система оцінювання. URL: <https://www.englishdom.com.ua/blog/amerikanska-sistema-ocinyuvannya-v-shkolax/>
16. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Желдак Т.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 387 с.

17. Козлов Ю.В., Дубровіна Л.В. Встановлення відповідності оцінок педагогічної кваліметрії, отриманих за різними шкалами// Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 80): матеріали Міжнар. наук. інтернет-конф. (м. Тернопіль, Україна, м. Ополь, Польща, 19-20 вересня 2023 р.). Тернопіль: ФОП Шпак В.Б., 2023. С. 47–49.

18. Valentyn Kozlov, Yury Kozlov, Inna Moshchenko, Olena Novykova, Victor Olenchenko. Implementation information technology of competency assessment method of professional activity of the educational system employee// Advanced Information Systems. 2021. Т. 5, № 3. С. 142–150.

Надійшла (Received) 12.08.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Козлов Юрій – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: yurii.kozlov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6165-4978>

Kozlov Yurii – PhD, Associate Professor of IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: yurii.kozlov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6165-4978>

Дегтярьов Олександр – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: oleksandr.degtyarov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-00002-3187-1621>

Degtyarev Oleksandr – PhD, Associate Professor of IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: oleksandr.degtyarov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-00002-3187-1621>

Василющенко Ліна – магістрант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: lina.dubrovina@nure.ua

Vasilyushchenko Lina – master's student of IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: lina.dubrovina@nure.ua

Унгер Віктор – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: viktor.unher@nure.ua

Unger Victor – postgraduate student of IMT Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: viktor.unher@nure.ua

Method for assessing the training of the subject of study

Yurii Kozlov, Oleksandr Degtyarev, Lina Vasilyushchenko, Viktor Unger

Abstract

A variant of the method for solving one of the problems of pedagogical qualimetry is considered, the essence of which lies in the use of an assessment model in the form of a set of a four-point scale of the order of several varieties, a two-point scale, a rating hundred-point scale and the corresponding ECTS scale, which allows comparing the grades obtained on any of these scales and applying them to assess the level of preparedness of subjects of study for a certain type of professional activity.

Key words: qualimetry, assessment procedure, subject of study, assessment scales.

**Метрологія
та прилади**

**Metrology
and Instruments**

Науково-практичний журнал
2024, № 1

ISSN 2307-2180 (print)
ISSN 2663-9564 (online)

Відповідальний за випуск *О. В. Дегтярьов*
Комп'ютерна верстка *К. І. Кохно*

Ідентифікатор медіа R30-04584 згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 23.05.2024 № 1772

Адреса редакції: Харківський Національний університет радіоелектроніки
Кафедра IBT, пр. Науки, 14, 61166, м. Харків, Україна, тел. + 38 (057) 702-13-31