

Науково-практичний журнал

МЕТРОЛОГІЯ ТА ПРИЛАДИ

2/2024

Metrology and Instruments

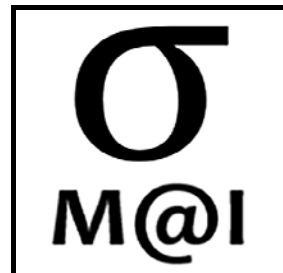


ISSN (print) 2307-2180
ISSN (online) 2663-9564



Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National University
of Radio Electronics



Метрологія та прилади

Metrology and Instruments

2024, № 2

2024, No. 2

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 № 11/3).

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, Гейтсберґ, 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*);
ПЕННЕККІ 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*);
ТРИЩ Роман Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ФОРБС Алістер
(*магістр, Теддінґтон, 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 PENNECCHI
(*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

ЗАГАЛЬНА МЕТРОЛОГІЯ

- Мілушев Георгій*
Джерела невизначеності результату вимірювань як елемент вимірювального процесу (eng.) 5
- Кошовий М.Д., Кураксін Д.В.*
Дослідження методу бджолиних колоній при оптимізації планів багатofакторних експериментів 9
- Середюк О.Є., Труфан М.М.*
Дослідження практичних аспектів використання мультиагентних систем в інформаційно-вимірювальних технологіях 13
- Коробко А.І., Костовський О.А., Суржко К.А.*
Новий підхід до встановлення нормативного значення характеристик властивостей об'єкта випробувань 18

ВИМІРЮВАННЯ

- Боцюра О.А., Задорожна І.М., Захаров І.П.*
Оцінювання невизначеності вимірювань координат об'єкту далекомірно-кутовим методом на площині (eng.) 23
- Юрченко О.І., Шевченко І.Р., Бакланова Л.В., Черножук Т.В., Бакланов О.М.*
Іонометричне визначення фторид-іонів у водах і розчинах кухонної солі з використанням ультразвуку..... 27
- Хорошайло Ю.Є., Сезонова І.К., Дегтярьов О.В., Корбетький М.В., Білецький П.М.*
Дослідження можливостей використання електронної колориметрії в медицині 32
- Криницький О.С., Рибчин Б.Р.*
Дослідження приладового забезпечення оцінювання якості електричної енергії 39

КВАЛІМЕТРІЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

- Микийчук М.М., Рудик Ю.І., Христин В.П., Андрієць В.В., Бондар Д.Ю., Ромашикін Д.Д.*
Кваліметричний метод оцінювання процесів системи управління якістю підприємства..... 44
- Ніколова Олена, Кунов Светослав.*
Аналіз результатів схем перевірки кваліфікації метрологічних лабораторій Козлодуйської АЕС шляхом міжлабораторного порівняння (eng.)..... 50

T A B L E O F C O N T E N T S

GENERAL METROLOGY

- Milushev George*
The sources of uncertainty of the measurement result as elements of measurement process 5
- Koshovyi M.D., Kuraksin D.V.*
Study of the bee colony method in optimizing plans of multifactor experiments 9
- Serediuk O.Y., Trufan M.M.*
Research on the practical aspects of using multi-agent systems in information and measurement technology 13
- Korobko A.I., Kostovski O.A., Surzhko K.A.*
A new approach to establishing normative values of characteristics of the test object properties 18

MEASUREMENT

- Botsiura O.A., Zadorozhna I.M., Zakharov I.P.*
Measurement uncertainty evaluation of object planimetric coordinates using the rho-theta method..... 23
- Yurchenko O.I., Shevchenko I.R., Baklanova L.V., Chernozhuk T.V., Baklanov O.M.*
Ionometric determination of fluoride ions in water and solutions of table salt using ultrasound..... 27
- Khoroshailo Yu.E., Sezonova I.K., Degtiarov O.V., Korbetskiy M.V., Biletskiy P.M.*
Research on the possibilities of using colorimetry in medicine 32
- Krynytskyi Oleksandr, Rybchyn Bohdan*
Research on instrumentation for electrical power quality assessment 39

QUALIMETRY AND QUALITY ASSURANCE

- Mykyuchuk M.M., Rudyk Yu.I., Khrystich V.P., Andriets V.V., Bondar D.Yu., Romashkin D.D.*
Qualimetric method of evaluation of processes of the quality management system of enterprise 44
- Nikolova Elena, Kunov Svetoslav.*
Analysis of the results of proficiency testing schemes of Kozloduy NPP metrological laboratories through interlaboratory comparison 50

Моценко І.О., Запорожець О.В.

Технологія впровадження моделі управління якістю Lean Six Sigma у вищих навчальних закладах.

Частина 2: Аналіз невідповідностей, вдосконалення навчального процесу та контроль сталості покращень (eng.)56

Moshchenko I.O., Zaporozhets O.V.

Technology for implementing the Lean Six Sigma quality management model in higher education institutions. Part 2: Inconsistencies analysis,

educational process improvement and control of improvements sustainability 56



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

THE SOURCES OF UNCERTAINTY OF THE MEASUREMENT RESULT AS ELEMENTS OF THE MEASUREMENT PROCESS

Milushev G.S.

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract

Research objective – to facilitate the detection and determination of the contributing components associated with the sources of uncertainty in measurements across the full range of aspects of calibration, testing and inspection and process control. In the paper, based on the concept of the duality of measurement process – measurement result, the five elements of the measurement process were divided and classified as base sources of uncertainty. Some relations with other references with more or less structured classifications of the sources of measurement uncertainty are exemplified. The scientific contribution is the application of a universal approach to determine the sources of uncertainty before empirical or experimental assessment of their contribution. As a result of the study the initial analysis of the sources of uncertainty is unified and simplified by asking the question of the contribution to the measurement uncertainty of each of the well-defined and universal five element of the measurement process.

Keywords: measurement, process, result, uncertainty, sources of uncertainty in measurements

1. Introduction

A fundamental issue in measurement, and especially in calibration, is the correct estimation of uncertainty, which is possible by accounting for the contributions of all its significant components. While uncertainty evaluation methods are well analyzed, developed and described [1-9], the detection and determination of the contributing components associated with the sources of uncertainty remains within the realm of the metrologist's empirical expertise.

In the paper “A Concept of Measurement Process-Result Duality in the Context of Measurement Uncertainty” [10] was explained the duality of the measurement process – measurements results. The main presented idea there is that the result is not an element of the measurement process because it is a product the process. This concept opposes some other classifications where the result is considered as a component of the process [11]. Based on this concept, we can classify and separate the elements of the measurement process and the elements of the measurement results.

In the paper [10], after analysis of well-known sources [2-7, 12-17], the five elements of the measurement process are specified as follow:

- measurement object;
- measurement method;
- measuring instrument;
- measurement subject;
- influence factors.

According VIM [12] §2.9 NOTE 2 “A *measurement result* is generally expressed as a single *measured quantity value* and a *measurement uncertainty*”.

Therefore, the elements of the measurement results are:

- measured quantity value;
- measurement uncertainty.

From its own side VIM [12] §1.19 the quantity value consists “*value number and reference*”. For completeness, we note that uncertainty is also expressed by value number and dimension.

As emphasized in [1] “*The errors characterize the measurement process*”. The analysis [10] of the elements of the measurement process define the respective errors. Consequently, the sources of uncertainty can be specified by considering un-excluded errors in the measurement process as the cause of measurement uncertainty.

The primary sources of the components of uncertainty are related with the elements of the measurement process [10].

The purpose of this report is to specify and detail essential components of the uncertainty inherent in the individual elements of the measurement process.

2. Object and subject of the measurement process

Talking about the measurement process, adhering to VIM [12], instead of quantity is preferably usage of the term “*measurand*” where in § 2.3 it is defined as a “*quantity intended to be measured*”. Considering the most abstract definition according NOTE 3 to the same paragraph (2.3) of VIM [12] here the measurand is named OBJECT of the measurement.

Considering the measurement process as an abstract process it is an interaction between the OBJECT and the SUBJECT of the process (Fig. 1). In the measurement case, the SUBJECT of the measurement process could be an operator, device, controller, algorithm or any subject who is using the measurement result.

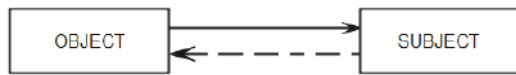


Fig. 1. Interaction between the object and the subject the measurement proces

The interaction in the process is always both ways, even often in the measurements the influence of the SUBJECT over the OBJECT is negligible.

The measurement is a quantitative process. Before obtaining the digital values of the quantities (of the OBJECT), the SUBJECT shall pass the qualification of the OBJECT. That means the SUBJECT has an a priori imagination about the OBJECT before measurements. This a priori imagination is related with the identification of the OBJECT and its classification to a group of OBJECTS.

The a priori imagination for the object is named a “Model” of the OBJECT [18, 19]. The model, more or less adequate to the OBJECT qualifies it to a group of objects having the same quantity or set of quantities (in the most sophisticated cases), possible to be measured.

3. Measurement method and measuring instrument

The interaction between the OBJECT and the SUBJECT always happens according to any METHOD, named measurement METHOD (Fig. 2). VIM [12] § 2.5 says “measurement method” or “method of measurement” is a “generic description of a logical organization of operations used in a measurement”.

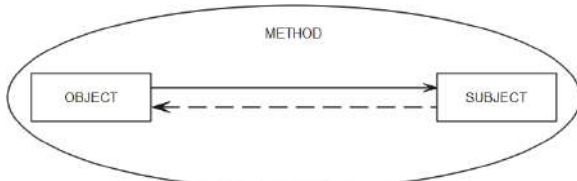


Fig. 2. Interaction between the object and the subject according a method of measurement

The METHOD is based on the key principles [2, 7, 12] of interaction between the OBJECT and the SUBJECT of the measurement process. All qualifications of the OBJECT shall be considered in the METHOD of measurement. So, some authors unreasonably refer the model of the OBJECT to the description of the METHOD [11]. In this case VIM [12] with the NOTE to § 2.5 is definitely clear.

The interaction between the OBJECT and the SUBJECT according to the chosen METHOD is realized with measurement tool/s named MEASURING INSTRUMENT/s (Fig. 3).

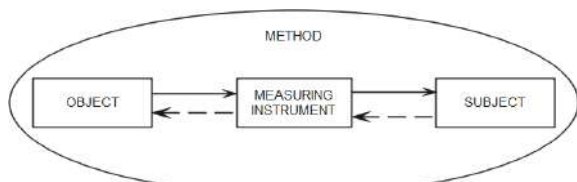


Fig. 3. Measuring instrument in the process of interaction between the object and the subject according to the measurement method

The definition for MEASURING INSTRUMENT in VIM [12] § 3.1 is a “device used for making measurements, alone or in conjunction with one or more supplementary devices”. As much complex is the device (instrument), as more the measurement METHOD is built into its action. In some cases, the realization of the measurement method needs several simple devices. In other cases, the METHOD requires just one complex device. Than METHOD is implemented in the device (Fig. 4).

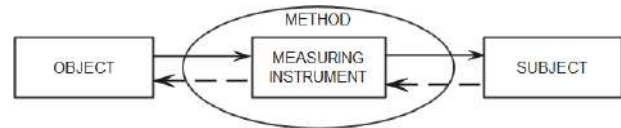


Fig. 4. Realization of the measurement method in the process with a complex measuring instrument (measuring system according VIM)

Such complex devices, often used in on-site measurements, in VIM [12] are named “measuring systems” with a respective definition in § 3.2. To simplify the exposition here is used the name MEASURING INSTRUMENT only.

4. Influence factors

The INFLUENCE FACTORS are circumstances and respective quantities, which deviation affects the measurement result. VIM [12] § 2.52 is talking about “influence quantities” with a definition: “quantity that, in a direct measurement, does not affect the quantity that is actually measured, but affects the relation between the indication and the measurement result”. The exposition here prefers the GUM’s definition for “influence quantity” as a “quantity that is not the measurand but that affects the result of the measurement” [2]. In this way the INFLUENCE FACTORS impact over the MEASURING INSTRUMENT, over the OBJECT of measurement, and could influence over the SUBJECT (Fig. 5).

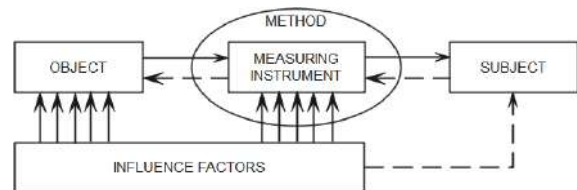


Fig 5. Impact of the influence factors over the object, measuring instrument and subject of the measurement process

5. The elements of the measurement process

The specified five elements of the measurement process: OBJECT, SUBJECT, METHOD, MEASURING INSTRUMENT and INFLUENCE FACTORS exist and can be analyzed in all cases of measurement processes.

For example, in calibration (Fig. 6), the OBJECT is the device being tested (most popular as device under test – DUT or unit under test UUT), the MEASURING INSTRUMENT is the reference tool (calibrator, reference

measure etc.) and the SUBJECT is an operator.

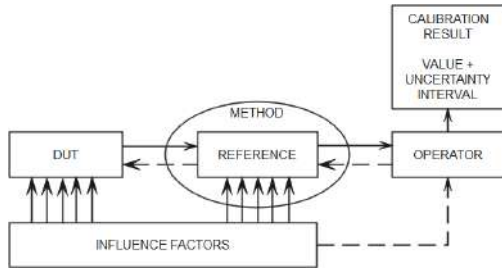


Fig. 6. Measurement process and its elements in calibration

The result in calibration is a value and inherent uncertainty for each calibration point.

In testing and inspections we add a NORM to compare with the indication of the MEASURING INSTRUMENT. The elements of the measurement process are the same.

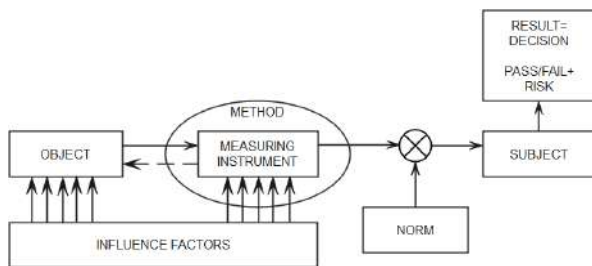


Fig. 7. Measurement process and its elements in testing and inspection

In this case, the result is a decision from the type PASS/FAIL and the measurement uncertainty reflects on the risk type α or β .

In case of control of a process, the result from the measurement process is used to form an IMPACT over the OBJECT.

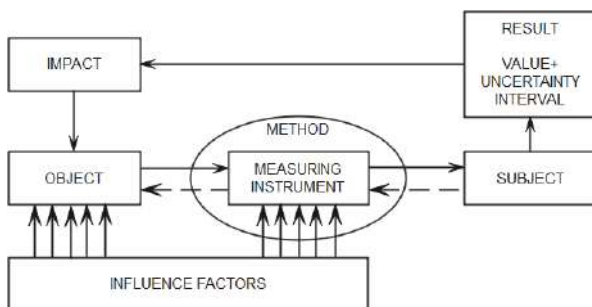


Fig. 8. Measurement process and its elements in control of a process

The uncertainty of the result here reflects on stability of the control and often leads to inaccurate process stabilization.

6. How the GUM sources correspond to the elements of the measurement process?

Let briefly make a correspondence between mentioned above GUM's [2] sources and the elements of the measurement process:

- a) incomplete definition of the measurand – **Inadequacy of the model;**
- b) imperfect realisation of the definition of the measurand – **Inadequacy of the model;**
- c) non representative sampling — the sample measured may not represent the defined measurand – **Subject;**
- d) inadequate knowledge of the effects of environmental conditions on the measurement or imperfect measurement of environmental conditions – **Influence Factors;**
- e) personal bias in reading analogue instruments – **Instrument;**
- f) finite instrument resolution or discrimination threshold – **Method;**
- g) inexact values of measurement standards and reference materials – **Instrument;**
- h) inexact values of constants and other parameters obtained from external sources and used in the data-reduction algorithm – **Inadequacy of the model;**
- i) approximations and assumptions incorporated in the measurement method and procedure – **Method;**
- j) variations in repeated observations of the measurand under apparently identical conditions – **Influence Factors.**

7. Conclusion

The sources of uncertainty are defined in the measurement process. These fractions of uncertainty form the combined uncertainty and finally expressed in measurement result via expanded uncertainty.

Each specific source of uncertainty refers to the respective element of the measurement process. It is much easy for the metrologists, to start analysis of the sources of uncertainty with the well specified and universal five element of the measurement process: **Object, Method, Measuring instrument, Subject and Influence factors.**

Then the analysis could be deeper with the specific appearance of the factors of each element.

The approach of this concept is universal for all types of measurements on the stage of determining the uncertainties.

References

1. Radev H. et al., Metrology and Measuring Technique, Volume 1, Ed. 2, Softtrade, 2012.
2. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement." First edition 2008. Corrected version 2010, BIPM.

3. EA-4/02 M: 2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
4. K. Birch, Measurement Good Practice Guide No. 36 “Estimating Uncertainties in Testing”, NPL Crown Copyright 2001, Reprinted with minor amendments March 2003, ISSN 1368-6550
5. S. Bell, Measurement Good Practice Guide No. 11 “The Beginner’s Guide to Uncertainty of Measurement”, NPL Crown Copyright 1999, Issue 2 with amendments March 2001, ISSN 1368-6550.
6. R. Hogan Blog <https://www.isobudgets.com/8-sources-of-uncertainty-in-measurement-for-every-uncertainty-budget/>, accessed on 05.07.2021
7. JCGM GUM-6:2020 “Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models” First edition 2020, BIPM.
8. Zakharov I.P., Vodotyka S.V., Shevchenko E.N. Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration // Measurement Techniques, Vol. 54, No. 4, 2011, p. 387-399.
9. Zakharov I.P. Measurement uncertainty: general approaches to uncertainty budget construction // Ukrainian Metrological Journal, 2004, №2, pp. 10-15.
10. Milushev, G. M., 2021, A Concept of Measurement Process-Result Duality in the Context of Measurement Uncertainty, 2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), pp. 1-4.
11. N. Kolev, P. Chaushev, V. Gavrailov, “Fundamentals on metrological assurance”, DI Tehnika Sofia, 1982.
12. ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).
13. J. R. Taylor, “An Introduction to Error Analysis”, University Science Books, Sausalito, California, Second Edition, 1997 ISBN 0-935702-42-3, p. 3-11.
14. A. S. Morris and Reza Langari, “Measurement and Instrumentation”, 2012 Elsevier Inc. USA, ISBN: 978-0-12-381960-4, pp. 40-94.
15. R.H.Dieck, “Measurement Uncertainty: Methods and Applications”, ISA 2007, Fourth Edition, ISBN 13:978-1-55617-915-0, pp.40-42.
16. NASA Handbook 8739.19-3, “Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods”, NASA, Washington, 2010 pp.19-57.
17. P. Fornasini, “The Uncertainty in Physical Measurements”, Springer 2008, ISBN 978-0-387-78649-0, p.p. 45-78
18. R. Willink, “Measurement Uncertainty and Probability”, Cambridge University Press 2013, ISBN 978-1-107-02193-8, pp. 7-20
19. A.E.Fridman, “The Quality of Measurements”, Translation, Springer 2012, ISBN 978-1-1614-1477-3, pp. 55-71.

Надійшла (Received) 27.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 15.11.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Милушев Георгій Сашов – к.т.н., доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Технічний університет Софія, м. Софія, Болгарія; e-mail: gm@tu-sofia.bg, ORCID: 0000-0002-8510-3257.
Milushev George Sashov – PhD, Assoc. professor, Head of department “Information and Measurement Technology” of Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria; e-mail: gm@tu-sofia.bg, ORCID: 0000-0002-8510-3257.

Джерела невизначеності результату вимірювання як елементи вимірювального процесу

Г.С. Мілушев

Abstract

Мета дослідження – полегшити виявлення та визначення складових компонентів, пов’язаних із джерелами невизначеності у вимірюваннях по всьому діапазону аспектів калібрування, тестування та контролю, а також управління технологічним процесом. У статті на основі концепції подвійності: процес вимірювань – результат вимірювань, як основні джерела невизначеності розділені та класифіковані п’ять елементів процесу вимірювання (об’єкт вимірювання; метод вимірювання; вимірювальний прилад; предмет вимірювання; впливаючі фактори). Розглядаються особливості процесу вимірювання та його елементів при калібруванні, випробуванні, верифікації та керуванні процесом. Як приклади наведені деякі зв’язки з іншими посиланнями з більш менш структурованими класифікаціями джерел невизначеності вимірювань. Наводяться відповідність джерел невизначеності, які перелічені в Настанові з оцінювання невизначеності вимірювань, елементам вимірювального процесу. Науковий внесок – це застосування універсального підходу до визначення джерел невизначеності перед емпіричною чи експериментальною оцінкою їхнього вкладу. В результаті дослідження початковий аналіз джерел невизначеності уніфікований та спрощений за рахунок постановки питання про внесок у невизначеність вимірювань кожного з чітко визначених та універсальних п’яти елементів процесу вимірювань.

Ключові слова: вимірювання, процес, результат, невизначеність, джерела невизначеності вимірювань

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ БДЖОЛИНИХ КОЛОНІЙ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

М.Д. Кошовий, Д.В. Кураксін

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

Анотація

Статтю присвячено вивченню ефективності методу бджолиних сімей у контексті оптимізації планів багатофакторних дослідів. Наведені приклади ефективності методу бджолиної колонії при оптимізації багатофакторних експериментів в порівнянні з іншими методами оптимізації. У цій статті наголошено на використанні методу бджолиних колоній як ефективного засобу оптимізації планів багатофакторних експериментів.

У статті детально розглядається алгоритм бджолиних колоній, його схема та реалізація у вигляді програми на мові програмування C#. Автори приводять специфічні приклади застосування алгоритму у різних сферах, таких як, вихрострумний перетворювач, дослідження процесу вимірювання щільності струму гальванічних ван та аналіз ділянки верстатобудівного цеху з числовим програмним керуванням.

Стаття розглядає продуктивність методу бджолиних колоній при багатьох факторах експерименту, зокрема при збільшенні їх кількості. Автори роблять огляд точності результатів та підкреслюють значення уважного вибору параметрів та необхідності високої потужності комп'ютера для досягнення оптимальних результатів у наукових дослідженнях. Ця стаття буде корисним інструментом для вчених і практиків, що шукають спосіб покращити результати багатофакторних експериментів у різних галузях науки і промисловості.

Ключові слова: метод бджолиних колоній, дослідження, експеримент, програмування, параметри, оптимізація, вартість.

1. Вступ

Із зростанням цін на ресурси та товари важливість оптимізації виробничих процесів стає все актуальнішою. Кожен бізнес прагне залишатися конкурентним, скоротити витрати і виробничу цінність, збільшити продуктивність і ефективність. Це означає оптимальне здійснення кожного кроку у виробництві, від постановки завдань до випуску готової продукції. Отже, важливість оптимізації часу та ресурсів належить до основних у дослідженні багатофакторних експериментів у сфері виробництва.

Це також призводить до потреби знаходження найбільш ефективного способу оптимізації планів багатофакторних експериментів [1-3]. Ми досліджуємо процес удосконалення планів багатофакторних експериментів з урахуванням витрат часу й коштів. Досліджується метод використання бджолиної колонії для оптимізації витрат часу та коштів у планах багатофакторних експериментів та відповідне програмне забезпечення для цього. Нашою основною метою є створення методу бджолиних колоній і відповідного програмного забезпечення, його впровадження для аналізу технологічних процесів та оцінка його результативності.

На даний момент існує велика різноманітність способів оптимізації планів багатофакторних експериментів. Для покращення цих планів можна використовувати алгоритми, згадані в дослідженнях [4-6]. Кожен з цих підходів має свої переваги й недоліки, а також власну специфіку використання. Більшість методів, які використовуються для пошуку наближення оптимальної матриці планування, зазнають проблеми з погіршенням точності рішення та збільшенням часу та обчислювальної потужності при збільшенні числа факторів.

Таким чином, потрібно створити метод, який дозволить працювати з більшою кількістю факторів, отримувати оптимальний план експерименту швидше та з меншими обчислювальними витратами. У цьому зв'язку розглядається можливість застосування методу бджолиної колонії.

2. Мета статті

У сучасному світі багатофакторні експерименти схильні до збільшення кількості факторів, отже необхідна автоматизація та оптимізація. Збільшення кількості факторів може призвести до збільшення ймовірності похибки, тому необхідно розробити алгоритм, який при великій кількості факторів зможе знайти рішення при найменшій ймовірності похибки. Отже, планується створити метод оптимізації бджолиних колоній для покращення планів багатофакторних експериментів.

3. Виклад основного матеріалу

Алгоритм методу бджолиної колонії використовується для розв'язання задач оптимізації та може бути реалізований наступними кроками.

Ініціалізація.

Крок 1.

Створення бджолиної колонії з кількістю бджіл та іншими параметрами (кількість ітерацій, кількість бджіл в кожній ітерації та кількість сусідів).

Крок 2.

Розміщення бджіл у сталих позиціях відповідно до задачі.

Цикл ітерацій. Для кожної ітерації (покоління) колонії виконуються наступні кроки.

Крок 3.

Переміщення бджіл. Усі бджоли обирають наступний крок на основі випадкової генерації. Після розрахунку знаходиться найкоротший та/або найдешевший перехід і запам'ятовується.

Крок 4.

Точка старту усіх бджіл переміщується на тільки що знайдений перехід та повторюється Крок 3.

Крок 5.

Завершення ітерації та оцінка розв'язку. Ітерація вважається завершеною в тому випадку, коли бджоли пройшли усі рядки матриці. По завершенню зберігається результат, який показує вартість або час виконання плану експерименту.

Цикл порівняння.

Крок 6. Вибір кращого розв'язку. Обрання найкращого розв'язку, знайденого протягом усіх ітерацій.

Крок 7. Завершення. Повернення знайденого оптимального шляху або розв'язку.

Розроблено програмне забезпечення, що реалізує метод синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту методом бджолоїної колонії. Мова програмування – C#.

Прорахунки виконувалися на комп'ютері з процесором Intel Core i3- 3110M з частотою 2.40 GHz.

Для розрахунку прикладів будуть використовуватись наступні параметри програми:

- кількість бджіл 230;
- кількість ітерацій 500;
- кількість сусідів 5.

Схему роботи алгоритму бджолоїної колонії зображено на рис.1.

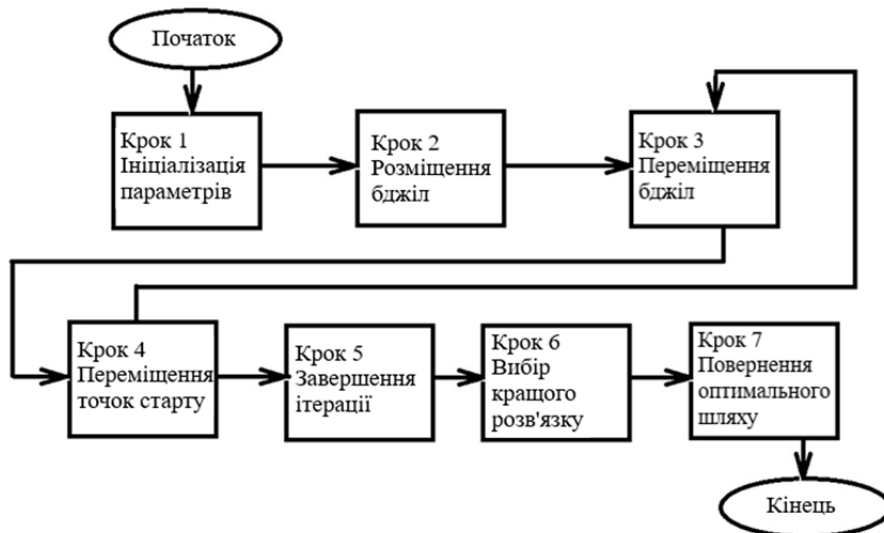


Рис. 1. Спрощена схема роботи алгоритму бджолоїної колонії

Результати оптимізації. Для прикладу була проведена оптимізація планів багатофакторних експериментів для різних об'єктів.

Приклад 1. Вихрострумний перетворювач

Для вихрострумного перетворювача було оптимізовано початковий план багатофакторного експерименту, дані зведені у рис. 2.

Вирішення було знайдено за 50 секунд.

Приклад 2. Дослідження процесу вимірювання щільності струму гальванічних ван

Оптимізацію початкового плану експерименту при дослідженні процесу вимірювання щільності струму гальванічних ван мірними датчиками проведено за критерієм сумарної вартості проведення. Дані зведені у рис. 3.

На розрахунок знадобилося 126 секунд.

Приклад 3. Дослідження ділянки верстатобудівного цеху з числовим програмним управлінням.

В якості критерію оптимізації було обрано загальний час роботи верстатів з числовим програмним управлінням. Час реалізації плану наведено на рис. 4.

На вирішення задачі програмі знадобилося 149 секунд.

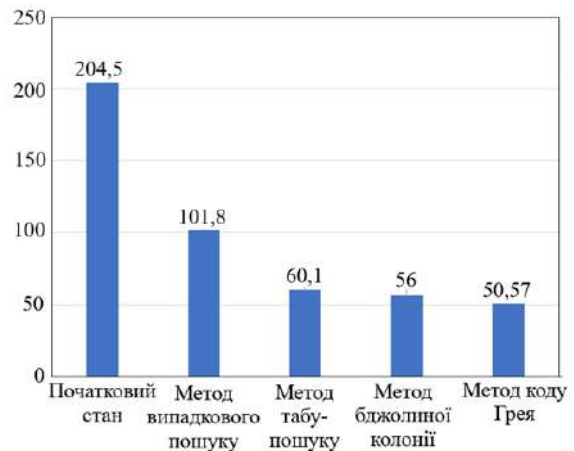


Рис. 2. Вартості (умов.од.) оптимізованих за різними методами планів багатофакторного експерименту для дослідження вихрострумного перетворювача

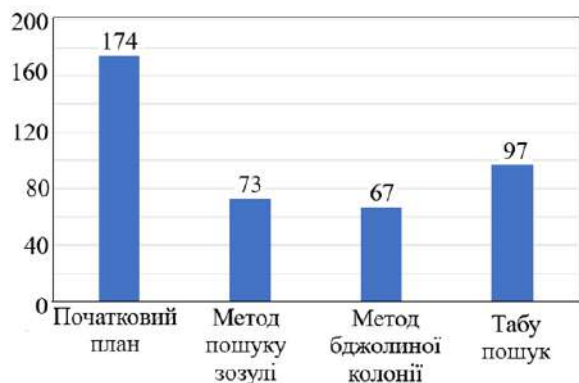


Рис. 3. Вартості (умов.од.) оптимізованих за різними методами планів багатофакторного експерименту для дослідження процесу вимірювання щільності струму гальванічних ван

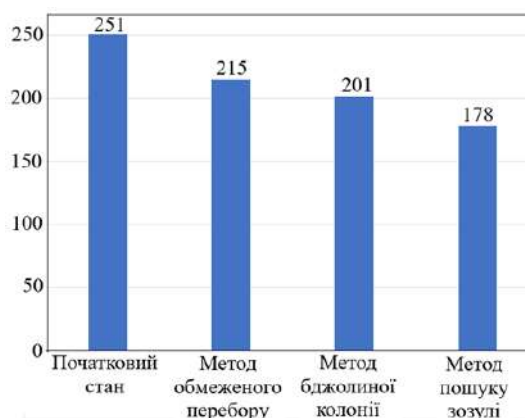


Рис. 4. Часи реалізації (годин) оптимізованих за різними методами планів експерименту для дослідженні ділянки верстатобудівного цеху з числовим програмним управлінням

4. Висновки

З результатів експериментів видно, що метод бджолоїної колонії доволі непогано знаходить оптимальне рішення, в середньому покращення становить 13-17% в кожному з наведених прикладів. Метод бджолоїної колонії витрачає доволі багато

часу на пошук рішення, що може свідчити про необхідність гарної потужності комп'ютера, на якому будуть проводитися розрахунки. Слід зазначити, що якщо підійти до вибору параметрів більш зважено (в залежності від потрібної точності розрахунків), можна скоротити час розрахунку.

Список літератури

1. Кошовий М.Д., Бурлесв О.Л., Пампуха А.І. Аналіз методів оптимального планування багатофакторного експерименту за вартісними та часовими показниками: Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. 2022. №75. С. 94-107.
2. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Pavlyk A.V., Koshevaya I.I., Rozhnova T.G. Research of multiple plans in multi-factors experiments with a minimum number of transitions of levels of factors. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. no2, P.53-59. URL: doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-6.
3. Koshevoy N.D., Muratov V.V., Kirichenko A.L., Borisenko S.A. Application of the "jumping frogs" algorithm for research and optimization of the technological process. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021. no1(1). P. 57 – 65. URL: doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-20.
4. A. Hatamlou, Black hole: A new heuristic optimization approach for data clustering. Information sciences. Khoy. 2013. P. 175–184.
5. M. Yazdani, F. Jolai. Lion optimization algorithm (loa): a nature-inspired metaheuristic algorithm. Journal of computational design and engineering. Tehran. 2016. P. 24–36.
6. Хижняк І. А. Метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегментування багатомасштабної послідовності зображень, що отримані з бортової системи оптико-електронного спостереження. Кібернетика та системний аналіз. 2018. №2(56). С.104–112.

Надійшла (Received) 15.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 18.11.2024

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.

Кураксін Денис – аспірант кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: kuraksin23@gmail.com, ORCID: 0009-0005-0756-0785.

Kuraksin Denys – graduate student of the Department of Intelligent Measuring Systems and Quality Engineering, National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: kuraksin23@gmail.com, ORCID: 0009-0005-0756-0785.

Study of the bee colony method in optimizing plans of multifactor experiments

M.D. Koshovyi, D.V. Kuraksin

Abstract

The article is devoted to the study of the effectiveness of the method of bee colonies in the context of optimization of plans of multivariate experiments. Examples of the effectiveness of the bee colony method in the optimization of multivariate experiments in comparison with other optimization methods are given. This article emphasizes the use of the bee colony method as an effective means of optimizing multivariate experimental designs.

The article discusses in detail the algorithm of bee colonies, its scheme and implementation in the form of a program in the C# programming language. The authors give specific examples of the application of the algorithm in various areas, such as the eddy current converter, the study of the process of measuring the current density of galvanic baths, and the analysis of a section of a machine shop with numerical software control.

The article examines the productivity of the method of bee colonies with many factors of the experiment, in particular with an increase in their number. The authors review the accuracy of the results and emphasize the importance of careful parameter selection and the need for high computer power to achieve optimal results in scientific research. This article will be a useful tool for scientists and practitioners looking for a way to improve the results of multivariate experiments in various fields of science and industry.

Keywords: method of bee colonies, research, experiment, programming, parameters, optimization, cost.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНИХ АСПЕКТІВ ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ В ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

О.Є. Середюк, М.М. Труфан

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

Анотація

Виконаний аналіз концептуальних аспектів побудови мультиагентних систем (MAS). Розглянуто підходи до впровадження MAS. Розроблено MAS на базі централізованої архітектури з широкою автономією інтелектуальних агентів, викладені її переваги. Охарактеризовані особливості практичного застосування розробленого авторами методу подвійного контролю як умови покращення використання MAS.

Ключові слова: інформаційно-вимірвальні технології, мультиагентна система, інтелектуальний агент, штучний інтелект, алгоритми машинного навчання, сенсор

1. Вступ

В останні роки все більшої уваги приділяється концепції мультиагентних систем, Multi-agent system-MAS (англ.), як перспективного підходу до вирішення проблем в інформаційно-вимірвальних технологіях [1]. Суть таких систем полягає в наявності в їх архітектурі множини автономних, інтелектуальних агентів, які взаємодіють один з одним для досягнення спільної мети. Така архітектура дозволяє підвищити гнучкість, адаптивність та масштабованість інформаційно-вимірвальних систем. MAS застосовують при розв'язанні таких проблем, які складно або неможливо вирішити за допомогою одного агента або монолітної інформаційно-вимірвальної системи.

MAS також належать до систем, що самоорганізуються, тому що за їх допомогою знаходять оптимальне розв'язання задачі без зовнішнього втручання. Під оптимальним розв'язанням для нашої задачі розуміється розв'язання, на яке витрачена найменша кількість енергії в умовах обмежених ресурсів.

Головна перевага MAS — це гнучкість, оскільки система може бути доповнена й модифікована без переписування значної частини програми. Також ці системи мають здатність до самовідновлення й мають стійкість до збоїв, завдяки достатньому запасу компонентів і самоорганізації [1].

Однак, впровадження мультиагентних підходів в інформаційно-вимірвальні технології стикається з низкою проблем та викликів. Зокрема, потребують вирішення питання координації і узгодженості дій агентів, забезпечення ефективного обміну даними та знаннями, оптимізації розподілу ресурсів, управління складністю та динамікою процесів. Крім того, існують технічні та методологічні аспекти, пов'язані з архітектурою, алгоритмами, інтерфейсами та інтеграцією мультиагентних систем в інформаційно-вимірвальні технології.

Відомо, що теоретичні корені парадигми MAS знаходять свій початок в теорії відкритих систем,

застосування розподіленого штучного інтелекту (РШІ), а також в загальній теорії складних систем [1,2].

Інтелектуальні системи на основі MAS складаються з множини автономних модулів або програмних агентів та мають такі властивості:

модулі є відносно автономними, мобільними, самодостатніми в живленні, передачі даних та виконанні функцій;

існує взаємозв'язок між агентами, вони здатні обмінюватись інформацією та “ділитись” знаннями для досягнення спільних цілей;

керування агентами може бути як централізованим так і децентралізованим;

доступ до інформаційних джерел, бази даних і бази знань у інтелектуальних агентів автономний і децентралізований;

діяльність агентів переважно асинхронна, хоча і “командна”.

Поведінки інтелектуальних агентів в динамічних і еволюціонуючих системах досліджують за допомогою методів різних наукових дисциплін. Так, теорія прийняття рішень займається найбільш загальними аспектами колективної поведінки агентів; теорія ігор аналізує стани систем, аналогічних до кооперативних ігор, стратегій ведення переговорів; теорія колективної поведінки автоматів досліджує кооперацію та поведінку автоматів з примітивними функціями, спроможних навчатися за допомогою системи штрафів і заохочень, тощо [1].

Теорія MAS походить від теорії відкритих систем, розподіленого штучного інтелекту (РШІ), загальної теорії складних систем. РШІ пов'язаний з аналізом систем, що складаються з окремих незалежних об'єктів, які взаємодіють один з одним, та механізмів їх координації [2].

При аналізі складних систем важливу роль відіграє метод системної динаміки (systems dynamics) який є надзвичайно потужним інструментом для моделювання, аналізу та проектування мультиагентних інформаційно-вимірвальних систем. Він дозволяє враховувати їх складну динамічну природу та забезпечує математичні основи для

ефективного проектування та оптимізації таких систем, оскільки в основі аналізу системної динаміки закладена методологія, що враховує основні взаємозв'язки між елементами системи та часові аспекти її розвитку. Відповідно до принципів системної динаміки в ході моделювання інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи повинні враховуватися причинно-наслідкові взаємозв'язки між її елементами та міжагентний обмін даними та знаннями, що є найважливішим елементом в машинному навчанні моделей агентів [2-3].

Не можна не відзначити стрімке поширення застосування MAS і в кібер-фізичних системах (КФС) – найбільш розвинутих в інтелектуальному розумінні системах збору і аналізу інформації. Як зазначають О. Ю. Бочкарьов та В. А. Голембо [4] – “одним з ключових у роботі таких систем є використання методів та засобів збору даних, за допомогою яких збирають інформацію про оточення КФС, про відповідні об'єкти управління та про роботу самої КФС, а також виконують попередню обробку зібраної інформації для її подальшого використання системами управління та іншими компонентами КФС”. Внаслідок автономності та розподіленості сучасних КФС виникає потреба у використанні інтелектуальних технологій збору даних, які дозволяють адаптувати вимірювально-обчислювальні процеси до збурень у оточенні КФС.

В [5] йдеться про делегування значної частини повноважень з прийняття рішень окремим інтелектуальним агентам збору даних на основі концепції інтелектуального автономного агента (intelligent autonomous agent) та технологій багатоагентних систем (multi-agent systems).

Почасти, концепцію MAS дедалі частіше використовують в реальних ІВС. Патент зі створення інформаційно-вимірювальної системи [6], суть якого полягає в розробці інформаційно-вимірювальної системи, яка здатна вимірювати фізичні величини шляхом перетворення фізичної взаємодії середовища з сенсорами в електричні сигнали, а потім у цифрові коди, передбачає застосування множинних інтелектуальних давачів з вимірювальними перетворювачами, мікропроцесори з інтерфейсними пристроями та канали міжвузлових зв'язків, що фактично відтворює архітектуру MAS. Також запатентована система дозволяє автоматично виконувати програму вимірювань і передавати результати у вигляді цифрових кодів.

Таким чином задачі моніторингу середовища, вимірювання фізичних величин, контролю заявлених параметрів та управління приладами та системами на основі штучного інтелекту та моделей машинного навчання об'єднуються і кооперуються в одній інтелектуальній системі. Такі системи ефективніші і менш затратні ніж використання розрізнених систем моніторингу, контролю чи управління. А розвиток телеметричних способів передачі даних (як зростання швидкості так і вмістимості інформації) та використання хмарних технологій накопичення і

збереження даних гарантує подальше об'єднання різноманітних функцій в одній системі.

Метою статті є розроблення моделі та архітектури MAS для інформаційно-вимірювальних технологій та практичних аспектів їх застосування у сфері моніторингу параметрів різнопланових об'єктів, в тому числі навколишнього середовища.

2. Виклад основного матеріалу

Зі зростаючою складністю сучасних інформаційно-вимірювальних технологій можна констатувати, що застосування традиційних математичних алгоритмів в умовах неповноти та суперечливості вихідної інформації про стан системи, а також за необхідності прийняття рішень в реальному часі, є досить проблемним. Зазвичай реалізація евристичних методів передбачає використання різноманітних прикладних систем штучного інтелекту (системи підтримки прийняття рішень, експертні системи, системи аналізу в режимі реального часу тощо). Вказані системи ґрунтуються на тому, що для прийняття рішень в якості обґрунтування виступає експертний досвід дій у подібних ситуаціях у цій предметній області.

Для впровадження MAS у практичні системи необхідно розглянути запропоновані нами підходи, які можна сформулювати у такому, поданому нижче вигляді.

Агентна архітектура. Розроблення агентної архітектури є ключовим кроком у впровадженні MAS і включає визначення структури та взаємодії агентів. Методи, які реалізують агентно-орієнтоване моделювання і фреймворки для агентних систем, надають методологію для проектування та розроблення агентів і їх взаємодії.

Координація агентів. У MAS агенти повинні співпрацювати та координувати свої дії для досягнення спільних цілей. Алгоритми координації, які передбачають вирішення задач з розподілу завдань, планування та прийняття рішень, повинні бути використані для забезпечення ефективної координації між агентами.

Методи машинного навчання без учителя та з підкріпленням. Використання цих методів дозволяє агентам вдосконалювати свої дії на основі взаємодії з середовищем. Це забезпечує можливість самостійно навчитися та адаптуватися до змінних умов. Алгоритми навчання з підкріпленням, наприклад, Q-навчання або алгоритми глибокого навчання, можуть бути використані для навчання агентів у MAS.

Методи оптимізації. Переважна більшість MAS потребують оптимізації певних критеріїв або функцій. Алгоритми оптимізації, наприклад, такі як генетичні алгоритми, алгоритми частинок, алгоритми імунної системи тощо, можуть бути використані для покращення роботи MAS та досягнення бажаних результатів.

Згідно [7] архітектура інтелектуальної системи на основі MAS практично може бути реалізованою централізовано або децентралізовано, друга дає можливість агентам більш самостійно діяти (табл.1).

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики архітектур MAS

Аспекти	Централізована архітектура	Децентралізована архітектура
Керівництво	Єдиний центральний контролер або керівник	Розподілене керівництво агентами
Прийняття рішень	Рішення приймаються централізованою системою або керівником	Рішення приймаються децентралізовано кожним агентом
Комунікація	Комунікація відбувається через централізований канал або засоби комунікації, контрольовані централізованою системою	Комунікація відбувається безпосередньо між агентами або через розподілену систему комунікації
Масштабованість	Менш гнучка у відношенні масштабування, оскільки залежить від централізованої системи	Більш гнучка у відношенні масштабування, оскільки може бути розподілена на багато агентів
Надійність	Залежить від надійності центрального контролера або керівника	Більш надійна, оскільки не залежить від єдиного пункту відмови
Обробка інформації	Централізована система отримує і обробляє інформацію	Кожен агент обробляє свою власну інформацію
Адаптивність	Менш адаптивна до зміни умов або збоїв	Більш адаптивна до зміни умов або збоїв, оскільки може реорганізуватись та адаптуватися локально

Відзначимо, що кожна з цих архітектур має свої переваги та обмеження, і її вибір залежить від конкретного контексту та вимог дослідження або застосування.

На підставі аналізу децентралізованої схеми нами пропонується для проектування мультиагентних інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем обрати централізовану архітектуру з широкою автономією інтелектуальних агентів, оскільки практично є неможливим об'єднання двох архітектур поданих в табл. 1.

Такий висновок впливає з того, що централізована архітектура MAS передбачає наявність центрального агента або координатора, який відповідає за прийняття рішень та керування всією системою, в той час як агенти займаються збором даних з сенсорів та передачею оброблених даних до центрального агента.

Застосування централізованої архітектури MAS з широкою автономією інтелектуальних агентів при проектуванні інформаційно-вимірювальних систем має значні переваги в порівнянні зі застосуванням класичних архітектур MAS. Так, завдяки централізованому керуванню забезпечується єдина точка керування всією системою, що спрощує процес прийняття рішень та координацію дій агентів. Крім того, централізована обробка даних забезпечує кращий аналіз даних, що дає змогу виявляти тренди чи аномалії та приймати відповідні рішення. Ще однією важливою перевагою є оптимізація ресурсів системи, оскільки централізована архітектура дозволяє ефективно розподіляти агентів та ресурси для оптимального покриття середовища та моніторингу параметрів. Це може допомогти уникнути дублювання агентів або недостатку покриття. Центральний агент забезпечує можливість аналізувати систему в цілому та здійснювати стратегічне управління параметрами

середовища. Це дозволяє виявляти тенденції, проводити довгострокове планування та впроваджувати стратегії для оптимізації ефективності та стійкості системи.

Централізована архітектура сприяє легкій інтеграції системи моніторингу з іншими інформаційними системами, що дозволяє обмінюватися даними, виконувати спільні задачі та забезпечувати взаємодію з іншими технічними системами контролю та управління середовищем.

У контексті інформаційно-вимірювальних технологій для моніторингу параметрів середовища, централізована архітектура з автономними агентами може бути реалізована таким чином.

Визначення цілей. Центральний агент визначає цілі та завдання системи моніторингу параметрів середовища. Цілі можуть включати збір, аналіз та відображення даних про різні параметри середовища, такі як температура, вологість, рівень забруднення тощо.

Вибір та розміщення агентів. Центральний агент вибирає та розміщує агентів у відповідних місцях середовища для збору даних. Ці агенти можуть бути давачами, пристроями збору даних або програмними модулями, що здійснюють моніторинг параметрів.

Збір даних. Агенти збирають дані про параметри середовища, до яких вони прикріплені. Ці дані можуть бути зібрані з використанням сенсорів, передачі даних по мережі або іншими методами, залежно від конкретної реалізації системи.

Комунікація з центральним агентом. Агенти взаємодіють з центральним агентом для передачі зібраних даних та отримання вказівок щодо подальших дій. Центральний агент може аналізувати отримані дані, порівнювати їх зі заздалегідь встановленими нормами та вживати заходи в разі виявлення відхилень або проблем.

Прийняття рішень та керування. На основі зібраних даних та аналізу центральний агент приймає рішення щодо необхідних заходів. Це може включати сповіщення операторів, автоматичне виконання дій або взаємодію з іншими системами для забезпечення безпеки або оптимізації параметрів середовища.

Моніторинг та звітність. Центральна система може також включати функції моніторингу та звітності, які дозволяють відстежувати стан агентів, якість зібраних даних та продуктивність всієї системи моніторингу. Це допомагає виявляти аномалії, проблеми або несправності в системі та забезпечує звіти для аналізу та управління.

В запропонованій нами архітектурі агенти не припиняють свої функції моніторингу, збору та відправки даних. Вони продовжують функціонувати без втрати даних для аналізу, використовуючи блоки пам'яті та паралельні комунікаційні канали (рис. 1).

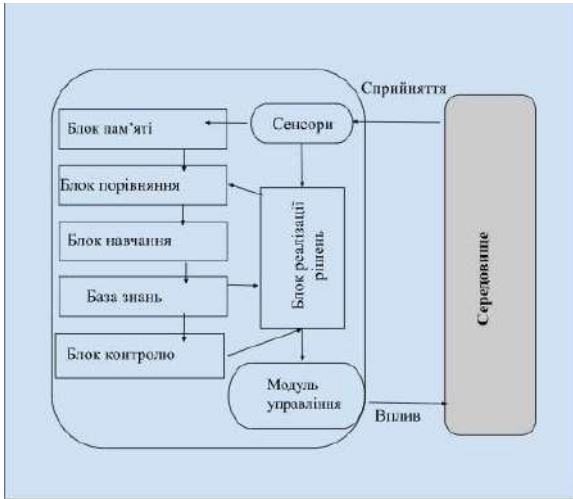


Рис.1. Структурна схема інтелектуального агента в архітектурі MAS

Враховуючи наявні дослідження [8,9] для удосконалення процесу обробки даних в інформаційно-вимірювальних технологіях на архітектурі MAS пропонується використовувати алгоритми неконтрольованого навчання та навчання з підкріпленням.

Алгоритми кластеризації, такі як k-середніх або ієрархічна кластеризація, використовуються для групування подібних даних в MAS. Це дозволяє агентам визначити внутрішню структуру даних та використовувати її для подальшої обробки.

Алгоритми асоціативного навчання, або асоціативні нейронні мережі, використовуються для виявлення зв'язків та залежностей між різними даними в MAS. Це допомагає агентам розуміти інформаційні зв'язки та здійснювати більш ефективну обробку даних.

Алгоритми аналізу головних компонент (PCA) можуть використовуватися для зменшення розмірності даних та виокремлення важливих ознак.

Це дозволяє агентам працювати з меншим обсягом даних, зберігаючи при цьому основну інформацію.

Автоенкодера – нейронні мережі, що використовуються для відтворення вхідних даних на виході. Вони можуть використовуватися для виявлення складних залежностей у вхідних даних та забезпечення ефективного представлення даних.

Генеративні згорткові моделі (DCGAN) або варіаційні автоенкодера (VAE), які використовуються для генерації нових зразків даних. Це може бути корисним, наприклад, для доповнення недостатніх даних або генерації синтетичних даних для тестування MAS.

Залежно від поставлених завдань агенти використовуючи експертні знання будуть використовувати відповідні алгоритми для формування повних, точних і безперервних даних про стан середовища та інші стани моніторингу і контролю.

Як один з практичних аспектів реалізації MAS нами запропонований метод подвійного контролю [10]. Метод передбачає використання двох незалежних систем вимірювання для перевірки точності отриманих даних. Перша система вимірювання є основною та забезпечує збір інформації з оточуючого середовища. Друга система вимірювання, що працює паралельно з основною, використовує незалежні сенсори або алгоритми для проведення аналогічних вимірювань. Порівняння результатів двох систем дозволяє виявляти можливі помилки або відхилення вимірювань. Удосконалення методу призводить до можливості застосування його не лише для перевірки і порівняння отриманих вимірювань з сенсорів та датчиків, а також при виборі алгоритмів машинного навчання інтелектуальним агентом, вибору формування експертних правила для бази знань, безпеці та захисті передачі даних тощо. Метод подвійного контролю може бути застосований на двох рівнях: апаратному та інтелектуальному. На апаратному рівні можуть бути застосовані такі методи, як паралельні вимірювання, збільшення частоти вимірювання, перевірка вимірювальних приладів на точність, автокалібрування або самокалібрування сенсорів. На інтелектуальному рівні метод подвійного передбачає застосування складних і багаторівневих алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, таких як моделі без навчання та з підкріпленням.

Використання подвійного контролю на апаратному та інтелектуальному рівнях забезпечує істотні переваги в точності та надійності вимірювань, запобігає потенційним проблемам, пов'язаним зі збоями обладнання та помилками вимірювань, завдяки застосуванню комплексних алгоритмів та методів перевірки значно зростає ефективність системи за рахунок адаптивного навчання та самовдосконалення, що забезпечує високу точність вимірювань, надійність системи, адаптивність та ефективність у різних сферах застосування.

3. Висновки

Застосування моделі MAS в інформаційно-вимірювальних технологіях є новим підходом для моніторингу стану об'єктів і середовища, контролю їх параметрів та управління виконавчими приладами в реальному часі.

Запропонована базова схема проектування мультиагентної інтелектуальної системи вирішує основні проблеми застосування агентних технологій при проектуванні інформаційно-вимірювальних

систем, удосконалює технології збору, обробки та передачі даних, демонструє свої переваги в практичному застосуванні.

В той же час, перспективним і необхідним є продовження роботи над удосконаленням методів практичної реалізації інформаційно-вимірювальних технологій, зокрема в області розроблення відповідних алгоритмів машинного навчання для моделей. Це буде напрямком наших подальших наукових досліджень.

Список літератури

1. Плєскач В.Л., Рогущина Ю.В. Агентні технології: Монографія. Київ: Київський національний торговельно-економічний університет, 2005. 344 с.
2. Wooldridge M., Jennings N.R. Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey. In: Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages. Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994, *Proceedings. Springer Verlag*: 3-39, 1994
3. Shoham Yoav, Kevin Leyton-Brown. Multiagent Systems: algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations: Cambridge University Press, 2009. 496 p.
4. Бочкар'єв О. Ю., Голембо В. А. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". *Комп'ютерні системи та мережі*. 2015. № 830. С. 7-11.
5. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor): MIT Press, 2000. – 648 p.
6. Патент 73792 С2 Україна; МПК (2012.01) G06Q 50/02. Інформаційно-вимірювальна система для контролю якості мінеральної сировини/ А.А.Азарян, О.С.Ахтямов, А.С.Карачабан, І.М.Кознін, В.В.Дрига: № u201203089: заявл. 16.03.2012р.; опубл.10.10.2012; бюл.№19.
7. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Нейтеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткіологічних і нейромережних моделей: Монографія / Під заг. ред. С. О. Субботіна. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.
8. Luck M. Multi-Agent Systems and Applications. *Springer-Verlag*: Berlin, 2001. 452 p.
9. Choi, W.-H.; Kim, J. Unsupervised Learning Approach for Anomaly Detection in Industrial Control Systems. *Appl. Syst. Innov.* 2024.№7.P.18-27.doi.org/10.3390/asi7020018.
10. Середюк О.Є., Труфан М.М., Винничук А.Г. Метод подвійного контролю в інформаційно-вимірювальних системах і перспективи його застосування. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи*: збірник тез та доповідей VI-а міжнар. наук.-практ. конф. м. Львів, 16–17 листопада 2023 р. Львів: НУ "Львівська політехніка", 2023. С.270-271.

Надійшла (Received) 17.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 17.11.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Середюк Орест Євгенович – д.т.н., професор, виконуючий обов'язки завідувача кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: mivt@nung.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8539-2693

Orest Serediuk – DSc, professor, Acting Head of the department of information and measurement technology, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; e-mail: mivt@nung.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8539-2693

Труфан Михайло Михайлович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: mykhailo.trufan-a175-23@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7924-7170

Mykhailo Trufan – postgraduate student of the Department of Information and Measurement Technology, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine; e-mail: mykhailo.trufan-a175-23@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7924-7170

Research on the Practical Aspects of Using Multi-Agent Systems in Information Measurement Technologies

O.Y. Serediuk, M.M. Trufan

Abstract

The conceptual aspects of building multi-agent systems (MAS) are analyzed. Approaches to implementing MAS are considered. MAS is developed based on a centralized architecture with broad autonomy of intelligent agents, its advantages are outlined. The features of the practical application of the dual control method developed by the authors as a condition for improving the use of MAS are characterized.

Key words: information and measuring technologies, multi-agent system, intelligent agent, artificial intelligence, machine learning algorithms, sensor

НОВИЙ ПІДХІД ДО ВСТАНОВЛЕННЯ НОРМАТИВНОГО ЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТА ВИПРОБУВАНЬ

А. Коробко, О. Костовський, К. Суржко

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,

Анотація

В статті розроблено метод встановлення нормативних (номінальних) значень характеристик властивостей об'єкта при розробці нових методів випробувань базується на використанні похибок і невизначеності вимірювання. Введено поняття метрологічного допуску, суть якого інтервал в межах якого вважається, що показник відповідає певному рівню. Окремого дослідження потребують питання обґрунтування взаємозв'язку точності і невизначеності вимірювання та фактичних числових значень результатів вимірювання та обґрунтування показників валідації методу

Ключові слова: нормування показника, метод випробування, метрологічний допуск, невизначеність вимірювання, стандартизація, оціна відповідності, попередня серія вимірювань, основна серія вимірювань, допустиме значення, допустимий інтервал.

1. Вступ

Однією з основних (першочергових) задач в умовах технічного регулювання є розробка нових (сучасних) методів випробувань. Ця умова витікає із умов науково-технічного прогресу та сучасного розвитку техніки і засобів контролю її технічного стану. Існуючі методи випробувань є надійними. Проте, в деяких випадках, застосовувані засоби вимірювальної техніки, випробувальне устаткування і сама методика випробувань не відповідають об'єкту випробувань. Тому особливу увагу необхідно приділяти розробці нових методів і методик випробувань. Науково-технічний прогрес зумовлює появу нових показників, що характеризують якість продукції. Зокрема, [1], [2] та інші. А це в свою чергу вимагає розробки нових методів випробувань і проектування відповідного випробувального устаткування. В тому числі, актуальним є питання нормування визначуваних показників, тобто встановлення їхніх номінальних значень, а також метрологічного допуску на ці значення та допуску за величиною якого випробувальні лабораторії зможуть приймати рішення про відповідність продукції вимогам [3].

В статті запропоновано метод встановлення нормативних (номінальних) значень показників об'єкту випробувань при розробці нових методів випробувань, з урахуванням метрологічного допуску на похибку і невизначеність вимірювання.

2. Аналіз останніх публікацій

При розробці нових методів випробувань і, відповідно, розробці нових показників ефективності, за якими буде оцінюватись фактичний стан об'єктів випробувань, постає питання встановлення інтервалу значень в якому значення показника, що контролюється буде відповідати певному рівню [4].

Ця задача стає актуальною, оскільки усі вимірювання супроводжуються певними похибками і невизначеністю.

З введенням в дію Технічного регламенту [5] та імплементацією Україною Регламенту Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 167/2013 [6] постає питання розробки нових методів випробувань машин, а також розробки прискорених методів випробування (діагностування) які дозволять без втручання у конструкцію машини дати попередній висновок про технічний стан її вузлів і надати рекомендації про направлення машини на подальше конкретне обстеження. Іншим аспектом цього питання є те, що методи випробувань мають «іти в ногу з часом» щодо розвитку самої техніки [7]. Крім цього, в галузі випробувань набувають популярності так звані «фокус-тести». Це випробування з визначення конкретного показника (погодженого із замовником), з метою висвітлення споживчих якостей машини або її безпечності. Актуальність цього напрямку розвитку випробувань підтверджується і Тематичним планом науково-випробувальних робіт Українського науково-дослідного інституту прогнозування і випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого «Наукові засади повоєнного відновлення та євроінтеграції агропромислового комплексу України» на 2023-2025 роки, затвердженим Міністерством аграрної політики України. Слід зауважити, що фокус-тести, здебільшого, проводяться за незастандартизованими методами і методиками.

На сьогоднішній день перспективним напрямком розвитку випробувань машин є метод парціальних прискорень [8]. Цей метод відносно простий у використанні і базується на принципах кінемодинаміки. Крім цього реалізація методу парціальних прискорень проводиться із використанням сучасних засобів вимірювальної техніки на основі MEMS-технологій [9, 10].

У відомій літературі приділяється увага питанню оцінювання відповідності теоретичної моделі вимірювань експериментальній, що застосовується при розробці нових методів випробувань [11, 12] та питанню розробки альтернативних показників оцінювання співпадіння результатів випробувань [13] на основі невизначеності вимірювання [14]. В роботах [15], [16] зроблено акцент на тому, що невизначеність вимірювання є ефективним інструментом для розробки правил прийняття рішень як у лабораторній діяльності, так і під час дослідження якості виробничих технологічних процесів. Тому невизначеність вимірювання може бути ефективним інструментом і під час встановлення нормативного значення характеристик властивостей об'єкта випробувань.

Метою дослідження є розробка методу встановлення нормативних значень характеристик властивостей об'єкта випробувань і метрологічного допуску на їх величину з урахування похибки і невизначеності вимірювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити алгоритм нормування показника і встановлення метрологічного допуску на його величину з урахуванням похибки і невизначеності вимірювання.

3. Алгоритм встановлення нормативного значення показника і метрологічного допуску

Експлуатація мобільних машин в різних галузях супроводжується високими затратами на підтримання їх працездатного стану протягом усього терміну служби. Для підвищення ефективності використання мобільних машин розроблені методи і засоби випробувань, які застосовують як при технічному обслуговуванні і після ремонту, так і в якості самостійного технологічного процесу при підтвердженні відповідності.

Важливим етапом розробки системи підтвердження відповідності шляхом випробувань є обґрунтування і визначення нормативних значень показників технічного стану машини в цілому і її окремих елементів, що забезпечують «постановку діагнозу» технічного стану. До нормативних значень відносять номінальні, граничні і допустимі значення [17]. Номінальні значення відповідають новим, технічно-справним машинам, агрегатам, вузлам, елементам. Граничне значення параметра відповідає такому стану, коли подальша експлуатація стає технічно неможливою або економічно недоцільною. Допустимі значення являють собою граничне значення, за якого забезпечується заданий або економічно оптимальний рівень ймовірності відмови за міжконтрольного напрацювання. Номінальні і граничні значення структурних параметрів

елементів машин встановлюються виробниками в галузевій нормативній документації.

Кожне вимірювання супроводжується певною похибкою і невизначеністю. Причини їх виникнення достатньо добре описані у відомій літературі. Невизначеність вимірювання – це параметр вимірювання, що характеризує інтервал значень показника, що вимірюється, які обґрунтовано можуть, з певною ймовірністю, бути приписані величині, що вимірюється [14] (рис. 1).

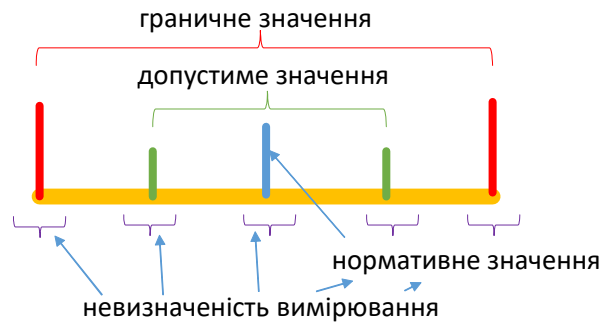


Рис. 1. Невизначеність вимірювання і значення показника, що контролюється

Під час встановлення нормативного значення характеристик властивостей об'єкта випробувань, необхідно жадати, щоб невизначеність була якнайменшою. Проте, в силу дію випадкових об'єктивних і суб'єктивних причин, невизначеність завжди залишається. Суб'єктивною основною причиною невизначеності (розкиду вимірених значень від досліду до досліду), при проведенні випробувань є «випробувач». Тобто людина, що здійснює випробування зі своїми індивідуальними фізіологічними можливостями й досвідом під час приведення в дію органів керування машини. Менш впливовим фактором на невизначеність під час динамічних випробувань мобільних машин є дорога або фон на яких проводяться випробування та стан коліс машини. Обґрунтувати вимоги до дороги і коліс можливо, проте не завжди можливо забезпечити повну відтворюваність цих вимог.

Введемо поняття – метрологічний допуск – це інтервал в межах якого вважається, що показник відповідає певному рівню.

Алгоритм встановлення нормативного значення показника і метрологічного допуску його визначення наступний:

- обґрунтування методу й методики його реалізації;

- попередня серія вимірювань: експериментальне встановлення попередніх даних щодо характеристик точності методу (оцінка результату вимірювання, невизначеність вимірювання, похибка, середньоквадратичне відхилення результату вимірювання і його похибка, коефіцієнт варіації) шляхом здійснення серії випробувань за розробленою методикою, аналітичне визначення необхідного числа вимірювань для

встановлення нормативного значення із заданою невизначеністю;

– основна серія вимірювань: експериментально-аналітичне визначення нормативного значення показника, визначення метрологічного допуску показника, що контролюється;

– коригування (за необхідності) вимог до методу випробувань в частині похибки (невизначеності) засобу вимірювальної техніки. Що використовується при випробуваннях.

4. Обґрунтування методу й методики його реалізації

Обґрунтування методу випробувань й методики його здійснення проводиться шляхом наукових досліджень та аналізування закономірностей зміни технічного стану за досліджуванним параметром. На цьому етапі встановлюється рівняння вимірювання, залежність зміни вихідної величини від зміни вхідної. Проводяться аналітичні розрахунки з використанням теорії чутливості. На основі цих розрахунків встановлюються орієнтовні значення довірчого інтервалу й невизначеності вимірювання.

5. Попередня серія вимірювань

Попередня серія вимірювань здійснюється з метою встановлення попередніх даних про метод, його чутливість до випадкових впливаючих факторів. Дані про характеристики точності методу визначаються шляхом проведення серії випробувань за розробленою методикою. Випробування проводяться на технічно-справному (новому) об'єкті, що підтверджено результатами випробувань іншими (стандартизованими) методами (з використанням відомих показників). На цьому етапі нормування, в наявності у випробувача є лише дані щодо похибки засобу вимірювальної техніки, яким проводиться вимірювання, або про невизначеність його калібрування.

Попередня серія вимірювання складається з одного або декількох етапів. На кожному етапі отримується певна група даних. Кількість вимірювань на першому етапі залежить від кількості перемінних факторів, що призводять до випадкової похибки вимірювання, які можна врахувати. Орієнтовно на першому етапі проводиться 10-20 вимірювань. Результати вимірювання перевіряються на наявність викидів. Критерієм придатності попередньої серії є виконання умови, за якої похибка середньоарифметичного значення показника повинна бути меншою систематичної похибки вимірювання Δ_c :

$$\Delta \bar{x}_{i1} < \Delta_c, \quad (1)$$

де

$$\Delta \bar{x}_{i1} = \pm t \frac{\sigma_{i1}}{\sqrt{n_{i1}}}, \quad (2)$$

t – коефіцієнт Стюдента, що залежить від числа вимірювань за довірчої ймовірності $P=0,95$; σ_{i1} , n_{i1} – середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань і число вимірювань в попередній серії на першому етапі, відповідно.

Умова (1) буде виконана, якщо $\Delta \bar{x}_{i1} = 1/3 \Delta_c$. У разі невиконання умови (1), необхідно здійснити ще один етап вимірювань в кількості $n_{i2}=10...20$. Провести розрахунки за (1) і (2) з урахуванням вимірювань першої групи. Такий критерій є допустимим, оскільки в результаті вимірювання контрольованого параметра об'єкта випробувань переважає випадкова похибка.

На наступному етапі проводяться розрахунки коефіцієнту варіації v_n та розширеної невизначеності U_n . Коефіцієнт варіації використовується в якості додаткової перевірки. Його значення не повинно перевищувати 15 %. У разі перевищення коефіцієнтом варіації допустимого значення, проводять нові вимірювання попередньої серії випробувань.

У разі виконання умови (1) та відповідності коефіцієнту варіації v_n , робиться висновок про те, що запропонований метод випробувань є дієвим і дає надійні результати.

6. Основна серія вимірювань

Нормативне значення показника, розраховане за попередньою серією вимірювань, з однаковою ймовірністю може знаходитись в інтервалі $\pm U_n$. За номінального значення нормованого показника, формулювання висновку щодо рівня об'єкту випробувань не викликає ніяких труднощів. Проте, із наближенням його значення до допустимого або граничного значення, виникають певні труднощі із формулюванням висновку. Для звуження інтервалу, в якому може знаходитись нормативне значення показника необхідно провести основну серію вимірювань.

Кількість вимірювань n_o в основній серії визначається виходячи із значень середньоквадратичного відхилення і коефіцієнту варіації за довірчої ймовірності $P=0,99$ (таке посилення вимог до точності дає змогу звужити інтервал у якому буде знаходитись нормативне значення показника).

Визначимо із (2) необхідну кількість вимірювань основної серії

$$n_i = \frac{t^2 \sigma_i^2}{\Delta \bar{x}_i^2}, \quad (3)$$

де σ_n , $\Delta \bar{x}_i$ – середньоквадратичне відхилення і похибка визначення середнього значення показника у попередній серії вимірювань, відповідно.

Провівши основну серію вимірювань в кількості n_o , результати перевіряються на наявність викидів. Потім розраховується розширена невизначеність вимірювання основної серії U_o .

Метрологічний допуск на контрольований параметр доцільно встановити в межах $\pm 2U_0$, але не більше ніж $\pm U_{\text{п}}$. Це забезпечить врахування невизначеності від факторів, що змінюються від досліду до досліду. За реалізації нового методу, невизначеність вимірювання не повинна перевищувати U_0 .

7. Коригування вимог до методу випробувань

Коригування вимог до методу випробувань проводиться за необхідності. Наприклад, якщо в результаті вимірювання показника даним засобом вимірювальної техніки не може бути отримане значення невизначеності U_0 , то необхідно обґрунтувати вибір нового засобу вимірювальної техніки з меншим значенням систематичної похибки, що в свою чергу зменшить невизначеність

вимірювання типу В і, як наслідок, зменшить значення розширеної невизначеності.

За результатами нормування складається звіт.

8. Висновки

Розроблений метод встановлення нормативних (номінальних) значень характеристик властивостей об'єкта при розробці нових методів випробувань базується на використанні похибок і невизначеності вимірювання. Введено поняття метрологічного допуску, суть якого інтервал в межах якого вважається, що показник відповідає певному рівню. Окремого дослідження потребують питання обґрунтування взаємозв'язку точності і невизначеності вимірювання та фактичних числових значень результатів вимірювання та обґрунтування показників валідації методу.

Література

1. Коробко А., Назарько О., Радченко Ю. Удосконалення методів діагностування рульового керування шарнірно-зчленованих машин. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва України. 2015. 19 (33). 136-141.
2. Лебедев С., Коробко А., Балабай Т., Назарько О., Радченко Ю. Розроблення експрес-методу випробувань гальмівних систем мобільних сільськогосподарських машин. Техніка і технології АПК. Науково-виробничий журнал. 2016. 7 (82) липень. 30-34.
3. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ» – VI, 24 с. (Національний стандарт України).
4. Лебедев С., Коробко А. Оцінювання придатності методів випробувань мобільних машин. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва України. 2015. 19 (33). 127-135.
5. Постанова КМУ Про затвердження Технічного регламенту щодо складових частин і характеристик сільськогосподарських та лісогосподарських тракторів від 28.12.2011 № 1368.
6. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 167/2013 від 5 лютого 2013 р. про затвердження сільськогосподарських і лісогосподарських транспортних засобів та ринкового нагляду щодо них.
7. Лебедев А. Т., Лебедев С. А., Коробко А. І. Кваліметрія та метрологічне забезпечення випробувань тракторів / Під ред. А. Т. Лебедева. Х. : Вид-во «Міськдрук», 2018. 394 с.
8. Метод парціальних прискорень та його застосування в динаміці мобільних машин / [М.П. Артемов, А.Т. Лебедев, М.А. Подригало, О.С. Полянський та інші]. Х. : «Міськдрук», 2012. 220 с.
9. Status of the MEMS industry 2007 Edition. Sample of the analysis. 2007, Yole Développement SARL.
10. Going beyond silicon MEMS with EFAB technology. White paper. 2004. Microfabrica. Inc.
11. Korobko A. Measurement Uncertainty as a Test Model Assessment Tool. Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2019 : 2019 IEEE 8th International Conference with XVI Scientific Workshop "Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects" UM*2019 : Conference Proceedings. Sozopol, Bulgaria 06-08 September 2019. P. 707–710. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019418.
12. Podrigalo M., Verbitskiy V., Korobko A., Baidala V. Researches Obtained by Different Methods and their Assessment of Adequacy (in order of discussion). Perspective Technologies and Devices. 2019. 15. 63–67.
13. Korobko A., Kotova Yu. An alternative method for assessing the agreement between test results. Український метрологічний журнал (Ukrainian Metrological Journal). 2024. № 1. 4–10. DOI: 10.24027/2306-7039.1.2024.300868 .
14. Захаров І. П. Порівняльний аналіз характеристик точності вимірювань. Український метрологічний журнал. 2022. 4. 49-55.
15. Volodarsky E.T., Kosheva L.O., Klevtsova M.O. Approaches to the Evaluation of Conformity Taking into Account the Uncertainty of the Value of the Monitored Parameter. Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2019 : 2019 IEEE 8th International Conference with XVI Scientific Workshop "Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects" UM 2019: Conference Proceedings. Sozopol, Bulgaria 06-08 September 2019. P. 648–652. doi: 978-1-7281-1814-7/19/31.00.
16. Volodarsky E., Kosheva L., Klevtsova M. Formation of the rule decision-making about suitability products on the basis of the adaptive algorithm. 28th International Scientific Symposium Metrology And Metrology Assurance. 2018. 331–335.
17. Alvarez I., Huet S. Automatic diagnosis of engine of agricultural tractors: The BED experiment. Biosystems Engineering. 100. 3. 2008. 362-369 DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.04.003.

Надійшла (Received) 15.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 27.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Коробко Андрій – доктор технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: korobkoani@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>;

Korobko Andrii – Doctor of Eng. Science, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: korobkoani@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>.

Костовський Олександр, магістрант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kostovski@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5240-2231>;

Kostovski Oleksandr, master's student, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: kostovski@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5240-2231>.

Суржко Карина, студентка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: surzko.karina,2069@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2095-642X>;

Surzhko Karina, student, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: surzko.karina,2069@gmail.com, , ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2095-642X>.

A New Approach to Establishing Normative Values for the Properties of a Test Object

Korobko A.I, Kostovski O.A., Surzhko K.A.

Abstract

The article develops a method for establishing normative (nominal) values of characteristics of object properties when developing new testing methods, based on the use of errors and measurement uncertainty. The concept of metrological tolerance is introduced, the essence of which is the interval within which it is considered that the indicator corresponds to a certain level. A separate study is necessary in the issue of substantiating the relationship between the accuracy and uncertainty of measurement and the actual numerical values of the measurement results and substantiating the validation indicators of the method.

Key words: standardization of the indicator, testing method, metrological tolerance, non-significance of vibrating, standardization, assessment of applicability, advanced series of vibrating, main series of vibrating, permissible values, permissible interval.

MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION OF THE OBJECT PLANIMETRIC COORDINATES USING THE RHO-THETA METHOD

O. Botsiura, I. Zadorozhna, I. Zakharov

Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine

Abstract

Determining the planimetric coordinates of an object is a topical task of coordinate metrology, which finds application in cartography, geodesy, location and navigation. The article considers the features of measurement uncertainty evaluation the coordinates of an object on a plane using the rho-theta method. The measurement model is substantiated. Expressions for estimating the numerical values of coordinates and their combined standard uncertainties are obtained. Expressions for estimating expanded uncertainties using the kurtosis method are found. The uncertainty budgets for measuring the planimetric Cartesian object coordinates are presented. Expressions for relative standard uncertainties in measuring coordinates are written and an example of their evaluation for real metrological characteristics of measuring instruments of a base station is considered.

Keywords: coordinate measurement; rho-theta fixing; measurement uncertainties evaluation, kurtosis method.

1. Introduction

In cartography [1], geodesy [2], radio navigation [3], radar [4], optical [5] and acoustic [6] locations the problem of determining the coordinates of a desired point (object) on a plane is widely used. Depending on the measuring capabilities of reference stations (BS), this issue is resolved by several methods: rangefinding (rho-rho) [7], goniometric (theta-theta) [8], and rangefinder-goniometric (rho-theta) [9].

The rho-theta method of measuring the planimetric coordinates of an object considered in this article is requires only a rangefinder and a goniometer installed on one base station (BS).

This refers to active location methods, since radiation from the BS is required to determine the range to the object.

2. Substantiation of the measurement model

The implementation scheme of measuring the planimetric coordinates of an object by the rho-theta measurement method is shown in Fig. 1.

The OX and OY axes form a right Cartesian coordinate system, with the OY axis directed to the north. The diagram shows a BS located at point O_{BS} with coordinates (x, y) . Point P has the measurable coordinates (x_p, y_p) .

The distance between the points O_{BS} and P ($O_{BS}P = \rho$) is measured using the rangefinder installed on the BS, and using the goniometer, the azimuth α is counted from the direction to the north to the direction to the object P .

Using the parameters ρ and α , the coordinates of the object P (x_p, y_p) can be determined using the expressions [2]:

$$x_p = x + \rho \sin(\alpha + \delta_N); \tag{1}$$

$$y_p = y + \rho \cos(\alpha + \delta_N), \tag{2}$$

in which δ_N correction that takes into account the error of the basic station's reference to the north direction.

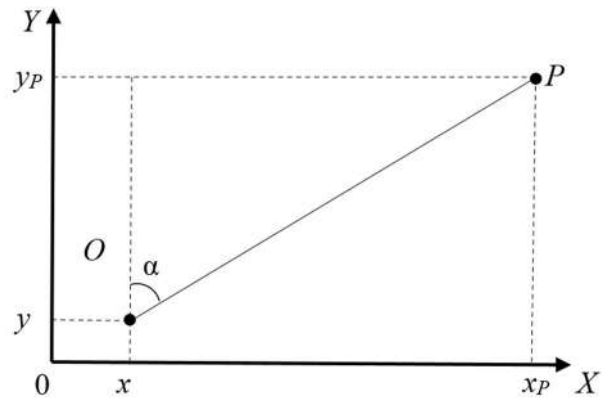


Fig. 1. Diagram of implementation planimetric coordinates measurement by the rho-theta method

3. Evaluation of the measurands and its measurement uncertainty

If the mathematical expectation of the correction $\hat{\delta}_N$ is taken to be equal to zero, then the values of the measured quantities (x_p, y_p) can be estimated from equations (1)-(2) by take the place into them of the values $\hat{x}, \hat{y}, \hat{\rho}, \hat{\alpha}$ of the input quantities:

$$\hat{x}_p = \hat{x} + \hat{\rho} \sin(\hat{\alpha}); \tag{3}$$

$$\hat{y}_p = \hat{y} + \hat{\rho} \cos(\hat{\alpha}). \tag{4}$$

The expression for the combined standard uncertainty (SU) of coordinate measurement can be

written, in accordance with the law of propagation of uncertainty [10], as:

$$u_c(\hat{x}_p) = \sqrt{u^2(\hat{x}) + c_p^2(x_p)u^2(\hat{\rho}) + c_\alpha^2(x_p)[u^2(\hat{\alpha}) + u^2(\hat{\delta}_N)]}, \quad (5)$$

where $u(\hat{x})$, $u(\hat{\rho})$, $u(\hat{\alpha})$ and $u(\hat{\delta}_N)$ are the standard uncertainties of the corresponding input quantities; $c_p(x_p)$ and $c_\alpha(x_p)$ are the corresponding sensitivity coefficients, which can be obtained as:

$$c_p(x_p) = \frac{\partial \hat{x}_p}{\partial \hat{\rho}} = \sin \hat{\alpha}. \quad (6)$$

$$c_\alpha(x_p) = \frac{\partial \hat{x}_p}{\partial \hat{\alpha}} = \hat{\rho} \cos \hat{\alpha}. \quad (7)$$

Equally, it can be expressed the combined SU of coordinate y_p measurement:

$$u_c(\hat{y}_p) = \sqrt{u^2(\hat{y}) + c_p^2(y_p)u^2(\hat{\rho}) + c_\alpha^2(y_p)[u^2(\hat{\alpha}) + u^2(\hat{\delta}_N)]}, \quad (8)$$

where $u(\hat{y})$ is a SU of coordinate \hat{y} measurement; $c_p(y_p)$ and $c_\alpha(y_p)$ corresponding sensitivity coefficients, which are determined by the expressions:

$$c_p(y_p) = \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \hat{\rho}} = \cos \hat{\alpha}; \quad (9)$$

$$c_\alpha(y_p) = \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \hat{\alpha}} = -\hat{\rho} \sin \hat{\alpha}. \quad (10)$$

The SU of measurement of the slant range ρ of an object P is determined from the conforming boundaries of the maximum permissible error (MPE) of the rangefinder $\pm\theta_\rho$ under the assumption of a rectangular probability density functions (PDF) of the measurement error ρ within these boundaries:

$$u(\hat{\rho}) = \theta_\rho / \sqrt{3}. \quad (11)$$

SU in measuring the location of a BS (\hat{x}, \hat{y}) are determined from the boundaries of their MPEs $\pm\theta_x$, $\pm\theta_y$, attributing a rectangular PDF of these errors within the boundaries:

$$u(\hat{x}) = \theta_x / \sqrt{3}; \quad (12);$$

$$u(\hat{y}) = \theta_y / \sqrt{3}. \quad (13)$$

In expressions (5), (8) $u(\hat{\alpha})$ is the standard instrumental uncertainty of azimuth α measurement using a goniometer, which can be found through the boundaries of the MPE error of the goniometer $\pm\theta_\alpha$ attributing a rectangular PDF of the instrumental error within these boundaries as:

$$u(\hat{\alpha}) = \theta_\alpha / \sqrt{3}. \quad (14)$$

If the boundaries of the MPE of reference to the direction to the north are taken to be equal to $\pm\theta_N$, then, attributing a rectangular PDF of the reference error within these boundaries, the SU associated with this error can be estimated as:

$$u(\hat{\delta}_N) = \theta_N / \sqrt{3}. \quad (15)$$

Since the SU of all input quantities were estimated according to type B and were assigned a rectangular PDF, the expanded uncertainties of coordinate (x_p, y_p) measurement are best found using the kurtosis method [8]:

$$U(\hat{x}_p) = k(\eta_x)u(\hat{x}_p); \quad (16)$$

$$U(\hat{y}_p) = k(\eta_y)u(\hat{y}_p), \quad (17)$$

where the coverage factors for a confidence level of p are calculated using the expression:

$$k(\eta) = \begin{cases} 0,1085\eta^3 + 0,1\eta + 1,96, & \text{for } p = 0,95; \\ 0,12\eta^3 + 0,1\eta + 2,0, & \text{for } p = 0,9545, \end{cases} \quad (18)$$

and the kurtosis of the PDFs for (x_p, y_p) are calculated as:

$$\eta_x = \frac{-1,2 \{c_p^4(x_p)u^4(\hat{\rho}) + c_\alpha^4(x_p)[u^4(\hat{\alpha}) + u^4(\hat{\delta}_N)]\}}{u_c^4(\hat{x}_p)}; \quad (19)$$

$$\eta_y = \frac{-1,2 \{c_p^4(y_p)u^4(\hat{\rho}) + c_\alpha^4(y_p)[u^4(\hat{\alpha}) + u^4(\hat{\delta}_N)]\}}{u_c^4(\hat{y}_p)}. \quad (20)$$

In this case, the uncertainty budgets of the object coordinate (\hat{x}_p, \hat{y}_p) measurements will have the form given in Tables 1,2.

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

Input quantities (IQs)	Values of IQs	SU of IQs	Kurtosis of IQs	Sensitivity coefficients	Uncertainty contributions
ρ	$\hat{\rho}$	$u(\hat{\rho})$ (11)	-1,2	$c_p(x_p)$ (6)	$c_p(x_p)u(\hat{\rho})$
x	\hat{x}	$u(\hat{x})$ (12)	-1,2	1	$u(\hat{\delta}_x)$
α	$\hat{\alpha}$	$u(\hat{\alpha})$ (14)	-1,2	$c_\alpha(x_p)$ (7)	$c_\alpha(x)u(\hat{\alpha})$
δ_N	0	$u(\hat{\delta}_N)$ (15)	-1,2	$c_\alpha(x_p)$ (7)	$c_\alpha(x)u(\hat{\delta}_N)$
Measurand	Measurand value	Combined SU	Measurand kurtosis	Coverage factor	Expanded uncertainty
x_p	\hat{x}_p (3)	$u_c(\hat{x}_p)$ (7)	η_x (19)	$k(\eta_x)$ (18)	U (16)

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

IQs	Values of IQs	SU of IQs	Kurtosis of IQs	Sensitivity coefficients	Uncertainty contributions
ρ	$\hat{\rho}$	$u(\hat{\rho})$ (11)	-1,2	$c_\rho(y_p)$ (9)	$c_\rho(y_p)u(\hat{\rho})$
y	\hat{y}	$u(\hat{y})$ (13)	-1,2	1	$u(\hat{y})$
α	$\hat{\alpha}$	$u(\hat{\alpha})$ (14)	-1,2	$c_\alpha(y_p)$ (10)	$c_\alpha(y_p)u(\hat{\alpha})$
δ_N	0	$u(\hat{\delta}_N)$ (15)	-1,2	$c_\alpha(y_p)$ (10)	$c_\alpha(y_p)u(\hat{\delta}_N)$
Measurand	Measurand value	Combined SU	Measurand kurtosis	Coverage factor	Expanded uncertainty
y_p	\hat{y}_p (4)	$u_c(\hat{y}_p)$ (8)	η_y (20)	$k(\eta)$ (18)	U (17)

From expressions (5), (8) one can write expressions for the relative standard uncertainties of coordinate (x_p, y_p) measurement:

$$\tilde{u}(\hat{x}_p) = \frac{u(\hat{x}_p)}{\hat{\rho}} = \{\tilde{u}^2(\hat{x}) + \sin^2(\alpha)\tilde{u}^2(\hat{\rho}) + \cos^2(\hat{\alpha})[u^2(\hat{\alpha}) + u^2(\hat{\delta}_N)]\}^{0.5}, \quad (21)$$

$$\tilde{u}_c(\hat{y}_p) = \frac{u(\hat{y}_p)}{\hat{\rho}} = \{\tilde{u}^2(\hat{y}) + \cos^2(\hat{\alpha})\tilde{u}^2(\hat{\rho}) + \sin^2(\hat{\alpha})[u^2(\hat{\alpha}) + u^2(\hat{\delta}_N)]\}^{0.5}, \quad (22)$$

where $\tilde{u}(\hat{\delta}_x) = u(\hat{\delta}_x)/\hat{\rho}$; $\tilde{u}(\hat{\delta}_y) = u(\hat{\delta}_y)/\hat{\rho}$ are relative standard uncertainties of corrections $\hat{\delta}_x, \hat{\delta}_y$; $\tilde{u}(\hat{\rho}) = u(\hat{\rho})/\hat{\rho}$ is relative SU of measurement ρ .

For the values $\hat{\rho}=1000$ m and $\hat{\rho}=2000$ m; $\theta_\rho=1.5$ m; $\theta_x=\theta_y=1.8$ m; $\theta_\alpha=0.6$ mrad; $\theta_N=0.1$ mrad; given in [11], the dependences $\tilde{u}(\hat{x}_p)$ and $\tilde{u}(\hat{y}_p)$ on α were obtained, shown in Fig. 2.

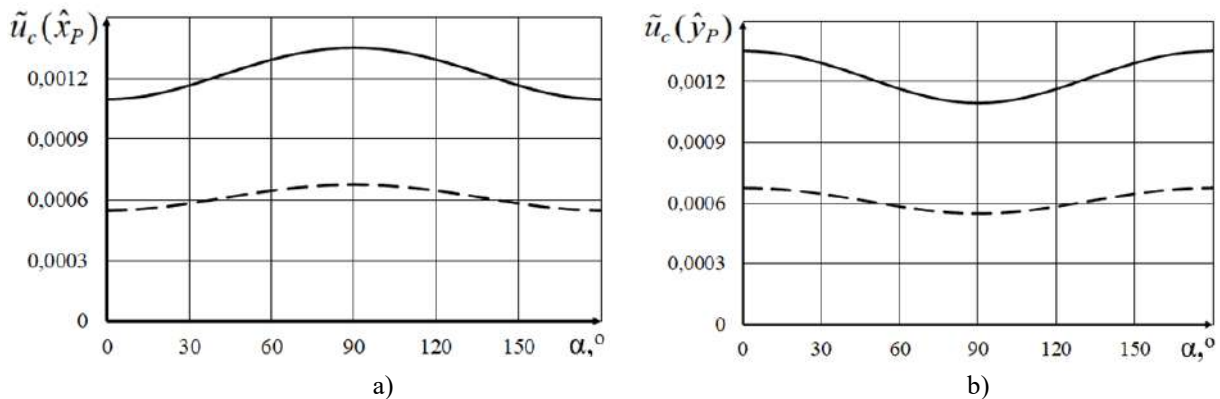


Fig. 2. Dependences $\tilde{u}(\hat{x}_p)$ (a) and $\tilde{u}(\hat{y}_p)$ (b) on α for $\hat{\rho}=1000$ m (—) and $\hat{\rho}=2000$ m (---)

4. Conclusions

1. The preference of the rho-theta measurement method for determining the planimetric coordinates of an object is the use of only one base station equipped with a range finder and a goniometer.

2. Models for measuring the abscissa and ordinate of the sought object using the range-angle method are obtained based on the constructed scheme for its implementation.

3. For the proposed measurement models, expressions for standard uncertainties in measuring the coordinates of an object by the rho-theta measurement method were written and the sensitivity coefficients included in them were calculated.

4. It was shown that it is reasonable to use the kurtosis method to estimate the expanded uncertainty in measuring the coordinates of an object by the rho-theta measurement method.

5. The uncertainty budgets for measuring the planimetric Cartesian object coordinates are presented, which can be used as the basis for a computer program facilitating the routine calculation of measurement uncertainty.

6. The dependences of relative uncertainties in measuring the object coordinates on the azimuth are calculated for real metrological characteristics of measuring instruments of a base station is given.

References

1. Ляшенко Д. О. Картографія з основами топографії : навч. посібник. К.: Наукова думка, 2008, 181 с.
2. Zhiping Lu, Yunying Qu, and Shubo Qiao. Geodasy: introduction to geodetic datum and geodetic systems. Springer, 2014, 401 p.
3. Laurie Tetley, David Calcutt. Electronic Navigation Systems (3-rd edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, 437 p.
4. David Bartlett. Essentials of Positioning and Location Technology. Cambridge University Press, 2013, 212 p.
5. 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.
6. 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.
7. Zakharov I., Botsiura O., Zadorozhna I. Measurement uncertainty evaluation of objects coordinates in a plane using a rangefinder method //2024 XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2024, pp. 1-4.
8. Zakharov I., Zadorozhnaya I., Grokhova G. Measurement Uncertainty Evaluation of Object Coordinates by the Goniometric Method // Metrology and Metrology Assurance (MMA-2022): Proceedings of 2022 XXXII International Scientific Symposium, Sozopol, Bulgaria, 7-11 Sept. 2022,
9. 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.
10. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: ISO, 1993.
11. Tevyashev A., Zemlyaniy O., Shostko I., Koliadin A. Method for analyzing instrumental errors in measuring the parameters of trajectories of movement of aircraft by optoelectronic stations. Information systems and technologies (IST-2021): Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference, September 13–19, 2021, Odesa, Ukraine, 2021, pp. 303–312 (In Russian). https://drforum.science/wp-content/uploads/2021/12/proceedings_ist-2021.pdf
12. 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) 14.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 22.11.2024

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: 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: 0000-0001-9063-9657.

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

Iryna Zadorozhna – post-graduate student of the Department of Information and Measurement Technology of the Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: iryna.zadorozhna1@nure.ua, ORCID: 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: 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: 0000-0003-3852-4582.

Оцінювання невизначеності вимірювань координат об'єкту далекомірно-кутовим методом на площині

Боцюра О.А., Задорожна І.М., Захаров І.П.

Анотація

Визначення координат об'єкта на площині є актуальним завданням координатної метрології, яке знаходить своє застосування у картографії, геодезії, локації та навігації. У статті розглядаються особливості оцінювання невизначеності вимірювання координат об'єкта на площині кутомірно-далекомірним методом. Обґрунтовано модель вимірювань. Отримана процедура оцінювання невизначеності вимірювань абсциси і ординати об'єкту на площині, яка включає в себе оцінки числового значення координат, їх сумарні стандартні невизначеності та розширені невизначеності, які оцінюються методом ексцесів. Наводиться приклад оцінювання відносних стандартних невизначеностей вимірювання абсциси і ординати об'єкту для реальних метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки базової станції.

Ключові слова: вимірювання координат; далекомірно-кутомірний; оцінювання невизначеностей вимірювань, бюджет невизначеностей, метод ексцесів.

ІОНОМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФТОРИД-ІОНІВ У ВОДАХ І РОЗЧИНАХ КУХОННОЇ СОЛІ 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

Анотація

Вивчено використання ультразвуку при іонометричному визначенні фторид-іонів у водах та розчинах кухонної солі з використанням попередньої обробки розчину ультразвуком. Експериментально встановлено оптимальні параметри ультразвуку – частота 18-44 кГц, інтенсивність ≥ 10 Вт/см² протягом ≥ 1 хв. Показано, що попередня обробка розчину ультразвуком знайдених параметрів призводить не тільки до очистки електроду від плівок органічних речовин, але і до збільшення величини аналітичного сигналу фторид-іонів, розширення лінійної області градуального графіку з 10^{-5} до $3,5 \cdot 10^{-7}$ М, скорочення часу відгуку електрода в розчинах, що містять 10^{-5} М іонів фтору з 10-12 хв до 2-3 хв. Показано, що знайдені експериментальні факти можна пояснюють структурними змінами розчинів під впливом ультразвуку. Розроблено методику визначення вмісту фторид-іонів у розчинах кухонної солі та водах. Межа виявлення фторид-іонів у водах склала 0,007 мг/л, у кухонній солі – $1,2 \cdot 10^{-5}$ %.

Ключові слова: фторид-іони, іонометричне визначення, кухонна сіль, вода, ультразвук, відносне стандартне відхилення, електрод.

1. Вступ

Присутні в мінералізованих водах, розсолах та розчинах кухонної солі басейнового та озерного засобів виробництва розчинні органічні сполуки заважають кількісному іонометричному визначенню фторид-іонів через утворення з фторидами електронейтральних комплексних сполук. Крім того, розчинні органічні сполуки утворюють на поверхні мембран іоноселективних електродів міцні плівки [1-4]. У зв'язку з цим, фтор видаляють відгоном або переводять його органічні сполуки у електроактивні з'єднання через їхнє руйнування хімічними (кип'ятіння з амонію персульфатом протягом години) та фізичними (мікрохвильове та ультрафіолетове випромінювання, дія ультразвуку) методами [2,3]. Через меншу трудомісткість процесу та кращі метрологічні характеристики отриманих результатів аналізу найбільше розповсюдження отримало руйнування розчинених органічних речовин фізичними методами [5-7].

Нами запропоновано використання ультразвуку для руйнування розчинних органічних речовин свинцю, міді, кадмію, ртуті та арсену у водах, розсолах та розчинах кухонної солі [1, 7]. При визначенні свинцю, міді, кадмію, ртуті та арсену, використання ультразвуку для руйнування розчинених органічних речовин дозволило у порівнянні з використанням інших фізичних методів значно покращити метрологічні характеристики отриманих результатів аналізу через більшу стабільність та ефективність дії ультразвуку у порівнянні з іншими фізичними методами [7, 8].

Запропонована робота присвячена використанню ультразвуку при іонометричному визначенні фторид-іонів у водах і розчинах кухонної солі.

2. Експериментальна частина

Застосовували іоноселективні електроди EF-VI з крутизною електродної функції (47 ± 2) мВ/рF. Як

електрод порівняння використовували хлорсрібний електрод ЕВЛ-1М3. Різницю потенціалів індикаторного та електрода порівняння вимірювали іономером універсальним ЕВ-74. Визначення проводили в реакторі з водяною сорочкою місткістю 50 мл, підтримували температуру за допомогою термостата в межах $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Використовували ультразвуковий диспергатор УЗДН-1М з набором магнітострикційних випромінювачів.

Всі розчини готували на бідистильованій воді із препаратів кваліфікації не нижче х.ч. Як фоновий електроліт при аналізі вод використовували стандартний електроліт за ДСТУ 4386 (рН $5,0 \pm 0,2$). (Відповідно до п.4.3.3 ДСТУ 4386 фоновий електроліт у 500 мл містить 52 г ацетату натрію, 29,2 г хлориду натрію, 3 г цитрату натрію, 0,3 г трилону Б та 8 мл оцтової кислоти.).

При аналізі розсолів і розчинів кухонної солі фоновим електролітом служив сам розчин кухонної солі з концентрацією хлориду натрію 1 М, підкислений соляною кислотою до рН 5 і містив в 1 л 0,6 г трилону Б. Серію стандартних розчинів готували шляхом послідовного розведення розчину, що містить 0,1 моль/л натрію фториду. Вимірювання проводили при рН 5-8 відповідно до рекомендацій, викладених в [1].

Послідовність проведення дослідів була наступною: в реактор поміщали 20 мл аналізованого розчину і 10 мл фонового електроліту; при аналізі кухонної солі та розсолів брали 30 мл 1 М розчину хлориду натрію, вводили 0,6 г/л трилону Б і підкисляли соляною кислотою до рН 5. Занурювали електроди та отриманий розчин обробляли ультразвуком частотою 14-47 кГц, інтенсивністю 1-12 Вт/см² протягом 0,5-3 хв і вимірювали різницю потенціалів

Також вимірювали різницю потенціалів в аналізованих розчинах після руйнування органічних сполук кип'ятінням з персульфатом амонію в

кислоту середовищі [1]. Паралельно проводили визначення фторид-іонів спектрофотометричним методом з алізаринкомплексом [3].

Для вивчення впливу ультразвуку на величину аналітичного сигналу вимірювали потенціал фторидного електроду в мілівольтах у розчині бідистильованої води, що містить 10^{-4} моль/л фториду натрію (фон ДСТУ 4386) і в 1 М розчині хлориду натрію (з 10^{-4} моль/л натрію), підкисленого соляною кислотою до рН 5, що містить в 1 л 0,6 г трилону Б. Вивчення спільного впливу ультразвуку та органічних розчинників на величину аналітичного сигналу

проводили шляхом вимірювання потенціалу фторидного електроду в 10 % розчині етанолу згідно з рекомендаціями, викладеними в [10], з впливом і без впливу ультразвуку.

3. Результати та їх обговорення

Як виходить із результатів дослідів, що містяться у таблиці 1, кількісне іонометричне визначення фторид-іонів в розчинах кухонної солі без попередньої обробки розчину для переведення фторид-іонів в електрохімічно активні форми не є можливим.

Таблиця 1 – Результати визначення фторид-іонів у водах та кухонній солі

Об'єкт аналізу	Введено фторид-іонів, мг/л	Знайдено фторид-іонів, мг/л / Sr (n=6, p=0,95)	
		За запропонованою методикою	За фотометричною методикою [1]
Без руйнування органічних речовин			
Річкова вода, р.Солониця	0	0,243/0,066	0,314/0,035
	0,50	0,724/0,054	0,795/0,037
Геничеський солезавод	0	0,371/0,064	0,422/0,044
	0,50	0,850/0,063	0,930/0,046
Кухонна сіль, ДП «Артемсіль»	0	0,163/0,067	0,201/0,039
	0,50	0,642/0,057	0,712/0,044
З обробкою аналізованих проб кип'ятінням з персульфатом амонію в кислому середовищі			
Річкова вода, р.Солониця	0	0,383/0,091	0,402/0,072
	0,50	0,842/0,100	0,921/0,074
Геничеський солезавод	0	0,450/0,093	0,470/0,082
	0,50	0,901/0,111	0,910/0,080
Кухонна сіль, ДП «Артемсіль»	0	0,273/0,094	0,253/0,075
	0,50	0,742/0,102	0,760/0,080
З обробкою аналізованих проб дією ультразвуку			
Річкова вода, р.Солониця	0	0,410/0,065	0,430/0,052
	0,50	0,921/0,068	0,930/0,053
Геничеський солезавод	0	0,462/0,065	0,472/0,051
	0,50	0,940/0,069	0,965/0,045
Кухонна сіль, ДП «Артемсіль»	0	0,261/0,070	0,254/0,044
	0,50	0,742/0,074	0,762/0,060

Для переведення сполук фтору в електрохімічно активні форми запропоновано обробляти розчини кухонної солі ультразвуком частотою 18-44 кГц, інтенсивністю щонайменше 10 Вт/см² протягом 1 хв (рис. 1). Під дією ультразвуку змінюється структура розчинів [1], що призводить до зміни їх фізико-хімічних характеристик, зокрема густини, в'язкості, провідності [7]. Крім того, попередня обробка розчинів хлориду натрію ультразвуком інтенсивністю більше 5 Вт/см² викликає збільшення швидкості поширення ультразвуку залежно від концентрації (рис. 2), що також свідчить про структурні зміни в розчинах хлориду натрію, викликаних дією ультразвуку.

Встановлено також, що попередня обробка розчинів хлориду натрію та кухонної солі ультразвуком призводить до збільшення величини

аналітичного сигналу фторид-іонів, розширення лінійної області градуального графіка з 10^{-5} до $3,5 \cdot 10^{-7}$ М (табл.2), скорочення часу відгуку електроду в розчинах, що містять 10^{-5} М фторид-іонів з 10-12 хв до 2-3 хв (табл. 3). Вочевидь, що вищевикладені експериментальні факти можна пояснити лише структурними змінами розчинів під впливом ультразвуку [7].

Поліпшення метрологічних характеристик іонометричних вимірювань при використанні ультразвукової пробопідготовки, порівняно із застосуванням методів хімічного окиснення (табл. 1), можна пояснити не тільки зменшенням втрат обумовленого елемента і зменшенням забруднення розчинів, що використовуються, домішками із застосуванням реагентів, але і ультразвуковим очищенням електроду [7].

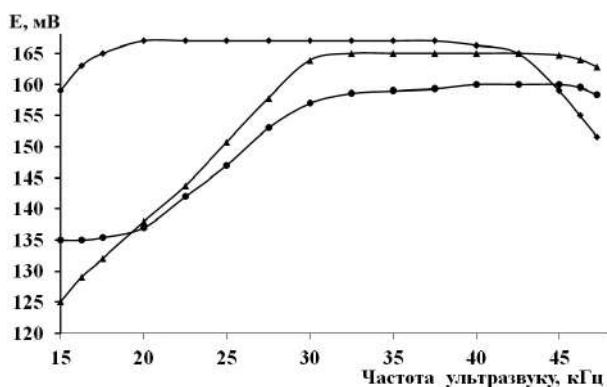


Рис. 1 – Залежність величини аналітичного сигналу фторид-іонів від частоти (1), інтенсивності (2) та часу впливу УЗ (3)

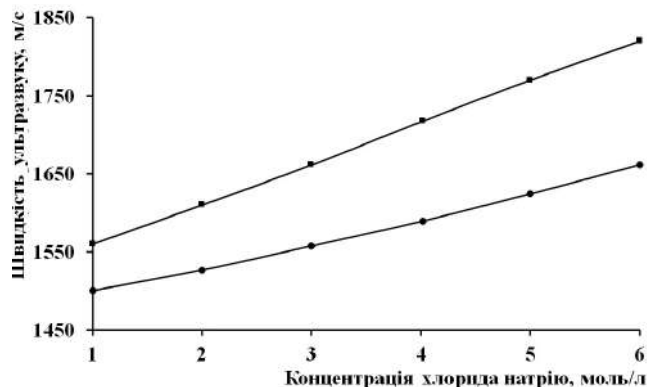


Рисунок 2 – Залежність швидкості поширення ультразвуку від концентрації хлориду натрію в розчинах (1 – розчин хлориду натрію, не оброблений ультразвуком; 2 – розчин хлориду натрію, оброблений ультразвуком)

Вплив ультразвуку на водно-етанольні розчини призводить лише до незначного підвищення чутливості визначення (рис. 3, табл. 2). При цьому, частота ультразвуку в діапазоні 18-44 кГц практично не впливає на величину аналітичного сигналу (табл.

2.), збільшення інтенсивності УЗ від 1 до 3 Вт/см² призводить до незначного зростання величини аналітичного сигналу, а підвищення понад 5 Вт/см² (табл. 2) – до його зниження, що пов'язано, вочевидь, з руйнуванням етанолу під впливом ультразвуку [7, 9].

Таблиця 2 – Вплив ультразвуку на величину аналітичного сигналу фторид-іонів

Величина аналітичного сигналу, мВ							
Частота УЗ, кГц	З дією ультразвуку						Без УЗ
	Інтенсивність ультразвуку, Вт/см ²						
	1	3	5	6	10	12	
Фон – 1 М цитратний буферний розчин							
18	139	150	168	170	169	171	141
22	139	148	168	167	171	170	141
44	137	136	166	167	168	171	141
47	132	133	157	160	166	165	141
Фон – 1 М розчин хлориду натрію							
18	150	156	160	161	162	161	132
22	148	156	158	160	160	161	132
44	144	154	156	157	160	161	132
47	142	147	153	154	155	157	132
Фон – 1 М цитратний буферний розчин + етанол до 10 %							
18	185	190	165	167	171	171	181
22	185	190	165	167	170	171	181
44	183	187	165	166	171	170	181
47	184	188	159	161	164	166	181
Фон – 1 М розчин хлориду натрію + етанол до 10 %							
18	180	181	161	161	161	161	177
22	180	181	160	160	161	161	177
44	181	181	161	156	156	160	177
47	179	178	157	153	153	156	177

Представлені усереднені результати шести дослідів. Час дії УЗ 1 хв. Концентрація фториду натрію 10⁻⁴ моль/л. Таким чином, в результаті проведених досліджень показано, що застосування ультразвуку в

іонометрії сприяє підвищенню експресності, чутливості та поліпшенню відтворюваності результатів аналізу.

Межа виявлення фторид-іонів у водах складала 0,007 мг/л, у кухонній солі – 1,2×10⁻⁵ %.

Таблиця 3 – Вплив ультразвукової обробки розчинів на час відгуку електроду EF-YI

Склад розчинів	Час відгуку електроду EF-YI, хв.
Без попередньої обробки ультразвуком	
Стандартний електроліт по ДСТУ 4386 (СЕ); 10^{-5} М NaF СЕ и 10^{-4} М NaF	10 4
Хлорид натрію 1 моль/л, що містить 0,6 г трилону Б, 10^{-5} М NaF, підкислений соляною кислотою до рН 5	12
Хлорид натрію 1 моль/л, який містить 0,6 г трилону Б, 10^{-4} М NaF, підкислений соляною кислотою до рН 5	6
З попередньою обробкою ультразвуком	
Стандартний електроліт по ДСТУ 4386 (СЕ); 10^{-5} М NaF СЕ и 10^{-4} М NaF	4 2
Хлорид натрію 1 моль/л, що містить 0,6 г трилону Б, 10^{-5} М NaF, підкислений соляною кислотою до рН 5	5
Хлорид натрію 1 моль/л, який містить 0,6 г трилону Б, 10^{-4} М NaF, підкислений соляною кислотою до рН 5	3

Методика визначення фторид-іонів у водах. До реактора з водяною сорочкою, що дозволяє підтримувати температуру $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, доливають 20 мл досліджуваної води, 10 мл ацетатно-цитратного буферного розчину з рН $(5,0 \pm 0,2)$, занурюють електроди та впливають УЗ – частотою 22 кГц, інтенсивністю 5 Вт/см^2 протягом 1 хв. Визначають значення потенціалу, що встановився в мілівольтах. Далі за градувальним графіком знаходять величину рF, а потім рF перераховують у міліграмах на літр.

Методика визначення фторид-іонів у розчинах кухонної солі. До реактора з водяною сорочкою, що дозволяє підтримувати температуру $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, доливають 20 мл досліджуваного 1 М розчину кухонної солі, занурюють електроди та впливають УЗ – частотою 22 кГц, інтенсивністю 5 Вт/см^2 протягом 1 хв. Визначають значення потенціалу, що встановився в мілівольтах. Далі за градувальним графіком знаходять величину рF, а потім рF перераховують у міліграмах на літр

4. Висновок

Вивчено використання ультразвуку при іонометричному визначенні фторид-іонів у водах та розчинах кухонної солі з використанням попередньої обробки розчину ультразвуком. Експериментально встановлені оптимальні параметри ультразвуку – частота 18... 44 кГц, інтенсивність $\geq 10 \text{ Вт/см}^2$ протягом часу ≥ 1 хв. Показано, що попередня обробка розчину ультразвуком знайдених параметрів призводить не тільки до очистки електроду від плівок органічних речовин, але і до збільшення величини аналітичного сигналу фтору, розширення лінійної області градувального графіка з 10^{-5} до $3,5 \cdot 10^{-7}$ М, скорочення часу відгуку електроду в розчинах, що містять 10^{-5} М іонів фтору з 10-12 хв до 2-3 хв. Показано, що знайдені експериментальні факти можна пояснюють структурними змінами розчинів під впливом ультразвуку. Розроблена методика визначення вмісту фторид-іонів у розчинах кухонної солі та водах.

Межа виявлення фторид-іонів у водах складала $0,007 \text{ мг/л}$, у кухонній солі – $1,2 \cdot 10^{-5} \%$.

Список літератури

1. Юрченко О.І., Черножук Т.В., Пателеймонов 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.
2. Unified methods of water analysis. Ed. Yu.Yu.Lurie - 2nd ed., corrected - M., "Chemistry", 1973 - 376 p.
3. W John Williams Handbook of Anion Determination October 22, 2013; Length, 622 pages. ISBN: 9781483176741
4. Massoud Amanlou, Maedeh Hosseinpour, Homa Azizian Determination of Fluoride in the Bottled Drinking Waters in Iran. *Iran J Pharm Res.* 2010 Winter; 9(1):37–42. PMID: 24363704 PMID: PMC3869560
5. Joaquim A. Nóbrega, George L. Donati Microwave-Assisted Sample Preparation for Spectrochemical Analysis *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation. New York. 2024.345 p.* DOI:10.1002/9780470027318.a9185.pub2
6. Franz Hallwirth An improved digestion coil arrangement for high-pressure microwave-assisted flow digestion (2023) *Journal of Analytical Atomic Spectrometry.* 38(11) DOI:10.1039/D3JA00242J
7. Oleg Yurchenko, Alexander Baklanov, Tatyana Chernozhuk 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.
8. H. M. Kingston, Lois. B. Jassie Introduction to Microwave Sample Preparation: Theory and Practice (ACS Professional Reference Book). American Chemical Society 1998. 345 p. ISBN-13978-0841214507
9. Yurchenko O.I., Chernozhuk T.V., Baklanov A.N., Cherginets V.L. Sonoluminescence Spectroscopy for the Analysis of Natural Brine. *Analytical Letters.* 2023. 3, P. 1-7. <https://doi.org/10.1080/00032719.2023.2273906>
10. Midgley D., Torrens K. Potentiometric analysis of water, *New York*, 1983, 516 p.

Надійшла (Received) 27.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 21.11.2024

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. Karazin, e-mail: i.shevchenko@karazin.ua, ORCID: 0009-0002-6944-4016

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

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

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

Ionometric determination of fluoride ions in water and solutions of table salt using ultrasound

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

Abstract

The use of ultrasound in the ionometric determination of fluoride ions in water and kitchen salt solutions with the use of preliminary ultrasound treatment of the solution was studied. Experimentally established optimal parameters of ultrasound - frequency 18-44 kHz, intensity ≥ 10 W/cm² for a time ≥ 1 min. It is shown that pretreatment of the solution with ultrasound of the parameters found leads not only to the cleaning of the electrode from films of organic substances, but also to an increase in the magnitude of the analytical fluoride ions signal, an expansion of the linear region of the calibration graph from 10^{-5} to $3.5 \cdot 10^{-7}$ M, a reduction response time of the electrode in solutions containing 10^{-5} M fluorine ions from 10-12 min to 2-3 min. It is shown that the found experimental facts can be explained by structural changes of solutions under the influence of ultrasound. A technique for determining the content of fluoride ions in common salt solutions and water has been developed.

The detection limit of fluoride ions in water was 0.007 mg/l, in table salt – $1.2 \cdot 10^{-5}\%$.

Key words: fluoride ions, ionometric determination, kitchen salt, water, ultrasound, relative standard deviation, electrode.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ КОЛОРИМЕТРІЇ В МЕДИЦИНІ

Ю.Є. Хорошайло, І.К. Сезонова, О.В. Дегтярьов, М.В. Корбецький, П.М. Білецький

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Анотація

Дослідження можливості використання колориметрії у медицині мають на меті використання сучасних методів та приладів для діагностики концентрації речовин у природних розчинах. Колориметрія як метод вимірювання концентрації речовин базується на здатності розчинів певних речовин змінювати колір при різних концентраціях. Метод дозволяє кількісно визначити концентрацію речовини, виходячи з інтенсивності кольору, яку фіксує прилад — колориметр. Основні принципи колориметрії включають спектрофотометрію, застосування закону Бугера-Ламберта-Бера, калібрування приладу, вибір довжини хвилі, оцінку поглинання світла і порівняння з еталонами. В роботі наведено основні аспекти і принципи колориметричного аналізу, які мають важливе значення для отримання точних результатів.

Ключові слова: колориметрія, концентрація речовини, електронний колориметр, лабораторні дослідження

1. Вступ

Електронна колориметрія – це сучасний метод вимірювання концентрації речовин за допомогою кольорових характеристик. Це одна з важливих методик, яка активно використовується в медицині для діагностики та моніторингу різноманітних станів пацієнтів [1-7].

Сутність колориметрії полягає в аналізі кольору, який поглинає або відбиває речовина при певній довжині хвилі світла. Відповідно, інтенсивність кольору є показником концентрації певних речовин. З розвитком електронних технологій та обладнання цей метод став ще більш точним, швидким та доступним для медичних закладів, що значно покращило якість і швидкість надання медичних послуг.

Перші спроби застосування колориметрії були пов'язані з хімічними дослідженнями та аналізами розчинів, коли дослідники помітили зв'язок між кольором розчину та концентрацією певної речовини в ньому. Згодом виникла необхідність у точному визначенні концентрацій розчинів, що стимулювало розвиток інструментів для вимірювання інтенсивності кольору.

В кінці XVIII – початку XIX століття закладено основи теорії поглинання світла різними речовинами. Важливим відкриттям стало встановлення закону Бугера-Ламберта-Бера, який описує залежність поглинання світла від концентрації розчину та товщини шару речовини. Цей закон став фундаментом для створення колориметричних методів кількісного аналізу, оскільки дозволяв визначати концентрацію речовин, вимірюючи інтенсивність поглинання світла.

Мета статті. Дослідження можливості використання колориметрії у медицині базується на її основних методах та законах.

Колориметрія як метод вимірювання концентрації речовин базується на здатності розчинів певних речовин змінювати колір при різних концентраціях. Метод дозволяє кількісно визначити концентрацію речовини, виходячи з інтенсивності кольору, яку фіксує прилад –

колориметр. Основні принципи колориметрії включають спектрофотометрію, застосування закону Бугера-Ламберта-Бера, калібрування приладу, вибір довжини хвилі, оцінку поглинання світла і порівняння з еталонами. Нижче наведено основні аспекти і принципи колориметричного аналізу, які мають важливе значення для отримання точних результатів.

2. Виклад основного матеріалу.

Закон Бугера-Ламберта-Бера, відомий також як закон Бера, є одним із фундаментальних законів оптики і хімічного аналізу, що описує, як світло поглинається речовинами у розчині. Він встановлює математичну залежність між концентрацією розчину, довжиною шляху світла через розчин та інтенсивністю світла, яке пройшло через розчин. Основна формула закону виглядає так:

$$A = \alpha \cdot c \cdot l, \quad (1)$$

де A – оптична густина (або поглинання) розчину, що є логарифмічною мірою зменшення інтенсивності світла після проходження через розчин; α – молярний коефіцієнт поглинання (також відомий як молярна абсорбційна здатність), що залежить від природи речовини та довжини хвилі світла, яке використовується в аналізі; c – концентрація речовини в розчині (зазвичай вимірюється в молях на літр, або моль/л); l – довжина шляху, яку проходить світло через розчин (виражається в сантиметрах).

Закон Бугера-Ламберта-Бера стверджує, що оптична густина пропорційна як концентрації речовини в розчині, так і довжині шляху, який проходить світло через цей розчин. Іншими словами, чим вище концентрація речовини або довжина шляху світла, тим більше світло поглинається, і тим менше його виходить з іншого боку розчину (рис.1).

Цей принцип є особливо важливим для визначення концентрації речовин у розчинах за допомогою фотометричних методів. За відомої

довжини шляху та молярного коефіцієнта поглинання можна точно визначити концентрацію речовини, просто вимірявши поглинання світла розчином.

Закон Бугера-Ламберта-Бера широко використовується у колориметрії та спектрофотометрії для визначення концентрації певних речовин у розчині. Наприклад, у медичних лабораторіях він дозволяє визначити рівень глюкози, холестерину, білка та інших показників у біологічних рідинах.

Знання молярного коефіцієнта поглинання для певної речовини дозволяє використовувати цей закон для перевірки її чистоти.

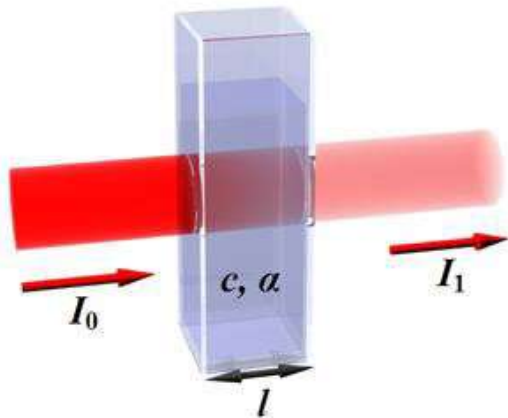


Рис.1 Ілюстрація закону Бугера-Ламберта-Бера
(I_0 – інтенсивність вхідного потоку, I_1 – інтенсивність вихідного потоку)

Закон також використовується для аналізу концентрації шкідливих речовин у воді, повітрі та інших зразках довкілля.

Але вищезазначений закон працює коректно лише за певних умов:

1. Однорідність розчину: Розчин повинен бути однорідним, без завислих частинок, які можуть розсіювати світло.

2. Відсутність флуоресценції та хімічних реакцій: Речовина не повинна флуоресціювати або вступати у хімічні реакції під впливом світла.

3. Лінійність у певних межах концентрацій: Закон працює лінійно лише в обмеженому діапазоні концентрацій. При надто високих концентраціях виникає відхилення від лінійної залежності, і точність аналізу знижується.

У колориметрії використовується видиме світло, яке проходить через розчин, що поглинає частину світла залежно від концентрації речовини. Поглинання світла залежить від довжини хвилі світла і природи речовини, тобто її здатності поглинати світлову енергію. Чим більша концентрація речовини в розчині, тим більша частка світла буде поглинена, і тим інтенсивнішим буде колір розчину. У колориметричному аналізі вимірюється оптична густина або поглинання світла (A), яка зростає зі збільшенням концентрації розчину.

Закон Бугера-Ламберта-Бера є одним з ключових принципів у колориметрії, оскільки встановлює кількісну залежність між концентрацією речовини в розчині та поглинанням світла.

Вибір довжини хвилі, на якій проводиться вимірювання, є важливим етапом у колориметрії, оскільки різні речовини поглинають світло з різною ефективністю на різних довжинах хвиль. Щоб отримати максимально точні результати, у колориметрії вибирають довжину хвилі, на якій досліджувана речовина має максимальне поглинання світла. Це дозволяє підвищити чутливість методу та зменшити можливість виникнення похибок.

Для отримання точних і відтворюваних результатів необхідно правильно калібрувати колориметр. Калібрування проводять за допомогою еталонного зразка або серії стандартних розчинів відомої концентрації. Калібрування допомагає налаштувати прилад так, щоб він правильно інтерпретував зміни кольору розчину. Після цього будується калібрувальна крива, яка відображає зв'язок між концентрацією речовини та оптичною густиною. Згодом, при вимірюванні проб, отримані дані порівнюють з калібрувальною кривою, що дає можливість визначити концентрацію досліджуваної речовини.

Для точного визначення концентрації речовин у розчинах часто використовуються еталонні зразки або розчини з відомою концентрацією. Це дозволяє оцінити, наскільки інтенсивно забарвлений досліджуваний розчин порівняно з еталоном, і, таким чином, визначити його концентрацію. Процедура порівняння з еталоном базується на лінійності між концентрацією речовини і поглинанням світла.

Оскільки вимірювання можуть піддаватися впливу факторів, таких як освітлення, температура та чистота кювети, важливо дотримуватися належних лабораторних умов. Для забезпечення точності й відтворюваності результатів рекомендується:

1. Перевіряти прилад перед кожним вимірюванням.
2. Використовувати свіжоприготовлені розчини.
3. Чистити кювету перед вимірюванням, щоб уникнути забруднення.
4. Отримуватись однакової товщини шару (кювети) для всіх вимірювань.

Метод колориметрії має деякі обмеження. Наприклад, він може бути неефективним для складних багатокомпонентних сумішей, де різні компоненти мають перекривні спектри поглинання. Також у разі надто високих концентрацій виникають нелінійні відхилення, що може призвести до похибок. У таких випадках розчини розбавляють до концентрації, яка забезпечує лінійну залежність за законом Бугера-Ламберта-Бера. Ще одним обмеженням є чутливість методу до чистоти розчину і стабільності умов вимірювання.

Особливу увагу при дослідженні питання щодо використання колориметричних методів в медицині доцільно приділити автоматизації процесів вимірювання.

Сучасні колориметри оснащені програмним забезпеченням, яке може автоматично обробляти та зберігати результати вимірювань, що дозволяє швидше отримувати і аналізувати дані. Деякі прилади можуть також автоматично визначати максимальну довжину хвилі поглинання, що робить процес ще більш зручним.

Колориметрія є важливим інструментом у медичній діагностиці, оскільки дозволяє швидко та точно визначити концентрації біохімічних речовин у рідинах організму. Метод базується на вимірюванні інтенсивності кольору розчину, що дає змогу оцінити кількість певної речовини у зразку. У медицині колориметрія застосовується в таких основних галузях, як клінічна біохімія, лабораторна діагностика, визначення рівня гормонів та моніторинг лікувального процесу. Завдяки високій точності і швидкості колориметричні методи набули широкого застосування в медичних лабораторіях.

Клінічна біохімія

Колориметрія є важливим інструментом у медичній діагностиці, оскільки дозволяє швидко та точно визначити концентрації біохімічних речовин у рідинах організму. Метод базується на вимірюванні інтенсивності кольору розчину, що дає змогу оцінити кількість певної речовини у зразку. У медицині колориметрія застосовується в таких основних галузях, як клінічна біохімія, лабораторна діагностика, визначення рівня гормонів та моніторинг лікувального процесу. Завдяки високій точності і швидкості колориметричні методи набули широкого застосування в медичних лабораторіях.

Лабораторна діагностика та скринінг

Колориметрія використовується в багатьох лабораторних тестах, які допомагають швидко діагностувати різні захворювання, оцінюючи вміст таких компонентів, як креатинін, сечовина, кальцій, фосфати та амінокислоти в сечі, крові та інших біологічних рідинах. Наприклад, колориметрія є основним методом для визначення рівня креатиніну в сироватці крові, що є важливим показником функції нирок.

Іншою поширеною практикою є використання колориметричних тестів у скринінгу – масовому обстеженні населення на наявність захворювань, наприклад, на анемію. За допомогою колориметрії легко виявити недостатність заліза в крові, що дозволяє швидко діагностувати залізодефіцитну анемію та призначити відповідне лікування.

Прикладом автоматизації такого типу досліджень є колориметр серії Checker Hanna HI716 для визначення бромю.

Визначення рівня гормонів

Колориметрія є зручним інструментом для визначення рівня деяких гормонів у крові, які можуть впливати на ендокринну систему організму. Зазвичай для таких досліджень використовуються імуноферментні методи з колориметричним визначенням, які дозволяють точно вимірювати рівень гормонів, таких як інсулін, тироксин, кортизол, що є важливим у діагностиці ендокринних захворювань. За допомогою колориметрії також можна моніторити гормональні зміни в організмі під час вагітності або гормональної терапії.

Вимірювання рівня кисню в крові

Оксиметрія, одна з форм колориметрії, застосовується для вимірювання рівня насичення крові киснем, що є важливим показником при захворюваннях дихальної системи, серцево-судинних патологіях та у пацієнтів, які перебувають на інтенсивному лікуванні. Пульсоксиметри використовують цей принцип, фіксуючи відмінності в кольорі оксигенованої та дезоксигенованої крові і таким чином обчислюючи рівень кисню.

Оцінка ефективності лікування та моніторинг стану пацієнтів

Колориметрія також є корисною для моніторингу динаміки лікування пацієнтів. Наприклад, пацієнти, які проходять лікування антибіотиками або протиракову терапію, потребують регулярного контролю за рівнем певних біомаркерів у крові.

Колориметричні тести дозволяють швидко оцінити концентрацію цих маркерів і таким чином коригувати терапію. Крім того, контроль рівня специфічних ферментів у крові дозволяє моніторити ефективність лікування печінки та інших органів.

Основними перевагами колориметрії є точність вимірювань, висока чутливість, швидкість аналізу, простота в експлуатації та відносно низька вартість обладнання та реагентів. У медичних дослідженнях колориметрія дозволяє визначити концентрації речовин у біологічних рідинах, таких як кров, сеча, слина, що має вирішальне значення для діагностики захворювань. Розглянемо основні переваги цього методу.

Точність і відтворюваність результатів

Колориметрія забезпечує високу точність результатів, оскільки метод базується на об'єктивних вимірюваннях інтенсивності кольору, які безпосередньо пов'язані з концентрацією досліджуваної речовини. Завдяки закону Бугера-Ламберта-Бера можна отримати чітку залежність між інтенсивністю забарвлення розчину та концентрацією речовини. Це дозволяє проводити повторювані аналізи, результати яких залишаються стабільними за умови дотримання лабораторних стандартів, правильного калібрування приладу та використання якісних реагентів.

Точність методу також підвищується завдяки його високій чутливості до мінімальних змін інтенсивності світла, що дозволяє вимірювати навіть невеликі концентрації. Це особливо важливо у медицині для діагностики захворювань, де необхідно мати точні дані про концентрацію специфічних біомаркерів або медикаментів у крові.

Висока чутливість

Колориметрія забезпечує високу чутливість методу, що дозволяє визначати навіть дуже малі концентрації речовин у розчинах. Наприклад, у медичних дослідженнях цей метод дає можливість вимірювати рівень гормонів, ферментів, білків або глюкози в крові, навіть коли їх концентрації мінімальні. Це важливо для ранньої діагностики захворювань та моніторингу стану пацієнтів, а також для відстеження ефективності лікування. Завдяки чутливості методу колориметрія використовується для виявлення навіть невеликих відхилень від норми, що може бути критичним для своєчасного лікування.

Швидкість проведення аналізу

Однією з найбільших переваг колориметрії є швидкість, з якою можна отримати результати аналізу. Колориметричні методи дозволяють за кілька хвилин визначити концентрацію речовин, що є особливо важливим у медичних лабораторіях, де часто потрібні результати «тут і зараз». Наприклад, у випадках екстреної діагностики (при підозрі на інфаркт, шоківий стан або отруєння) швидкість аналізу є вирішальним фактором, оскільки дає можливість лікарям оперативно приймати рішення та починати лікування.

Крім того, швидкість і простота виконання аналізу зменшують час очікування результатів і дозволяють проводити більшу кількість тестів за короткий період, що підвищує ефективність роботи лабораторій.

Простота в експлуатації

Колориметричні аналізи виконуються за допомогою відносно простого у використанні обладнання, яке не потребує спеціальних навичок для базового обслуговування. Колориметри та спектрофотометри легко налаштовуються та мають зрозумілі інтерфейси для проведення вимірювань, що дозволяє медичним працівникам швидко навчитися роботі з приладами. Це важливо в умовах, де необхідне оперативне проведення тестів і обслуговування великої кількості пацієнтів.

Додатковою перевагою є можливість автоматизації процесу: сучасні колориметри оснащені програмним забезпеченням, яке допомагає автоматично обробляти, зберігати та аналізувати результати. Це не лише знижує ймовірність людської помилки, але й значно спрощує обробку даних у великих лабораторіях.

Низька вартість

Колориметрія є одним із найбільш економічно вигідних методів аналізу, що робить її доступною для більшості медичних лабораторій. Самі колориметри

та реагенти мають відносно невисоку вартість порівняно з іншими методами, такими як хроматографія чи мас-спектрометрія. Крім того, реагенти, необхідні для проведення колориметричних аналізів, зазвичай є недорогими і широко доступними, що дозволяє знизити загальні витрати на діагностику та зберігати бюджет медичних установ.

Низька вартість аналізу є особливо важливою для клінічних та діагностичних центрів, що обслуговують великі групи населення, де щодня потрібна велика кількість тестів для пацієнтів. Колориметрія, таким чином, забезпечує економічну доцільність у поєднанні з високою точністю і надійністю.

Універсальність застосування

Колориметрія є універсальним методом, який може бути використаний для аналізу різних зразків — від біологічних рідин (кров, сеча) до фармацевтичних препаратів та хімічних реактивів. Це розширює спектр її застосування і дозволяє використовувати її у різних медичних та наукових галузях. У медицині колориметричні методи дозволяють визначати концентрації багатьох життєво важливих компонентів, що мають значення для діагностики і контролю різних станів.

Хоча колориметрія має багато переваг і широко використовується в медичній діагностиці та аналізах, цей метод не є ідеальним і має певні обмеження та недоліки. Важливо розуміти ці недоліки, оскільки вони можуть вплинути на точність результатів і, відповідно, на діагностику та лікування пацієнтів. Нижче розглянемо основні недоліки колориметрії.

Чутливість до зовнішніх факторів

Одним із найбільших недоліків колориметрії є чутливість до зовнішніх умов. Параметри, такі як температура, освітлення та чистота кювети, можуть суттєво вплинути на результати аналізу. Наприклад, зміна температури може викликати зміни у швидкості реакції між реагентами, що, в свою чергу, вплине на інтенсивність кольору і, відповідно, на вимірювання. Також, якщо кювети або посуд, що використовуються для аналізу, не очищені, це може призвести до забруднень, які спотворять результати. Лабораторії повинні дотримуватися суворих протоколів контролю умов, щоб звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів на результати.

Необхідність у калібруванні

Для досягнення точних результатів колориметричні вимірювання потребують регулярного калібрування приладів. Калібрування зазвичай проводиться за допомогою стандартних розчинів відомої концентрації. Неправильне або нерегулярне калібрування може призвести до значних похибок у результатах. Це вимагає додаткових витрат часу і ресурсів на регулярну перевірку і калібрування, що може бути обтяжливим, особливо в умовах з великою завантаженістю.

Обмеження в аналізі складних сумішей

Колориметрія має певні обмеження при аналізі складних сумішей, які містять кілька компонентів з різними спектрами поглинання. У таких випадках результати можуть бути спотвореними через накладення піків поглинання, що ускладнює інтерпретацію даних. Наприклад, у біологічних рідинах, де можуть бути присутніми кілька різних білків, специфічні реакції з одним з них можуть бути заважені іншими компонентами, що призводить до неточності вимірювань. Для вирішення цієї проблеми можуть бути використані більш складні методи аналізу, такі як хроматографія або мас-спектрометрія, але вони часто є дорогими і вимагають більше часу на аналіз. Реакції між реагентами, що, в свою чергу, вплине на інтенсивність кольору і, відповідно, на вимірювання. Також, якщо кювети або посуд, що використовуються для аналізу, не очищені, це може призвести до забруднень, які спотворюють результати. Лабораторії повинні дотримуватися суворих протоколів контролю умов, щоб звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів на результати.

Необхідність у калібруванні

Для досягнення точних результатів колориметричні вимірювання потребують регулярного калібрування приладів. Калібрування зазвичай проводиться за допомогою стандартних розчинів відомої концентрації. Неправильне або нерегулярне калібрування може призвести до значних похибок у результатах. Це вимагає додаткових витрат часу і ресурсів на регулярну перевірку і калібрування, що може бути обтяжливим, особливо в умовах з великою завантаженістю.

Обмеження в аналізі складних сумішей

Колориметрія має певні обмеження при аналізі складних сумішей, які містять кілька компонентів з різними спектрами поглинання. У таких випадках результати можуть бути спотвореними через накладення піків поглинання, що ускладнює інтерпретацію даних. Наприклад, у біологічних рідинах, де можуть бути присутніми кілька різних білків, специфічні реакції з одним з них можуть бути заважені іншими компонентами, що призводить до неточності вимірювань. Для вирішення цієї проблеми можуть бути використані більш складні методи аналізу, такі як хроматографія або мас-спектрометрія, але вони часто є дорогими і вимагають більше часу на аналіз.

Складність в роботі з певними зразками

Деякі зразки можуть бути важкими для аналізу за допомогою колориметрії. Наприклад, в'язкі або мукозні рідини можуть ускладнити вимірювання, оскільки в них можуть бути труднощі з розчиненням реагентів або з досягненням однорідності зразка. У таких випадках може знадобитися попередня підготовка зразків, що додає додатковий етап у процесі аналізу та підвищує ймовірність помилок.

Вартість реагентів і витратних матеріалів

Хоча загальні витрати на колориметричний аналіз можуть бути нижчими, ніж на інші методи, вартість певних реагентів і витратних матеріалів може бути значною, особливо якщо мова йде про високоякісні стандарти або специфічні реактиви для складних аналізів. У разі великих обсягів тестувань це може стати серйозною статтею витрат, яка потребує уваги з боку керівництва лабораторій.

У 1930-х роках був розроблений перший електронний колориметр, який став справжнім проривом у цій галузі. Цей прилад дозволяв більш точно вимірювати інтенсивність поглинання світла і проводити аналіз у автоматичному режимі, що значно підвищило точність і зручність досліджень.

Сучасний етап розвитку колориметрії характеризується появою комп'ютерних та портативних колориметрів, які здатні зберігати дані, аналізувати їх у реальному часі та інтегрувати з лабораторними системами. Сьогоднішні колориметри мають високу точність, портативність і доступність, що дозволяє використовувати їх не лише у спеціалізованих лабораторіях, але й у польових умовах та навіть вдома.

Одним з варіантів реалізації колориметричного методу контролю біологічних речовин представляє собою прилад, основною частиною якого є цифровий датчик (рис.2) [8].

Схема цифрового датчика вимірювання параметрів біологічних речовин (наприклад крові) складається з світлодіодів $HL1 - HL4$ (рис.2 - 1), трьох світлофільтрів (R, G, B) (рис.2 - 2), фотодіодів $VD1 - VD4$ (рис.2 - 3), нормувальних підсилювачів (рис.2 - 4), АЦП (рис.2 - 5), регістра стану (рис.2 - 6), мікросхеми інтерфейсу $RS-485$ (рис.2 - 7), каналу передачі даних до ЕОМ (персональний комп'ютер, мікроконтролерний пристрій тощо) (рис.2 - 8). Світлодіоди $HL1 - HL4$, фотодіоди $VD1 - VD4$ та оптичне середовище, що вимірюється, повинні розташовуватися в площинах, строго паралельних одна одній, що забезпечить відсутність похибки та паразитні віддзеркалення поверхні. Фільтри RGB не повинні перекривати світловий потік, що падає на фотодіоди для запобігання неточності в роботі датчика. Рекомендується використовувати світлодіоди $HL1 - HL4$ білого кольору з температурою 5600 К.

Для виключення похибки, у випадку вимірювання забарвленого світлового потоку, розрахунок його інтенсивності буде проводитися по емпіричній формулі

$$Y = 0,2125 \cdot R + 0,7154 \cdot G + 0,0721 \cdot B, \quad (2)$$

де 0,2125 – емпіричний коефіцієнт для червоного кольору (R); 0,7154 – емпіричний коефіцієнт для зеленого кольору (G); 0,0721 – емпіричний коефіцієнт для блакитного кольору (B).

Перевага запропонованого пристрою у порівнянні з існуючими полягає в розширенні

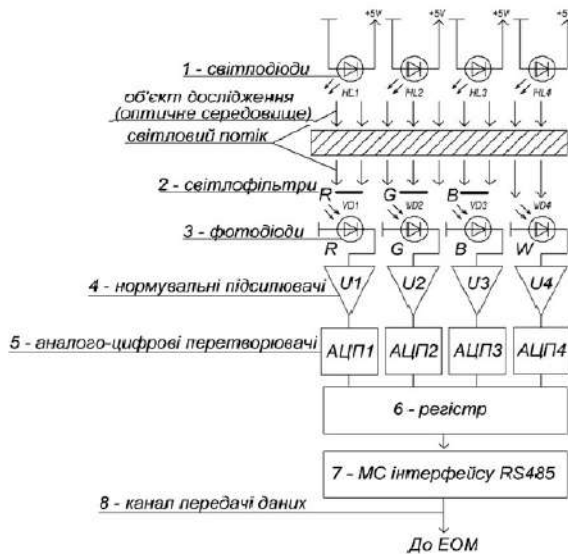


Рис. 2 – Схема цифрового датчика вимірювання параметрів біологічних речовин

функціональних можливостей цифрового датчика за рахунок додавання функції вимірювання ступеня проникності оптичних середовищ (матеріалів) світлом.

3. Висновок

Колориметрія є важливим інструментом в медичній діагностиці, надаючи можливість швидко, точно та економічно визначити

концентрації різних біомаркерів у зразках біологічних рідин. Завдяки своїм основним перевагам, таким як висока чутливість, простота використання, швидкість аналізу та економічна доцільність, колориметричні методи стали невід'ємною частиною сучасних лабораторних досліджень. Вони дозволяють медичним працівникам отримувати важливу інформацію про стан здоров'я пацієнтів, що сприяє своєчасній діагностиці та лікуванню захворювань.

Проте, незважаючи на численні переваги, колориметрія має свої недоліки, такі як чутливість до зовнішніх факторів, потреба в регулярному калібруванні та обмежена специфічність. Ці обмеження можуть вплинути на точність результатів і, відповідно, на якість медичних висновків. Тому важливо, щоб лабораторії використовували колориметрію в поєднанні з іншими методами аналізу, такими як хроматографія або імуноаналітичні тести, для досягнення найбільш надійних результатів.

В цілому, колориметрія продовжує розвиватися, і нові технології та підходи до аналізу можуть значно підвищити її ефективність і точність. Подальші дослідження та удосконалення методів колориметрії обіцяють розширити можливості цього методу, роблячи його ще більш корисним у медичних і наукових сферах. Загалом, колориметрія є цінним інструментом, який, при правильному використанні та обережності, може забезпечити важливі дані для підтримки діагностичних рішень і покращення охорони здоров'я.

Список літератури

1. Астахова А. А. (2019). Колориметричні методи аналізу в медичних дослідженнях. Київ: Медицина.
2. Шевченко Т. О. (2021). Основи біохімічної колориметрії. Львів: Наукова думка.
3. Мельничук С. В. (2020). Колориметрія в клінічній лабораторній практиці. Харків: Здоров'я.
4. Бугайчук О. В. (2018). "Принципи колориметрії та її застосування в медицині". Журнал клінічної лабораторної діагностики, 14(3), 123-130.
5. Таран Ю. М., & Ковальчук, Н. І. (2022). "Актуальні питання колориметрії в сучасній медицині". Медичний журнал України, 11(6), 45-50.
6. Павленко І. П. (2020). "Переваги та недоліки колориметричних методів". Сучасні лабораторні технології, 8(2), 78-83.
7. Зозуля, В. В., & Лисенко, Г. П. (2021). "Колориметрія: методи, можливості, обмеження". Аналіз сучасних методів досліджень, 15(1), 90-96.
8. Пат. u2016 06243 Україна, МПК G01J 3/46, G01R 21/133, G02B 5/20, F21V 9/00 Цифровий пристрій для вимірювання проникності оптичних середовищ / Хорошайло Ю.Є, Семенов С.Г, Лимаренко В.В., Єфіменко С.А.; заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. № 123529; заявлено 25.10.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4 (2018).

Надійшла (Received) 17.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 21.11.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Хорошайло Юрій Євгенійович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: yurii.khoroshailo@nure.ua, ORCID:0000-0002-4239-4357.

Yurii Khoroshailo – PhD, Head of Design and Operation of Electronic Devices Department of Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: yurii.khoroshailo@nure.ua, ORCID:0000-0002-4239-4357.

Сезонова Ірина Костянтинівна – к.т.н., доцент, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: iryna.sezonova@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9396-7434

Iryna Sezonova – PhD, associate professor, professor of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: iryna.sezonova@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9396-7434.

Дегтярьов Олександр Валентинович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: oleksandr.degtyarov@nure.ua, ORCID: 0000-00002-3187-1621.

Oleksandr Degtyarov – PhD, associate professor of Information and Measurement Technology Department, Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.degtyarov@nure.ua, ORCID: 0000-00002-3187-1621.

Корбецький Максим Вікторович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: korbetskyu.maksym@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6116-2479.

Maksym Korbetskyu – postgraduate student of Information and Measurement Technology Department, Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: korbetskyu.maksym@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6116-2479.

Білецький Павло Миколайович – аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: pavlo.biletskyi@nure.ua, ORCID: 0009-0000-6644-9669.

Pavlo Biletskyu – postgraduate student of Microelectronics, Electronic Devices and Appliance Department, Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: pavlo.biletskyi@nure.ua, ORCID: 0009-0000-6644-9669.

Research on the possibilities of using colorimetry in medicine

Yu.Ye. Khoroshailo, I.K. Sezonova, O.V. Degtyarov, M.V. Korbetskyu, P.M. Biletskyu

Abstract

Studies of the possibility of using colorimetry in medicine aim to use modern methods and devices for diagnosing the concentration of substances in natural solutions. Colorimetry as a method of measuring the concentration of substances is based on the ability of solutions of certain substances to change color at different concentrations. The method allows quantitatively determining the concentration of a substance based on the color intensity recorded by a device - a colorimeter. The basic principles of colorimetry include spectrophotometry, application of the Bouguer-Lambert-Beer law, calibration of the device, selection of wavelength, assessment of light absorption and comparison with standards. The paper presents the main aspects and principles of colorimetric analysis, which are important for obtaining accurate results.

Keywords: colorimetry, substance concentration, electronic colorimeter, laboratory research

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЛАДОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

О.С. Криницький, Б.Р. Рибчин

Івано-Франківський національний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ

Анотація

Проведено аналіз показників якості електричної енергії, які регламентовані європейськими і національними стандартами України. Досліджено фактори, які впливають на якість електричної енергії. Розглянуті прилади, які дозволяють апаратно оцінювати якість електричної енергії та їх особливості конструктивного виконання.

Ключові слова: якість електричної енергії, засоби виміральної техніки, законодавче регулювання, стандарти з якості електричної енергії.

1. Вступ

Якість електроенергії стала важливою проблемою для енергетичних систем та електричних пристроїв. Дана проблема є досить актуальною на даний час, але, незважаючи на велику кількість публікацій, термін «якість електроенергії» так і не був остаточно визначений [1]. Однак майже всі автори визнають, що це важливий аспект систем живлення, який безпосередньо впливає на ефективність експлуатації електрообладнання, його безпеку та надійність. Різні автори використовують термін «якість електроенергії» з різним фізичним змістом, зокрема він використовується як синонім до надійності та якості постачання. Аналізуючи їхні праці, можна зробити висновок, що якість електроенергії, як правило, визначає якість напруги або струму та може бути визначена із вимірювання та аналізу напруги, синусоїдальності форми сигналу та частоти.

В [2] автори розділяють джерела генерування спотворень в мережі на три категорії: малі та передбачувані (наприклад, побутові споживачі, що генерують гармоніки), великі та випадкові (наприклад, споживачі, що створюють коливання напруги) та великі передбачувані (наприклад, високопотужні споживачі, такі як промислові підприємства).

Слід також зауважити, що за статистикою понад 60% проблем з якістю електроенергії спричинені природними та непередбачуваними подіями, наприклад, це поширення грозових перенапруг, геомагнітно індуковані струми пов'язані із сонячними спалахами [3].

Також є можливі джерела, які впливають на якість електроенергії, на етапі її генерування на електростанціях, на етапі розподілу і транспортування до кінцевого споживача. Серед них можна виділити на різних етапах такі причини зниження якості електричної енергії.

На етапі генерування. Незважаючи на те, що синхронні генератори генерують майже ідеальні синусоїдальні напруги (вміст гармонік складає менше 3%), існують проблеми, пов'язані з їхнім технічним обслуговуванням і іншими подіями, які призводять до вимушених відключень споживачів.

На етапі передачі. Під час передачі типовими проблемами є: стрибок напруги (за умов сильного вітру, що призводить до перебоїв у постачанні або випадкових коливань напруги), блискавка, що призводить до різких стрибків, пробій електричних ізоляторів, провали напруги через несправності, перехідні перенапруги, спричинені різкою зміною навантаження ємнісного або індуктивного характеру, неправильна робота пристроїв автоматичного регулювання напруги, що може призвести до тривалих коливань напруги.

На етапі розподілу. Типовими проблемами, які виникають у системах розподілу, є провали, стрибки та переривання напруги, перехідні перенапруги, неправильна робота пристроїв регулювання напруги.

Кінцевий споживач також може впливати на якість електричної енергії в сучасних енергосистемах. Деякі з них можуть бути такими: гармоніки, які створені нелінійними навантаженнями, такими як приводи з регульованою швидкістю, джерела безперебійного живлення, лазерні принтери, комп'ютери; коливання частоти, коли використовуються вторинні та резервні джерела живлення, такі як дизельні генератори; неправильне застосування технологій або правил прокладання електропроводки.

Метою роботи є вивчення параметрів і факторів, які впливають на якість електричної енергії та дослідження приладів для експериментального оцінювання якості електричної енергії.

2. Виклад основного матеріалу

При дослідженні якості електричної енергії виділяють «стаціонарні» та «нестационарні» явища. У деяких нормативних документах (наприклад, IEEE-519) використовують форму хвилі (тривалість і амплітуду) для класифікації проблем якості електроенергії.

Ще одним із факторів, який може впливати на якість електричної енергії є види перехідних процесів в енергосистемі, тобто небажані чи короточасні події, які викликають спотворення в мережі. Їх характеристики та форми сигналів залежать від механізму утворення та параметрів мережі.

Перехідні процеси можна класифікувати за багатьма характерними компонентами, такими як амплітуда, тривалість, частота, фаза та форма сигналу.

літуда, тривалість, час наростання, амплітудна спектральна щільність і частота виникнення. Перехідні процеси зазвичай класифікують на дві категорії, імпульсні та коливальні [4].

Ще одним із факторів, що може впливати на якість електричної енергії є короткочасні коливання напруги. Згідно із стандартом IEEE-1159 виділяються наступні терміни: «провал напруги» та «коротке переривання». Переривання трапляється тоді, коли напруга живлення (або струм навантаження) зменшується до значення, яке є менше нижньої межі роботи протягом менше ніж 1 хвилини. Різниця між тривалою (або стійкою) перервою та перериванням є в тому, що в першому випадку подача відновлюється вручну, а під час другого – автоматично. Зазвичай, переривання вимірюється його тривалістю [5]. Наприклад, згідно з європейським стандартом EN-50160 існують такі його різновиди [6]: коротка перерва до 3 хвилин, тривала перерва, яка перевищує 3 хвилини.

На основі стандарту IEEE-1250 переривання класифікуються так: миттєве, яке становить від 0,5 до 30 циклів; короткочасне становить від 30 циклів до 2 секунд; тимчасова перерва становить від 2 секунд до 2 хвилин; тривала перерва триває більше 2 хвилин.

В Україні питання якості електричної енергії регулюються стандартами та нормативними актами. Наприклад, стандарт ДСТУ EN 50160 [6] визначає вимоги до якості електричної енергії в електричних мережах загального користування та встановлює допустимі межі для таких характеристик, як напруга та її коливання, часові коливання частоти, гармоніки, їхні рівні та інші параметри. Нормативний документ СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 [7] регулює питання якості електричної енергії в Україні. Він містить вимоги до електричних мереж, що забезпечують електричну енергію споживачам, а також критерії для контролю за якістю постачання електричної енергії. Стандарт ДСТУ ІЕС 61000 [8] відображає методи вимірювання, допустимі межі та вплив гармонік на якість електричної енергії.

Далі коротко розглянемо показники якості електричної енергії, які відображені як в Європейських, так і в Українських стандартах.

Провали (просідання) напруги. Просідання – це короткочасні зниження значень середньоквадратичної напруги. Немає чіткого визначення тривалості просідання, але зазвичай воно триває до 1 хвилини. Просідання напруги, зазвичай, виникає з таких причин:

- підключення потужних навантажень,
- одиночне замикання фаз на землю,
- перемикавання навантаження.

Кожен із цих випадків може викликати просідання з певною характеристикою за величиною та тривалістю. Для запобігання даних негативних явищ в основному використовуються джерела безперебійного живлення (ДБЖ) або стабілізатори напруги.

Перенапруга. Збільшення величини напруги на 110 - 180% від початкової (опорної напруги) називається перенапругою. Найбільш прийнятна тривалість перенапруги становить від 0,5 циклу до 1 хвилини [9]. Перенапруги зустрічаються не так часто, як просідання.

Як і у випадку просідання, ДБЖ або стабілізатори є типовими рішеннями для обмеження ефекту перенапруги.

Довготривалі зміни напруги. Відповідно до стандартів (IEEE-1159) відхилення середньоквадратичного значення напруги від номінального більше, ніж на 1 хвилину, називається довготривалою зміною напруги. Основними причинами тривалих коливань (змін напруги) є коливання навантаження та перемикавання системи. IEEE-1159 поділяє ці події на три категорії: тривале переривання, знижена напруга та перенапруга [5, 6].

Тривале переривання є найсерйознішою і найбільш тривалою подією, пов'язаною із якістю електроенергії, під час якої напруга падає до нуля і автоматично не повертається до номінального значення. Згідно із визначенням IEEE, тривалість такої перерви становить більше 3 хвилин. Кількість таких перерв є важливою характеристикою для вимірювання здатності енергосистеми надавати послуги споживачам.

Дисбаланс напруги. Якщо напруги трифазної системи не однакові за величиною або різниця фаз між ними не становить 120 градусів, виникає дисбаланс напруг [5]. Основними причинами дисбалансу напруги в енергосистемах є незбалансоване однофазне навантаження в трифазній системі.

Спотворення форми сигналу. Стаціонарне відхилення від синусоїди називається спотворенням форми сигналу. Існує п'ять основних типів спотворень сигналу: зміщення за допомогою постійного струму, гармоніки, інтергармоніки, спотворення напруги та електричний шум. Для теоретичного аналізу несинусоїдальної форми сигналу зазвичай використовується ряд Фур'є.

Зміщення за допомогою постійного струму. Наявність компонента постійного струму або напруги в системі змінного струму називається зміщенням за допомогою постійного струму. Основними причинами виникнення зміщення постійного струму в системах живлення є використання випрямлячів та інших електронних комутаційних пристроїв, а також геомагнітні збурення [7].

Основними шкідливими наслідками від наявності постійного струму в змінних мережах є:

- насичення осердя трансформатора;
- генерація парних гармонік;
- додаткове нагрівання трансформаторів, що призводить до зменшення їх терміну служби, двигунів змінного струму та електромагнітних пристроїв;
- електролітична ерозія заземлюючих електродів.

Гармоніки — це синусоїдальні напруги або струми з частотами, кратними основній частоті енергосистеми (зазвичай 50 або 60 Гц). Періодичні несинусоїдальні сигнали можуть бути піддані розкладу у ряд Фур'є та розкладені на суму основної складової та гармонік.

Основними негативними впливами гармонік є:

- підвищення похибок вимірювання контрольно-вимірювальними засобами;
- додаткові втрати в конденсаторах, трансформаторах і обертових машинах;
- додатковий шум від двигунів та іншого обладнання.

Рекомендованими рішеннями для зменшення та контролю гармонік є застосування пасивних, або активних, або гібридних фільтрів, або спеціальних пристроїв живлення [8].

Спотворення напруги. Періодичне зростання напруги, викликане мережевими комутаційними тиристорними схемами, називається спотворенням напруги. Воно виникає у формі хвилі лінійної напруги під час нормальної роботи силових електронних пристроїв, коли струм перемикається з однієї фази на іншу. Протягом цього періоду існує короткочасне замикання між двома комутуючими фазами, що знижує напругу в мережі, оскільки зниження напруги обмежується лише опором системи.

Спотворення напруги є періодичним явищем і може бути охарактеризоване його частотним спектром. Частота цього спектру є досить висока. Зазвичай неможливо виміряти його за допомогою обладнання, яке використовується для гармонічного аналізу. Спотворення напруги може створювати додаткове навантаження на ізоляцію трансформаторів, генераторів і чутливого вимірювального обладнання. Деякі стандарти (IEEE-519) встановлюють обмеження для тривалості спотворення напруги [4].

Електричні перешкоди. Електричні перешкоди визначаються як небажані електричні сигнали з широкосмуговим спектральним вмістом нижче 200 кГц [8], який накладається на напругу або струм системи живлення в фазних провідниках або нейтральних провідниках чи сигнальних лініях. Електричні перешкоди можуть виникати внаслідок неправильних з'єднань у системах передачі або розподілу, дугових печах, електропечах, силових електронних пристроях, схемах керування, зварювальному обладнанні внаслідок неправильного заземлення приводів з регульованою швидкістю. Проблему можна пом'якшити за допомогою фільтрів або трансформаторів. Електричний шум впливає на електронні пристрої, такі як мікроконтролери та програмовані контролери.

Коливання напруги – це систематичні варіації напруги або випадкові її зміни, величина яких, зазвичай, не перевищує встановлених діапазонів напруги, котрі визначено у ДСТУ EN 50160 [6]. Коливання напруги поділяються на дві категорії:

- ступеневі зміни напруги, регулярні або нерегулярні в часі;
- циклічні або випадкові зміни напруги, викликані змінами навантаження.

Коливання напруги погіршують продуктивність роботи обладнання та спричиняють нестабільність внутрішніх напруг і струмів електричного обладнання. Однак коливання напруги менше 10% не впливає на електричне обладнання.

Флікер описується як «непервні та швидкі зміни величини струму навантаження, що викликають зміни напруги». Термін “флікер” походить від впливу коливань напруги на лампи таким чином, що людське око сприймає їх мерехтіння. Причиною появи флікера є зміна частоти живлення, тобто відхилення основної частоти енергосистеми від заданого номінального значення (наприклад, 50 або 60 Гц) [10]. Якщо ба-

ланс між генерацією та попитом (навантаженням) не підтримується, частота енергосистеми буде відхилятися через зміни швидкості обертання електромеханічних генераторів. Величина відхилення та її тривалість залежать від характеристик навантаження та реакції системи керування генерацією на зміни навантаження. Несправності системи передачі електроенергії також можуть спричинити коливання частоти.

3. Обладнання для вимірювання показників якості електроенергії

Незважаючи на те, що були розроблені інструменти, які вимірюють широкий спектр показників, пов'язаних із якістю, можна використовувати кілька різних інструментів залежно від досліджуваного явища. До основних категорій приладів, які можуть бути застосовані, належать: вимірювачі параметрів заземлення, мультиметри, осцилографи, аналізатори завад, аналізатори гармонік і аналізатори спектру, комбіновані аналізатори перешкод і гармонік, вимірювачі флікера.

Осцилографи. Осцилограф є цінним під час виконання тестів у реальному часі. Перегляд форм сигналів напруги та струму може надати багато інформації про те, що відбувається, навіть без виконання детального гармонічного аналізу сигналів. Можна отримати величини напруг і струмів, шукати очевидні спотворення та виявити будь-які значні зміни в сигналах.

Аналізатори завад. Аналізатори завад утворюють категорію приладів, які були розроблені спеціально для вимірювання параметру, який характеризує якість електроенергії. Зазвичай, вони можуть вимірювати широкий спектр завад від дуже короткочасних до довготривалих. Можна встановити порогові значення та залишити прилад, щоб він фіксував порушення протягом певного періоду часу.

В основному існують дві категорії таких пристроїв.

1. Звичайні аналізатори, які підсумовують відхилення параметрів з конкретною інформацією, наприклад, такою як величини перенапруги та зниженої напруги, величина і тривалість просідання та стрибків напруги, величина і тривалість перехідних процесів тощо.
2. Графічні аналізатори, які зберігають і друкують фактичну форму сигналу разом із описовою інформацією. Часто важко визначити характеристики перехідного процесу на основі інформації, доступної з традиційних аналізаторів. Тому для детального аналізу проблеми з якістю електроенергії майже необхідно мати здатність фіксувати форму хвилі завади.

Аналізатори спектру та аналізатори гармонік. Існують, в основному, три категорії засобів для аналізу гармонік.

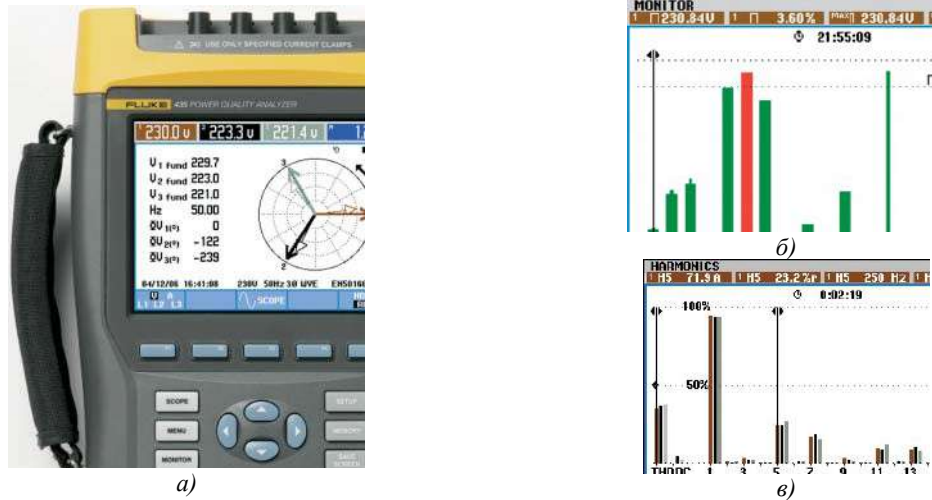
1. Прості вимірювачі для швидкої перевірки рівнів гармонік у проблемному місці.
2. Аналізатори спектру загального призначення, які застосовуються для аналізу спектру сигналів. Перевага цих засобів полягає в тому, що вони мають дуже потужні можливості для аналізу сигналів. Не-

доліком є те, що вони не розроблені спеціально для дискретизації хвилі промислової частоти і, отже, повинні використовуватися обережно, щоб забезпечити точний гармонічний аналіз.

3. Аналізатори гармонік спеціального призначення, які були розроблені спеціально для гармонічного аналізу в енергосистемах. Принцип їх роботи ґрунтується на швидкому перетворенні Фур'є з частотами дискретизації, спеціально розробленими для

визначення гармонійних компонентів у сигналах потужності

Відомим виробником засобів для вимірювання показників якості електричної енергії є компанія Fluke. Серед цих засобів можна виділити 430 серію, зокрема Fluke 435 (рис.1). Дана серія дозволяє у форматі реального часу відслідковувати стан і параметри трифазних мереж з високою точністю [11].



а) зовнішній вигляд аналізатора, б) оглядовий екран системи моніторингу, в) екран відстеження гармонік.

Рисунок 1 – Аналізатор якості енергопостачання Fluke 435 [11]

Комбіновані аналізатори завод і гармонік. Сучасні найновіші засоби поєднують функції дискретизації гармонік і моніторингу енергії з функціями повного моніторингу завод. Вихідні дані базуються на графічному вигляді, які дистанційно збираються в центральну базу даних. Після цього можна виконати статистичний аналіз даних. Один із прикладів такого засобу від фірми Dranetz є Dranetz PowerVisa. Цей засіб призначений для використання як у промисловості, так і для конкретного споживача. Він одночасно контролює трифазні напруги та струми (плюс нейтралі), що дуже важливо для діагностики проблем з якістю електроенергії. Прилад збирає необроблені дані та зберігає їх у внутрішній пам'яті для віддаленого завантаження [12].

Вимірювачі флікери (мерехтіння). Протягом багатьох років було розроблено багато різних методів вимірювання мерехтіння. Ці методи варіюються від використання дуже простих середньоквадратичних вимірювачів із калібруванням за стандартними кривими мерехтіння до складних вимірювачів, які використовують точно налаштовані фільтри та статистичний аналіз для оцінки рівня мерехтіння напруги. Існують стандарти, які містять криві мерехтіння, котрі використовуються як орієнтири для оцінки серйозності флікери в електричній системі [10].

Швидке перетворення Фур'є є одним із методів, який використовується для вимірювання флікери і полягає у взятті необроблених зразків фактичних форм

сигналів напруги та здійснює перетворення Фур'є на демодульованому сигналі (тільки сигнал флікери), щоб виділити різні частоти в даних. Потім ці дані порівнюються з кривою флікери. Цей метод більш точніше кількісно визначає виміряні дані завдяки тому, що величина та частота мерехтіння відомі.

Серед відомих вимірювачів мерехтіння можна виділити ILT710 [13]. Він дозволяє проводити вимірювання різних параметрів мерехтіння і інтенсивності освітлення та виводити отримані дані на комп'ютер.

Сучасна практика моніторингу якості електроенергії містить таку послідовність операцій: збір даних, перетворення їх на корисну інформацію, поширення її серед користувачів. Всі ці процеси відбуваються в самому засобі. Таким чином, було розроблено нове покоління моніторів якості електроенергії з інтегрованими інтелектуальними системами, які відповідають сучасним вимогам. Цей тип засобів якості електроенергії є інтелектуальними моніторами якості електроенергії, де інформація створюється безпосередньо в засобі та одразу стає доступною для користувачів.

Прикладом можуть бути інтелектуальні монітори якості електроенергії які розробляють компанії Electrotek Concepts, Dranetz, Electric Power Research Institute (EPRI). Вони забезпечують аналіз даних на місці зі швидким розповсюдженням інформації за допомогою інтернет-технологій. Вони складаються з компонентів збору і оброблення даних, комунікації, веб-візуалізації та керування.

4. Висновки

Розглянуто параметри якості електричної енергії, серед яких найважливішими є напруга, гармоніки, дисбаланс фаз, флікер. Показано, що показники якості України є гармонізованими з показниками якості європейського союзу. Наведені конкретні приклади вимірювальних засобів, які дозволяють оцінити такі параметри якості електричної енергії, такі як аналіз гармонік, спектру і завод та оцінити флікер.

Виявлена тенденція приладного забезпечення оцінювання якості електричної енергії, яка стосу-

ється того, що виробники електроенергії поєднують моніторинг якості електроенергії з управлінням системами постачання енергії, оцінкою роботи захисних пристроїв і функціями автоматизації розподілу електроенергії із загальним доступом до всієї інформації.

З врахуванням значної вартості імпортованих приладів доцільним є розроблення на наукових засадах нових підходів до створення аналогічних засобів, які були би дешевшими при тих самих функціональних можливостях.

Список літератури

1. Gerald T. Heydt Electric power quality. The Electrical Engineering Handbook. Star in a Circle Publications 1991. P.805-810. DOI:10.1016/B978-012170960-0/50059-1
2. Arrillaga J, Watson NR, Chen S. Power system quality assessment. John Wiley & Sons. 2000. P.320.
3. Kennedy BW. Power quality primer. McGraw Hill, New York. 2000. P.360.
4. Standard IEEE 519. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems
5. Standard IEEE-1159 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
6. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT)
7. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго
8. ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012 (ІЕС 61000-4-7:2009, IDT) Електромагнітна сумісність. Частина 4-7. Методики випробування та вимірювання. Загальна настанова щодо вимірювання гармонік та інтергармонік від електропостачальних систем загальної призначеності й допоміжного устаткування
9. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010 (ІЕС 61000-4-30:2008, IDT) Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії
10. ДСТУ EN 61000-4-15:2018 (EN 61000-4-15:2011, IDT; ІЕС 61000-4-15:2010, IDT) Електромагнітна сумісність. Частина 4-15. Методики випробування та вимірювання. Флікерметр. Технічні вимоги до функціонування та конструкції
11. Fluke 430 Series II Three-Phase Power Quality and Energy Analyzers Technical Data [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/Fluke-430-II-PQ-Analysers-Data-Sheet.PDF?jvpPx9LB3aVXQ4WeJmcUc5FXfjXq.ULW>
12. PowerVisa TM User's guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/PowerVisa_UsersGuide_RevB.pdf
13. Flicker and Illuminance Meter Operation Manual [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://internationalight.com/sites/default/files/downloads/ilt710_flicker_manual_final.pdf?srsId=AfmBOooaes-NYtQPHRU4KylkqmCyOMe0NKQ7leL7ZPyIVm9OwnJQl2ko

Надійшла (Received) 15.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 29.10.2024

Відомості про авторів / About the authors

Криницький Олександр Степанович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний університет нафти і газу, e-mail: oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>

Krynytskyi Oleksandr – PhD, docent Associate Professor of Information and Measurement Technology Department, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>

Рибчин Богдан Романович – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний університет нафти і газу, e-mail: rybchyn.b@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6616-2670>

Rybchyn Bohdan – postgraduate student of Information and Measurement Technology Department, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: rybchyn.b@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6616-2670>

Research on instrumentation for electrical power quality assessment

Oleksandr Krynytskyi, Bohdan Rybchyn

Abstract

An analysis of the quality indicators of electric energy regulated by European and national standards of Ukraine has been carried out. Factors that affect the quality of electric energy have been studied. Devices that allow for instrumental assessment of the quality of electric energy and their design features have been considered.

Key words: quality of electric energy, measuring instruments, legislative regulation, standards for quality of electric energy

КВАЛІМЕТРІЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ / QUALIMETRY AND QUALITY ASSURANCE

УДК 658.62.018.012

DOI: 10.30837/2663-9564.2024.2.09

КВАЛІМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПІДПРИЄМСТВА

М.М. Микійчук¹, Ю.І. Рудик², В.П. Христич³, В.В. Андрієць⁴, Д.Ю. Бондар⁴, Д.Д. Ромашкін⁴

¹Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

³Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

⁴Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

Анотація

У роботі проведено дослідження проблем забезпечення якості продукції на підприємствах та впровадження систем управління якістю відповідно до стандартів ISO серії 9000. Основну увагу приділено аналізу ефективності цих систем, зокрема визначенню причин, через які деякі підприємства, незважаючи на сертифікацію систем управління якістю, не змогли досягти поліпшення економічних показників. Зазначено, що стандарти містять вимоги щодо оцінювання результативності систем управління якістю, але не надають конкретних методів для вимірювання, що ускладнює процес об'єктивної оцінки якості. Для вирішення проблеми кількісної оцінки ефективності системи управління якістю запропоновано використання методів кваліметрії, які дозволяють перетворювати одиничні показники якості у безрозмірну шкалу. Це дає змогу більш точно оцінювати результативність процесів підприємств. Проведено детальний аналіз існуючих підходів до оцінювання якості продукції, і зроблено висновок, що такі підходи недостатньо ефективні для оцінки систем управління, оскільки вони не враховують різноманітність показників якості процесів та систем. Зроблено класифікацію процесів СУЯ на три основні групи: обов'язкові процеси (згідно зі стандартом), процеси, що забезпечують, та процеси життєвого циклу продукції. Для кожної з цих груп виділено ключові показники результативності та ефективності, що дають змогу оцінювати якість управління окремими процесами. Також запропоновано використовувати функцію бажаності Харрінгтона як інструмент для інтеграції одиничних показників якості в один узагальнений показник. Це дозволяє точно оцінювати якість процесів та їхню відповідність цілям підприємства. Розроблено метод оцінки процесів системи управління якістю, яка ґрунтується на визначенні ключових показників результативності та ефективності для кожного процесу. Запропоновано використовувати середнє геометричне значення цих показників для отримання загальної оцінки якості процесів. Це дозволяє вищому керівництву та аудиторам отримати більш об'єктивну оцінку функціонування систем управління якістю на підприємствах.

Ключові слова: кваліметрія; система управління якістю; оцінювання; процеси; функція бажаності.

1. Вступ

Забезпечення якості продукції та її постійне поліпшення є головною умовою досягати суттєвих економічних успіхів на внутрішньому і зовнішньому ринках в умовах жорсткої конкуренції. Тому останніми роками на підприємствах помітно активізувалася діяльність зі створення, впровадження та сертифікації систем управління якістю (СУЯ) на відповідність вимогам ISO серії 9000. Створення ефективної СУЯ є однією з умов підвищення конкурентоспроможності підприємств та їхньої адаптації на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Однак дослідження фахівців і практика показують, що низка підприємств, незважаючи на інтенсивну роботу з розроблення та сертифікації СУЯ, не змогли домогтися поліпшення економічних показників [1-2]. Головною причиною, що перешкоджає досягненню високих економічних результатів за рахунок розроблення, впровадження та сертифікації СУЯ, є відсутність надійного методу

кількісної оцінки ефективності розроблення, функціонування та сертифікації СУЯ на підприємствах. У стандарті ДСТУ EN ISO 9001:2018 «Системи управління якістю. Вимоги», у розділі 8, є вимоги щодо оцінювання результативності та ефективності СУЯ, але немає жодних методів і рекомендацій щодо інструментарію. Аналогічно, у стандарті ДСТУ ISO 19011:2019 «Настанови щодо проведення аудитів систем управління» є вимоги щодо оцінки СУЯ, але теж відсутні рекомендації щодо методів.

У роботі [3] досліджуються можливості використання методів кваліметрії для підтвердження відповідності продукції. Оскільки одиничні показники зазвичай мають різні шкали та діапазони оцінювання, одним із ключових завдань кваліметрії є перетворення таких показників на єдину, безрозмірну шкалу [4-6]. Це сприятиме ефективному використанню наявної інформації про показники якості та її розширенню, що в результаті підвищить точність оцінювання. Принципи створення кваліметричних моделей були висвітлені

в роботах [7-12]. Кваліметричні методи зайняли важливу нішу в процесах оцінювання якості об'єктів різної природи, у тому числі і безпеки праці на виробництві [13-16].

Під час аналізу наукової літератури з методів оцінки якості об'єктів кваліметрії виявлено, що наявні методи переважно орієнтовані на оцінку якості продукції й ґрунтуються на усередненні окремих показників якості для отримання комплексного або інтегрального індикатора [17-20]. Однак такий підхід не підходить для оцінки якості інших об'єктів кваліметрії, таких як процеси або системи, наприклад, системи управління процесами або підприємствами в цілому. Це підкреслює необхідність розробки та наукового обґрунтування нових методів оцінки, які б враховували різноманітність показників якості об'єктів різної природи.

Метою статті є розробити об'єктивний та надійний кваліметричний метод оцінки системи управління якістю на підприємствах, що дозволить оцінити результативність та ефективність її розроблення й впровадження вищим керівництвом та аудитором під час сертифікації.

2. Класифікація процесів СУЯ підприємства

Загальний показник оцінки СУЯ підприємства формується через оцінки її процесів, які можна поділити на три групи: 1) обов'язкові процеси; 2) процеси, що забезпечують; і 3) процеси життєвого циклу продукції.

До першої групи процесів належать процеси, які обов'язково вимагає стандарт, незалежно від виду та масштабу підприємства: управління документацією, управління записами, управління невідповідною продукцією, внутрішній аудит, коригувальні дії та попереджувальні дії. До другої групи належать процеси, які забезпечують процеси життєвого циклу продукції: управління кадрами, інформаційне забезпечення, управління інфраструктурою та робочим середовищем, та інші. Третя група - це процеси життєвого циклу: проектування, конструювання, виготовлення, контроль тощо.

Загальне керівництво якістю досягається через управління процесами в організації. Управління процесом включає:

- визначення цілей та очікуваних результатів процесу;
- визначення характеристик якості процесу, включно з критеріями результативності виконання процесу, критеріями результативності управління процесом і узагальненим прямим показником якості - ефективністю процесу;
- визначення ресурсів, у тому числі трудових, необхідних для виконання процесу;
- визначення методів і засобів виконання процесу та досягнення поставлених цілей;

- управління ресурсами, які виділені для здійснення цього процесу (в управління включається і мотивація персоналу);

- аналіз вхідних і вихідних даних, управління параметрами процесу.

Система управління якістю повинна забезпечити постійне поліпшення процесів в організації, що є вимогою стандарту ДСТУ EN ISO 9001:2018 (розділ 8). Для виконання цієї вимоги необхідно визначити вимірювані показники якості процесу. Для окремого процесу мають бути визначені цілі, критерії та методи, необхідні для забезпечення результативності як під час його здійснення, так і під час управління ним. Сукупність характеристик результативності виконання процесу, результативності управління процесом та ефективності процесу є показником якості процесу. Особливо цікавим є об'єднання в єдину систему таких технологій процесного управління, як менеджмент мети, управління результативністю та управління ефективністю – як щодо окремих процесів, так і їхньої сукупності.

Вважаємо доцільним структурувати ці показники за трьома групами.

Перша група – показники миттєвої оцінки процесу в реальному часі t . Показниками результативності виконання процесу можуть бути, наприклад, такі узагальнені характеристики:

$K1(t)$ – точність процесу – характеризується величиною відхилення параметрів продукції на виході процесу від номінальних значень, установлених у документації. Для процесу документообігу, наприклад, точність процесу може характеризуватися числом помилок і невідповідностей у розроблених документах;

$K2(t)$ – стабільність процесу – характеризуються величиною розкиду параметрів продукції на виході процесу в межах поля допуску, встановленого в документації;

$K3(t)$ – надійність процесу – характеризується частотою збоїв процесу, що призводять до зміни характеристик продукції, або часом роботи процесу без збоїв;

$K4(t)$ – безвідмовність процесу – характеризується часом роботи процесу без збоїв;

$K5(t)$ – продуктивність процесу – може вимірюватися часом виконання запиту споживача процесу;

$K6(t)$ – гармонійність процесу – характеризується параметрами черг продуктів на вході і виході процесу; в якості таких параметрів черг можна використовувати середню і максимальну довжину черги, середній і максимальний час перебування продукту в черзі;

$K7(t)$ – керованість процесу – характеризується величиною реакції процесу на керуючий вплив;

$K8(t)$ – безпека процесу – характеризується частотою збоїв процесу, що спричинили заподіяння шкоди здоров'ю працівників;

$K_9(t)$ – ергономічність процесу – характеризується середнім часом стомлюваності працівників під час виконання процесу;

$K_{10}(t)$ – екологічність процесу – характеризується частотою збоїв процесу, що спричинили заподіяння шкоди навколишньому середовищу.

Кількість показників $K_n(t)$ може змінюватися, залежно від важливості процесу, рівня функціонування СУЯ і визначається для кожного конкретного процесу окремо.

Ступінь відповідності фактичних показників процесу плановим (установленим) з урахуванням помилки може бути прийнята як оцінка результативності виконання процесу.

Друга група – показники результативності управління процесом. У цьому випадку розумітимемо динамічну характеристику перелічених показників $K_{n(t+\tau)}$ першої групи з урахуванням часу функціонування процесу τ . Для цієї групи показників необхідно знати цільову функцію динамічних характеристик процесу. Тобто необхідно знати бажаний стан показників процесу в будь-який момент часу τ . У СУЯ бажаний стан процесу має визначатися цілями у сфері якості. Ці цілі мають співвідноситися з політикою у сфері якості і як мінімум ставити завдання підвищення результативності. Ступінь поліпшення показників якості процесу відповідно до функції бажаності може бути показником результативності управління процесом.

У другу групу показників результативності управління процесом можуть бути, наприклад, такі узагальнені характеристики:

- величина зміни показників першої групи через установлений період часу τ . Ця величина може бути позитивною і негативною величиною;

- величина зміни стабільності показників першої групи через установлений період часу τ .

Третя група – показники ефективності процесу. Показники ефективності процесу відображають його (коефіцієнт корисної дії). Саме прямі показники ефективності процесів можуть дати найціннішу фактичну основу для прийняття управлінських рішень вищим керівництвом.

3. Метод оцінювання процесів системи управління якістю

Формування загальної оцінки результативності та ефективності СУЯ розглядається, як часткові оцінки результативності та ефективності процесів. Що більший показник результативності та ефективності кожного процесу, то більшими є ці показники СУЯ загалом. Тому знаходження загальної оцінки результативності та ефективності СУЯ пов'язане з кількісним визначенням множини показників процесів.

Кожен із показників результативності та ефективності процесів може мати різну шкалу і

різну розмірність. Отже, знаходити оцінку результативності процесу необхідно через сукупність оцінок його показників, що мають різні розмірності та шкали. Розв'язувати завдання будемо за допомогою введення єдиної для всіх показників штучної метрики. Це означає, що набору значень кожного показника процесу потрібно поставити у відповідність деякий стандарт, наприклад, шкалу оцінки від нуля до одиниці. Ця шкала має бути однотипною для всіх показників результативності. Як було сказано вище, необхідно знайти функцію бажаності, яка підходила б до всіх показників процесів.

Для розв'язання поставленої задачі скористаємося узагальненою функцією бажаності Харінгтона [21], що дає змогу об'єктивно оцінити якість процесу і досить добре реагує на малі показники якості. Так, наприклад, якщо один із показників якості близький до нуля, то узагальнений показник якості не буде великим.

При розрахунку функції бажаності виходять з того, що, якщо якість процесу характеризується n -показниками (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) , то для одержання функції бажаності необхідно перевести в безрозмірну шкалу Y' всі виміряні показники (Y_i) , де кожен індивідуальний показник якості визначається за формулою:

$$d_i = \exp[-\exp(-Y')]. \quad (1)$$

Для переходу в безрозмірну шкалу Y' за вимірними показниками (Y_i) можна використати афінні перетворення, що зберігають відношення ділення відрізків однаковими. Тобто, якщо є верхня Y_{vi} і нижня Y_{ni} межі показника Y_i та відповідні їм верхнє значення Y'_v і нижнє Y'_n показника Y' , то величини поділу відрізка рівні між собою. Звідси, якщо

$$\lambda = \frac{Y'_v - Y'_n}{Y_i - Y_{ni}}, \quad (2)$$

тоді

$$Y' = \frac{Y'_v + \lambda Y'_n}{1 + \lambda}, \quad (3)$$

звідси

$$d_i = \exp\left[-\exp\left(\frac{Y'_v + \lambda Y'_n}{1 + \lambda}\right)\right]. \quad (4)$$

Якщо якість процесу визначається n – показниками, то для цього процесу узагальнена функція якості D являє собою середнє геометричне індивідуальних показників якості d_i .

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (5)$$

Таке подання узагальненого показника якості (5) є досить виправданим. Тоді, якщо хоча б один із одиничних показників якості $d_i = 0$, то і $D = 0$, і, з іншого боку, $D = 1$ тоді і тільки тоді, коли всі $d_i = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Це відповідає філософії якості.

Узагальнена функція якості є кількісним, однозначним, єдиним і універсальним показником якості досліджуваного процесу, і якщо додати ще такі властивості, як адекватність, ефективність і статична чутливість, то її можна використовувати як критерій оптимізації.

Графічне представлення функції бажаності наведено на рисунку 1.

Розрахунок Y' проводиться за формулою:

$$Y' = -\ln(-\ln d),$$

наприклад, $Y' = -\ln(-\ln 0,8) = 1,499398 = 1,5$.

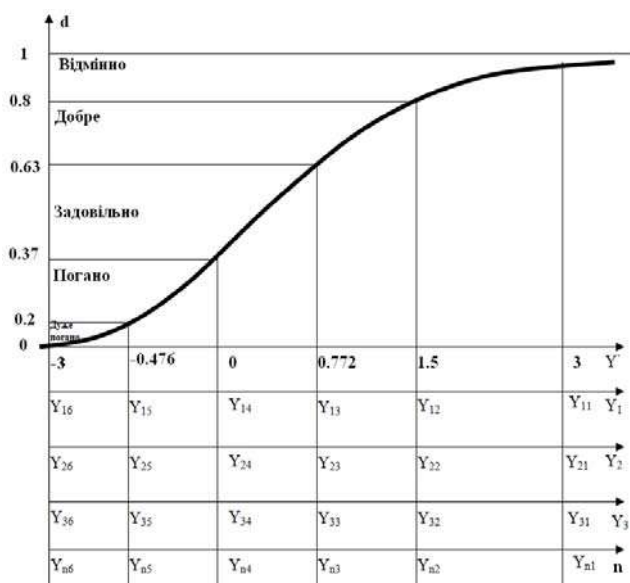


Рис. 1. Вид функції бажаності

Далі за допомогою експертних оцінок встановлюємо значення показників якості процесів Y_{ni} , які відповідають кодованим значенням Y' .

На осі ординат нанесені значення інтегрованого показника якості, що змінюється від 0 до 1 з прийнятою в літературі [2] умовною якісною характеристикою. На осі абсцис вказані значення відгуку, записані в умовному масштабі. Якщо потрібно регулювати крутизну кривої d , то можна зробити зміни інтервалів, тобто вибрати інший код.

Зауважимо, що комплексна функція якості (1) є кількісною, однозначною, єдиним і універсальним показником якості та може бути використана для розв'язання задачі оцінювання та управління якістю процесів СУЯ.

Висновки

Показано, що сукупність характеристик результативності виконання процесу, результативності управління процесом та ефективності процесу є показником якості процесу СУЯ. Проведено структурування показників якості процесів за трьома групами:

- показники миттєвої оцінки процесу в реальному часі t ;
- показники результативності управління процесом;
- показники ефективності процесу.

Запропоновано оцінювати одиничні показники якості процесів СУЯ з використанням функції бажаності Харінгтонга. Як узагальнений показник пропонується використовувати середнє геометричне значення одиничних показників.

Список літератури

1. Sfredo L. S., Vieira G. B. B., Vidor G., Santos C. H. S. ISO 9001 based quality management systems and organisational performance: a systematic literature review. *Total Quality Management & Business Excellence*, 2018, vol. 32(3-4), pp. 389-409. doi: 10.1080/14783363.2018.1549939.
2. Astrini N. ISO 9001 and performance: a method review. *Total Quality Management & Business Excellence*, 2018, vol. 32(1-2), pp. 5-32. doi: 10.1080/14783363.2018.1524293.
3. Boyko T., Bubela T. Uncertainty of Measurement Results in the Process of Product Qualitative Level Identification. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of the 6th IEEE International Workshop (Prague, 15-17 September 2011)*. Prague, Czech Republic, 2011, pp. 586-589.
4. Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Bondarenko T. *Mathematic Model of the General Approach to Tolerance Control in Quality Assessment*. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2022, pp. 415-423. doi: 10.1007/978-3-030-91327-4_41.
5. Ginevičius R., Trišč R., Remeikienė R., Zielińska A., Strikaitė-Latušinskaja G. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case. *Journal of International Studies*, 2022. vol. 15, no. 1, pp. 230-249. doi:10.14254/2071-8330.2022/15-1/15.
6. Cherniak O., Trishch R., Ginevičius R., Nechuiwiter O., Burdeina V. Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. vol. 996, 2024, pp. 3-13. doi: 10.1007/978-3-031-60549-9_1.
7. Trishch R., Nechuiwiter O., Dyadyura K., Vasilevskiy O., Tsykhanovska I., Yakovlev M. Qualimetric method of assessing risks of low quality products. *MM Science Journal*, 2021, pp. 4769-4774. doi: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021030.
8. Ginevičius R., Trishch R., Bilan Y., Lis M., Pencik J. Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries. *Energies*, 2022, vol. 15, 3322. doi: 10.3390/en15093322.
9. Argotti Y., Baron C., Esteban P. Quality quantification in Systems Engineering from the Qualimetry Eye. *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2019. P. 1-8. doi: 10.1109/SYSCON.2019.8836756.

10. Кучерук В. Ю., Глушко М. В. Покращення якості рекомендаційних систем на основі кваліметричних методів вимірювання. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2022. Вип. 2. С. 65–72. doi: 10.31891/2219-9365-2022-70-2-9.
11. Yazdani M., Tavana M., Pamučar D., Chatterjee P. A rough based multi-criteria evaluation method for healthcare waste disposal location decisions. Computers & Industrial Engineering, 2020, vol. 143, 106394. doi:10.1016/j.cie.2020.106394
12. Черняк О., Сороколат Н., Бурдейна В., Фатеева Л., Багаєв І. Застосування методу середніх прямокутників для отримання комплексного показника безпеки праці. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2023. №1(23). С. 115–122. doi: 10.30837/ITSSI.2023.23.115.
13. Stojčić M, Zavadskas EK, Pamučar D, Stević Ž, Mardani A. Application of MCDM Methods in Sustainability Engineering: A Literature Review 2008–2018. Symmetry, 2019, vol. 11(3):350. doi:10.3390/sym11030350
14. Черняк О. М., Сороколат Н. А., Багаєв І. О., Фатеева 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.
15. 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.
16. Сороколат Н. А., Фатеева Л. Ю. Оцінювання якості процесів системи управління безпекою праці, згідно вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018. Машинобудування. 2022. № 29. С. 89–96. doi: 10.32820/2079-1747-2022-29-89-96.
17. 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
18. Кучерук В. Ю., Глушко М. В. Оцінювання якості відгуків на основі кваліметричного методу "The value of opinion". Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вип. 3, Вересень 2022. Р. 1–13. doi: 10.31649/2307-5376-2022-2-22-34.
19. 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.
20. Кім Н. І. Узагальнений показник якості об'єктів кваліметрії різної природи. Вісник аграрної науки Причорномор'я. Вип. 1. С. 94–101. doi: 10.31521/2313-092X/2021-1(109)-12.
21. Harrington E. C. Jr. The desirability Function. Industr. Quality Control. 1965. April. P. 2–9.

Надійшла (Received) 07.11.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 22.11.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Микийчук Микола – Доктор технічних наук, професор, директор Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», E-mail: mykolamm@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0591-6304.

Мукушчук Микола – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Director of the Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, E-mail: mykolamm@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0591-6304.

Рудик Юрій – Доктор технічних наук, доцент, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, E-mail: rudra@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7372-5876

Rudyk Yuriy – Doctor of Sciences (Engineering), Docent, Lviv State University of Life Safety, E-mail: rudra@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7372-5876.

Христин Валерія – аспірантка кафедри Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, E-mail: hristicvaleria96@gmail.com, ORCID: 0009-0000-0533-4569.

Khrystych Valeriia – Postgraduate Student at the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Educational and Research Institute "Ukrainian Engineering Pedagogics Academy" V.N. Karazin Kharkiv National University, E-mail: hristicvaleria96@gmail.com, ORCID: 0009-0000-0533-4569.

Андрієць Віталій – аспірант кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет м. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», E-mail: v.v.andriiets@khai.edu, ORCID: 0009-0001-7612-9543.

Andriiets Vitalii – Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: v.v.andriiets@khai.edu, ORCID: 0009-0001-7612-9543.

Бондар Дмитро – аспірант кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», E-mail: d.y.bondar@khai.edu, ORCID: 0009-0001-6023-4250.

Bondar Dmytro – Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: d.y.bondar@khai.edu, ORCID: 0009-0001-6023-4250.

Ромашкін Денис – аспірант кафедри Мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», E-mail: d.d.romashkin@khai.edu, ORCID: 0009-0009-1410-4306.

Romashkin Denys – Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", E-mail: d.d.romashkin@khai.edu, ORCID: 0009-0009-1410-4306.

Qualimetric method of evaluation of processes of the quality management system of enterprise

M.M. Mykyychuk, Yu.I. Rudyk, V.P. Khrystich, V.V. Andriets, D.Yu. Bondar, D.D. Romashkin

Abstract

The article studies the problems of ensuring product quality at enterprises and implementation of quality management systems in accordance with the ISO 9000 series standards. The main attention is paid to analysing the effectiveness of these systems, in particular, to determining the reasons why some enterprises, despite the certification of quality management systems, failed to achieve improvement of economic indicators. It is noted that the standards contain requirements for assessing the effectiveness of quality management systems, but do not provide specific methods for measurement, which complicates the process of objective quality assessment. To solve the problem of quantifying the effectiveness of the quality management system, the author proposes to use qualimetry methods, which allow converting single quality indicators into a dimensionless scale. This makes it possible to more accurately assess the effectiveness of enterprise processes. A detailed analysis of existing approaches to assessing product quality is carried out, and it is concluded that such approaches are not effective enough to assess management systems, since they do not take into account the heterogeneity of quality indicators of processes and systems. The article classifies the QMS processes into three main groups: mandatory processes (according to the standard), supporting processes, and product life cycle processes. For each of these groups, the key performance and efficiency indicators are allocated, which allow assessing the quality of management of individual processes. It is also proposed to use Harrington's desirability function as a tool for integrating individual quality indicators into one generalised indicator. This allows to accurately assessing the quality of processes and their compliance with the goals of the enterprise. A method for evaluating the processes of the quality management system has been developed, based on the identification of key performance and efficiency indicators for each process. It is proposed to use the geometric mean of these indicators to obtain an overall assessment of process quality. This allows top management and auditors to obtain a more objective assessment of the functioning of quality management systems at enterprises.

Key words: qualimetry; quality management system; assessment; processes; desirability function.

UDC 53.087

DOI: 10.30837/2663-564.2024.2.10

ANALYSIS OF THE RESULTS OF PROFICIENCY TESTING SCHEMES OF KOZLODUY NPP METROLOGY LABORATORIES THROUGH INTERLABORATORY COMPARISON

Nikolova Elena, Kunov Svetoslav

Metrological Assurance Department Nuclear Power Plant, Kozloduy, Bulgaria

Abstract

The article provides an analysis of the results of interlaboratory comparative tests (ICT) of the laboratories of the metrological service of the Kozloduy NPP over the past ten years.

Laboratory proficiency testing is an important element of ensuring the quality of its work and one of the requirements of BDS EN ISO/IEC 17025:2018 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”. Laboratory proficiency testing through ICT is one of the most effective means of ensuring confidence in the laboratory results.

By participating in ICT, the laboratories of the Kozloduy NPP receive an independent assessment of the quality of the results, which makes it possible to prove their technical competence, control and improve their activities, and, if unsatisfactory results are obtained, take adequate corrective measures.

Keywords: interlaboratory comparative tests, proficiency testing, laboratory competence.

1. Introduction

Thousands of measurements are performed every second at Kozloduy NPP. Tens of thousands of Measuring Instruments (MI) and Information and Measurement System (IMS) are used for this purpose. The total number of MI and IMS at Kozloduy NPP is about 60 000, and about 20 % of them are subject to calibration and 80 % subject to metrological verification, 25% of them are subject to metrological verification in the area of state regulatory control and 75 % - subject to internal verification.

Metrology Assurance Department performs activities aimed at ensuring uniformity, required accuracy and reliability of the measurements at Kozloduy NPP.

Metrology Assurance Department is a separate structural unit within Safety and Quality Directorate. Metrology Department consists of 5 laboratories differentiated by measurement types and activities performed. The number of personnel in the Department is 45 specialists, 90% of them are college graduates. Average age of employees is about 40 years.

The Metrology Department is provided the necessary standard and auxiliary equipment with guaranteed traceability to the national measurement standards of Bulgaria, UK, Germany, Russia, Netherlands, Check Republic and Denmark for 13 types of dimensions and ensures traceability of measurements in NPP (Table 1).

Laboratory proficiency testing is an important part of laboratory quality assurance and one of the requirements of ISO/IEC 17025:2018 standard “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”. The laboratory proficiency testing through interlaboratory comparisons (ILC) is one of the most effective tools for ensuring confidence in laboratory’s results.

In order to confirm their technical competence, all the metrology laboratories of Kozloduy NPP participated in a number of interlaboratory comparisons organised by the Bulgarian Institute of Metrology, German Federal Office for Radiation Protection (BfS) and International Atomic Energy Agency (Table 1).

Table 1 – Schedule of interlaboratory comprising of metrology laboratories of NPP Kozloduy

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Field of Interlaboratory comparisons	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements	Ionising Radiation Measurements
	Weight&Mass Measurements		Dimensional Measurements		Weight&Mass Measurements		Weight&Mass Measurements			Weight&Mass Measurements	Weight&Mass Measurements
	Pressure Measurements			Temperature measurements		Temperature Measurements	Temperature Measurements		Temperature Measurements	Pressure Measurements	Temperature Measurements
		Electrical Measurements			Electrical Measurements					Electrical Measurements	Relative Humidity Measurements

The providers, organisers of the interlaboratory comparisons, usually use the following criteria for evaluating the laboratory performance in compliance with ISO/IEC 17043 standard [1]:

- E_n number:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}, \quad (1)$$

where: x – the result of the participant; X – the assigned value determined by the reference laboratory; U_{lab} – expanded uncertainty related to the result of the participant; U_{ref} – expanded uncertainty of the assigned value determined by the reference laboratory.

- quantitative index ζ :

$$\zeta = \frac{x - X}{\sqrt{u_{lab}^2 + u_{av}^2}}, \quad (2)$$

where: u_{lab} – combined standard uncertainty related to the result of the participant; u_{av} – combined standard uncertainty of the assigned value.

2. The Pressure, Flow Rate and Level Management laboratory

The Pressure, Flow Rate and Level Management laboratory (PFLM) participated twice in interlaboratory comparisons for the last ten years. In 2022, the laboratory performed calibration of pressure transmitter S-20 type manufactured by WIKA in seven points in the range from 0 to 60 bar. The reference laboratory, the National Centre of Metrology, Bulgaria, calibrated the object of comparison prior to, during and after the participation of laboratories with metrological traceability to the Czech Metrology Institute. The comparative method of measurement used is a routine method of the laboratory.

The summarised results of the interlaboratory comparison are presented in the Table 2.

Table 2 – The summarised results of the interlaboratory comparison ($|E_n|$ number)

Measurement points, bar	Individual participant codes						
	22P1	22P3	22P5	22P7	22P9	22P11	22P13
10	1,0	0,7	0,7	0,3	0,2	1,5	0,0
20	0,9	0,7	0,7	0,0	0,0	0,8	0,7
30	0,7	0,7	0,7	0,0	0,0	0,9	0,4
40	0,6	0,3	0,3	0,3	0,2	1,0	0,4
50	0,7	0,4	0,4	0,6	0,4	1,6	0,0
60	0,8	0,4	0,4	1,2	0,4	1,7	0,5

The value $|E_n| \leq 1$ indicates satisfactory performance of the laboratory and does not require any actions. The laboratory confirmed the stated uncertainty of the measurement.

3. The Temperature Measurements laboratory

The Temperature Measurements laboratory (TM) has repeatedly participated in interlaboratory comparisons for the last ten years on calibration of digital thermometer and thermocouple.

In 2021 the laboratory calibrated a thermocouple S type with a measuring range from 0 °C to 1000 °C. The reference laboratory calibrated the object of comparison at the beginning and after the participation of the laboratories, its metrological traceability to PTB, Germany.

The E_n number was used as a criterion for performance evaluation, and the summarised results of the interlaboratory comparison for 2021 are presented in the Table 3.

Table 3 – The summarised results of the interlaboratory comparison for 2021 ($|E_n|$ number)

Measurement point, °C	Individual participant codes	
	22TC5	22TC6
1000	0,43	0,07
800	0,23	0,03
600	0,46	0,02
400	0,28	0,36
200	0,06	0,08

The value $|E_n| \leq 1$ indicates the satisfactory performance of the laboratory, but comments in the interlaboratory comparison report were made to the uncertainty budget that the budget did not include contributions from non-uniformity of the conductors of the thermocouple subject to calibration and drift of the reference voltmeter. All these comments were taken into consideration during the update of the calibration methodologies.

The Temperature Measurement laboratory participated in interlaboratory comparison on digital thermometer calibration in 2018. The reference laboratory was the National Center of Metrology which performed the calibration of the object of comparison at the beginning and after the participation of all laboratories.

The E_n number was used as a criterion for performance evaluation in compliance with ISO/IEC 17043 standard [1], and the summarised results of the interlaboratory comparison for 2018 are presented in the Table 4.

Relatively low values of $|E_n|$ indicate satisfactory performance of the laboratory and do not require any actions.

In September 2023 the Temperature Measurement laboratory participated in interlaboratory comparison on calibration of digital thermometer and moisture meter. The final reports of the interlaboratory comparison are awaited.

Table 4 – Results of applying the E_n criterion

Measurement points, °C	$ E_n $					
	DT1	DT2	DT3	DT5	DT6	DT7
-40	-	0,19	-	1,98	1,78	-
-20	0,11	1,24	-	1,21	0,96	0,34
0	0,18	0,17	0,2	0,00	0,48	0,70
25	0,02	0,33	0,14	1,77	0,18	0,10
50	0,01	1,97	0,75	0,29	0,13	0,00
100	0,11	0,78	1,49	3,83	0,31	0,10
150	0,15	3,76	2,07	0,34	0,05	0,12
200	0,05	5,26	2,42	4,13	1,18	0,16

4. The Mechanical, Physical and Chemical Measurements laboratory

The Mechanical, Physical and Chemical Measurements laboratory (MPCM) has repeatedly participated in interlaboratory comparisons for the last ten years on calibration of digital non-automatic weighing scale and weights.

In 2019 the laboratory performed calibration of digital non-automatic weighing scale, accuracy class I, AE 240S type, manufactured by Mettler Toledo, Switzerland, with a measurement range up to 200 g, and in 2023 a calibration of digital weighing scale E 5500 S type manufactured by Sartorius, Germany, with a range up to 5 500 g. The reference laboratory, the National Center of Metrology, Bulgaria, calibrated the object of comparison prior to and after the participation of laboratories with metrological traceability to the Bulgarian Institute of Metrology.

The E_n number was used as a criterion for performance evaluation, and the summarised results of the interlaboratory comparison are presented in the following Tables 5,6.

For one result of 150 g, the $|E_n|$ number is greater than one and requires investigating the reasons for the unsatisfactory result and taking corrective actions.

In 2018 MPCM laboratory participated in interlaboratory comparison on calibration of standard weights with nominal values 2 g, 200 g, 1 kg, 5 kg and 20 kg, and in 2022 – calibration of standard weights with nominal values 200 g, 5 g, 500 g and 5 kg.

Tables 5 – Normalized deviation E_n

Nominal weight, g	E_n						
	NAWI1	NAWI2	NAWI3	NAWI5	NAWI6	NAWI7	NAWI9
0,05	-0,05	0,08	0,09	0,13	0,05	0,00	-
0,1	-0,05	0,12	0,14	0,17	0,18	0,19	0,11
1,0	-0,05	0,04	0,18	0,08	0,05	-0,31	0,03
10	-0,09	0,27	0,13	-0,03	0,85	0,07	0,25
50	-0,77	0,60	0,18	0,00	0,85	0,50	0,62
100	-0,77	0,86	0,46	0,16	0,96	1,82	1,35
150	-1,40	0,59	0,47	-0,07	1,64	2,54	1,13
200	-0,13	0,67	0,08	0,14	1,36	3,27	1,48

Tables 6 – Normalized deviation E_n

Nominal weight, g	Individual participant codes						
	23M1	23M2	23M3	23M5	23M6	23M7	23M8
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
500	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
1000	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2
2000	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2500	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
4000	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0
5000	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0
5500	0,0	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3

The summarised results of the interlaboratory comparison are presented in the Tables 7,8.

Table 7 – Results of applying the E_n criterion

Nominal weight, g	Individual participant codes				
	M1	M3	M4	M5	M7
2	-0,13	-0,27	-0,34	-0,14	0,16
200	0,12	-0,07	0,07	-0,16	0,39
1000	0,19	-0,14	0,23	0,14	0,84
5000	0,26	0,06	-0,19	0,05	0,28
20000	0,46	1,55	-0,96	0,03	0,07

Tables 8 – Normalized deviation E_n

Nominal weight, g	Individual participant codes				
	22M1	22M3	22M5	22M7	22M9
0,2	0,88	0,13	-	-	0,25
5	2,03	1,27	0,20	-	0,11
500	0,02	0,39	0,23	-	0,34
5000	0,27	0,14	0,05	1,00	0,21

For one result of 5 g the number $|E_n|=2,03$. The analysis of the results revealed the need to improve the qualification of the laboratory personnel in the area of mass measurement and processing the results of the repeated measurements, revision of calibration methodologies and requirements for laboratory equipment.

5. The Electrical and Radiotechnical Measurements laboratory

The Electrical and Radiotechnical Measurements laboratory (ERTM) several times participated in interlaboratory comparisons for the last ten years.

In 2014, 2017 and 2022 the laboratory performed a calibration of multimeter WAVETEK 1281 type. In 2014 the results were satisfactory for all points DCV, DCI, ACV, ACI and DCR, and in 2017 for all points except for 10 MΩ. The summarised results of the interlaboratory comparison for 2023 are presented in the following Tables 9-13.

For all the laboratory measurements results the condition $|E_n| \leq 1$ was met except for the values 100 Ω, 1 kΩ, 100 kΩ and 1 MΩ. Method used by the laboratory

Tables 9 – Normalized deviation E_n – DCV

Measuring range	Measurement points	X_{ref}	U_{ref}	$X_{lab}-X_{ref}$	X_{lab}	U_{lab}	E_n
100 mV	100 mV	-0,00393	0,00088	-0,00015	-0,004 1	0,006 0	0,0
1 V	+ 1 V	-0,00041	0,000059	-0,0000080	-0,000 419	0,000 026	0,3
10 V	+ 10 V	0,01242	0,000055	-0,000077	0,012 35	0,000 28	0,3
	- 10 V	0,0451	0,000054	0,000059	0,045 16	0,000 28	0,2
100 V	+ 100 V	0,00493	0,00046	-0,00018	0,004 8	0,004 0	0,0
1000 V	+1000 V	-1,8710	0,0047	-0,0048	-1,876	0,038	0,1

Tables 10 – Normalized deviation E_n – DCA

Measuring range	Measurement points	X_{ref}	U_{ref}	$X_{lab}-X_{ref}$	X_{lab}	U_{lab}	E_n
1 mA	+1 mA	-7,9E-05	0,000026	-0,000019	-0,000098	0,000087	0,2
10 mA	+10 mA	0,00088	0,00026	-0,000123	0,00076	0,000699	0,2
	-10 mA	0,0007	0,00026	0,000050	0,00075	0,000699	0,1
100 mA	+100 mA	-0,0881	0,0026	-0,000595	-0,0887	0,007002	0,1
1 A	+1 A	0,0006	0,000055	-0,000009	0,00059	0,000281	0,0

Tables 11 – Normalized deviation E_n – DCR

Measuring range	Measurement points	X_{ref}	U_{ref}	$X_{lab}-X_{ref}$	X_{lab}	U_{lab}	E_n
10 Ω	1 Ω	0,000007	0,000011	0,000033	0,000 04	0,000 06	0,5
100 Ω	100 Ω	0,00028	0,00013	0,003820	0,004 1	0,003 0	1,3
1 k Ω	1 k Ω	-0,00000858	0,00000047	0,000115	0,000 106	0,000 040	2,9
100 k Ω	100 k Ω	0,00007	0,00069	-0,008670	-0,008 6	0,002 9	2,9
1 M Ω	1 M Ω	-0,000002	0,000007	-0,000089	-0,000 091	0,000 048	1,8
100 M Ω	100 M Ω	0,016	0,0067	-0,021360	-0,005	0,048	0,4

Tables 12 – Normalized deviation E_n – ACV

Measuring range	Measurement points	X_{ref}	U_{ref}	$X_{lab}-X_{ref}$	X_{lab}	U_{lab}	E_n
100 mV	100 mV, 50 Hz	0,016	0,0066	-0,002	0,014	0,026	0,1
100 mV	100 mV, 1 kHz	0,017	0,0053	0,000	0,017	0,026	0,0
1 V	1 V, 50 Hz	0,00322	0,000052	0,00000	0,00322	0,00025	0,0
1 V	1 V, 1 kHz	0,003241	0,000037	0,0000	0,00322	0,00025	0,1
10 V	10 V, 50 Hz	-0,00336	0,00053	-0,000010	-0,0034	0,0024	0,0
10 V	10 V, 1 kHz	-0,00316	0,00038	0,00005	-0,0031	0,0024	0,0
100 V	100 V, 50 Hz	0,0169	0,0062	0,0021	0,019	0,025	0,1
100 V	100 V, 1 kHz	0,0188	0,0047	0,0033	0,0221	0,024	0,1
1000 V	1000 V, 50 Hz	-2,84	0,094	0,14	-2,70	0,36	0,4
1000 V	1000 V, 1 kHz	-2,83	0,09	0,18	-2,65	0,36	0,5

Tables 13 – Normalized deviation E_n – ACI

Measuring range	Measurement points	X_{ref}	U_{ref}	$X_{lab}-X_{ref}$	X_{lab}	U_{lab}	E_n
1 mA	1 mA, 50 Hz	-0,00029	0,00021	0,00000	-0,0003	0,0007	0,0
	1 mA, 1 kHz	-0,00024	0,00022	-0,00011	-0,0004	0,0007	0,2
10 mA	10 mA, 50 Hz	0,00210	0,00150	0,00040	0,0025	0,0042	0,1
	10 mA, 1 kHz	0,00280	0,00160	0,00016	0,0030	0,0041	0,0
100 mA	100 mA, 50 Hz	-0,02000	0,01600	0,00440	-0,0160	0,0420	0,1
	100 mA, 1 kHz	-0,01100	0,01600	-0,00060	-0,0120	0,0410	0,0
1 A	1 A, 50 Hz	-0,00073	0,00031	0,00020	-0,0005	0,0007	0,3
	1 A, 1 kHz	-0,00056	0,00030	0,00030	-0,0003	0,0007	0,4

for resistance measurement is not a routine method for the laboratory and a decision was made that the laboratory should participate more frequently in interlaboratory comparisons in order to gain experience in use of non-standard methods of measurement.

6. The Ionizing Radiation Measurements laboratory

The Ionizing Radiation Measurements laboratory (IRM) participates annually in interlaboratory comparisons on measurement of anthropogenic radionuclides in water, soil and surface contamination of the filters. The summarised results of

the interlaboratory comparisons, organised by the German Federal Office for Radiation Protection “43. Ringversuch Fortluft 2022” on the measurement of gamma-emitting nuclides during the control of gaseous radioactive releases to the environment are presented in Tables 14.

In 2022 the laboratory participated also in an interlaboratory comparison organised by the International Atomic Energy Agency (IAEA, Austria) on measurement of surface alpha and beta contamination in simulated filter: $|\zeta| \leq 2$ – satisfactory result; $2 < |\zeta| < 3$ – questionable result; $|\zeta| \geq 3$ – unsatisfactory result which requires taking corrective actions The IRM laboratory obtained satisfactory results in all interlaboratory comparisons.

Table 14 – Qualitative Bewertung after Labore anhand des ζ -Score Tests

#	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co	⁹⁰ Zr	⁹⁵ Nb	#	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co	⁹⁰ Zr	⁹⁵ Nb	#	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co	⁹⁰ Zr	⁹⁵ Nb
1	0,56	0,49	0,37	1,08	46	0,13	0,16	0,05	0,46	91	0,29	0,54	0,20	0,18
2	0,62	0,49	0,73	0,71	47	0,04	0,01	0,12	2,76	92	0,11	0,86	1,14	0,18
3	0,00	0,36	0,32	0,77	48	0,09	0,46	0,20	3,29	93	0,68	0,56	0,51	1,60
4	0,77	0,14	0,54	0,59	49	0,16	0,15	0,06	2,85	94	0,56	0,99	1,29	1,90
5	0,16	0,05	0,03	0,67	50	0,09	0,08	0,30	3,02	95	0,09	1,34	0,95	2,08
6	0,16	0,06	0,11	0,11	51	2,37	0,93	1,07	1,37	96	1,18	1,21	0,17	0,65
7	0,13	0,06	0,11	0,12	52	0,68	1,41	2,00	3,25	97	1,09	1,68	0,48	0,06
8	-0,04	0,06	0,04	0,02	53	0,10	0,46	0,08	0,25	98	0,09	0,14	0,17	0,01
9	0,77	0,58	0,70	1,40	54	0,01	0,57	0,13	0,35	99	0,24	0,04	0,16	0,34
10	0,29	0,35	0,36	0,17	55	0,06	0,73	0,67	2,35	100	1,17	1,30	0,29	0,31
11	1,88	0,27	0,35	1,31	56	0,85	1,10	0,84	6,65	101	0,59	0,69	0,76	0,94
12	1,23	1,10	0,57	1,65	57	0,28	0,46	0,27	11,26	102	0,22	0,38	0,05	0,21
13	0,16	1,49	0,77	0,02	58	0,50	0,61	0,53	0,36	103	1,51	1,32	1,46	10,10
14	0,15	0,54	0,08	0,76	59	0,22	0,34	0,35	0,11	104	1,38	1,32	0,97	0,83
15	0,12	0,02	0,01	0,14	60	0,15	0,20	0,16	0,91	105	0,51	0,34	0,12	0,13
16	0,03	0,16	0,27	0,24	61	0,11	0,31	0,29	0,01	106	0,16	0,17	0,21	5,24
17	0,62	0,21	0,98	5,43	62	0,71	0,16	0,08	0,76	107	0,58	0,05	0,86	5,75
18	0,79	0,66	0,90	5,89	63	1,28	0,47	0,21	0,27	108	0,10	0,43	0,58	5,51
19	1,70	0,92	0,89	8,46	64	0,85	0,89	0,56	0,09	109	0,07	0,58	0,19	8,08
20	0,89	0,47	0,79	0,59	65	0,36	0,40	0,42	0,09	110	0,06	0,05	0,27	2,84
21	0,61	0,65	0,80	1,63	66	0,00	0,91	0,60	0,19	111	0,12	0,41	0,45	0,02
22	1,46	1,03	0,55	1,35	67	0,14	0,62	0,15	0,08	112	0,61	1,40	0,09	0,17
23	1,25	1,21	1,17	3,00	68	0,26	0,33	0,29	0,28	113	0,00	0,67	0,25	0,03
24	2,68	4,36	3,21	2,25	69	1,65	0,14	0,10	5,02	114	0,27	0,32	0,20	0,10
25	2,05	1,32	1,22	6,93	70	1,24	1,28	1,30	0,67	115	0,80	0,27	0,55	3,49
26	0,30	0,38	0,69	0,98	71	0,51	0,50	0,19	0,42	116	0,57	0,53	0,85	3,00
27	1,04	0,07	1,74	1,32	72	0,96	0,78	0,97	5,26	117	0,78	0,74	0,21	2,92
28	0,50	0,13	0,21	0,02	73	1,25	1,02	1,06	3,88	118	1,15	0,90	1,30	2,91
29	0,04	0,19	0,17	0,05	74	0,03	1,91	2,35	1,84	119	0,08	0,35	0,30	0,02
30	0,20	0,42	0,35	0,66	75	0,32	0,43	1,04	1,25	120	0,73	2,18	0,69	0,69
31	0,74	0,36	0,85	0,78	76	0,52	0,18	0,07	0,41	121	1,37	0,97	0,11	9,46
32	0,54	0,45	0,42	0,51	77	0,64	0,33	0,27	0,34	122	0,70	0,13	0,32	12,60
33	1,11	1,12	1,20	1,44	78	2,19	1,26	2,30	2,02	123	0,01	3,18	3,21	6,12
34	0,29	4,91	0,74	5,58	79	0,53	0,15	0,10	0,08	124	1,19	1,33	1,15	11,46
35	0,40	0,19	0,23	0,13	80	1,33	1,02	0,02	0,24	125	0,42	0,15	1,93	5,63
36	0,21	0,12	0,16	0,96	81	0,47	0,14	0,08	4,49	126	2,10	0,16	1,97	1,63
37	0,84	0,58	0,61	4,79	82	0,27	0,15	0,03	0,44					
38	0,88	0,10	0,53	9,62	83	1,90	0,11	1,49	1,06					
39	0,39	0,31	0,66	0,48	84	1,51	0,15	1,20	0,90					
40	0,00	0,16	0,11	2,46	85	0,84	0,10	0,59	0,45					
41	0,19	0,32	0,24	4,08	86	1,07	1,50	0,98	0,47					
42	0,83	0,37	1,10	0,72	87	1,11	1,22	1,08	0,54					
43	0,05	0,90	0,71	0,67	88	1,15	0,70	0,85	0,72					
44	0,07	0,02	0,10	0,01	89	1,55	0,65	1,00	1,05					
45	0,23	0,23	0,47	0,45	90	0,15	0,23	0,11	0,72					

 fragwürdig
 nicht akzeptabel

7. Conclusion

Through participation in interlaboratory comparisons, the Kozloduy NPP laboratories receive an independent evaluation of the quality of results, which provides an opportunity to prove their technical competence, to monitor and improve their performance.

Unsatisfactory results from the participation in interlaboratory comparison can be obtained by any laboratory. Unfortunately, no one is protected from such a result, but it is very important to understand the reason for obtaining such a result and to take adequate corrective actions.

References

1. ISO/IEC 17043:2023 Conformity assessment – General requirements for the competence of proficiency test providers.
2. BIM-MM-P-2022-01 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of pressure transducer.
3. BIM-TM-TC-2021-01 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison for calibration laboratories on calibration in the field of temperature measurement.
4. BIM-T-DT-2018-01 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of digital thermometer.
5. BIM-MM-NAWI-2019-01 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of non-automatic weighing scale with range of 200 g, accuracy class I.
6. BIM-M-NAWI-2023-01 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of non-automatic weighing scale with range up to 5 500 g.
7. BIM-MM-M-2017-02 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of weights.
8. BIM-MM-M-2022-01 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of weights.
9. BIM-E-DCVIRACVI-2013-01 Final report on the proficiency comparison/testing scheme in the field of measurement of electrical quantities.
10. BIM-T-TC-2016-02 Final report on the proficiency testing scheme on calibration in the field of temperature measurement.
11. BIM-E-DCVIRACVI-2022-1 Final report on the proficiency testing scheme through interlaboratory comparison on calibration of digital multimeter.
12. Ringversuch „Fortluft 2022” 44. Ringversuch „Fortluft 2022” Kontrolle der Eigenüberwachung radioaktiver Emissionen aus Kernkraftwerken (Fortluft): German Federal Office for Radiation Protection, “43. Ringversuch Fortluft 2022” for measurement of gamma-emitting nuclides in the control of gaseous radioactive emissions in the environment.
13. IAEA-TERC-2022-01 Report on international interlaboratory comparison organised by the International Atomic Energy Agency (IAEA, Austria) WorldWide Open Proficiency Test Exercise, Pie-charts, S-Shapes and Reported Results with Scores.

Надійшла (Received) 14.02.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 22.10.2024

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

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.

Светослав Кунов – Експерт інформаційної системи з метрологічного забезпечення атомної електростанції Козлодуй, Болгарія; e-mail: skkunov@npp.bg.

Svetoslav Kunov – Expert information sistem in metrological assurance of Nuclear Power Plant, Kozloduy, Bulgaria; e-mail: skkunov@npp.bg.

Аналіз результатів схем перевірки кваліфікації метрологічних лабораторій АЕС Козлодуй шляхом міжлабораторного порівняння Олена Ніколова, Светослав Кунов

Анотація

У статті наведено аналіз результатів міжлабораторних порівняльних випробувань (МСВ) лабораторій метрологічної служби АЕС „Козлодуй” за останні десять років. Перевірка кваліфікації лабораторії є важливим елементом забезпечення якості її роботи та однією з вимог БДС EN ISO/IEC 17025:2018 “Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій”. Перевірка кваліфікації лабораторії за допомогою МСВ є одним із найефективніших засобів, що забезпечують довіру до результатів лабораторії. За допомогою участі в МСМ лабораторії АЕС „Козлодуй” отримують незалежну оцінку якості результатів, що дає можливість доводити свою технічну компетентність, контролювати та покращувати свою діяльність, а при отриманні незадовільних результатів проводити адекватні коригувальні заходи.

Ключові слова: міжлабораторні порівняльні випробування, перевірка кваліфікації, компетентність лабораторії.

TECHNOLOGY FOR IMPLEMENTING THE LEAN SIX SIGMA QUALITY MANAGEMENT MODEL IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. PART 2: INCONSISTENCIES ANALYSIS, EDUCATIONAL PROCESS IMPROVEMENT AND CONTROL OF IMPROVEMENTS SUSTAINABILITY

I.O. Moshchenko, O.V. Zaporozhets

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Abstract

The relevance of the application of the newest quality management technologies, namely the Lean Six Sigma (LSS) methodology in ensuring the educational process quality in higher education institutions (HEIs) in accordance with the guidelines 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 current state of development the problem of the production-oriented quality management model LSS adaptation to the conditions of HEIs functioning is analyzed in the works of foreign and Ukrainian scientists. The purpose of the article is to analyze the conditions for the LSS model implementation in HEIs in order to increase the efficiency of educational and scientific business processes and the applied implementation of LSS technologies taking into account the peculiarities of the Ukrainian educational environment. The practical significance of the article is to improve the quality of educational services delivery in HEIs using the continuous improvement cycle DMAIC and LSS tools on the example of increasing the effectiveness of the key process “Development EMS for the educational process”. Critical to quality characteristics (CTQC) of the educational product “Complex of Educational and Methodological Support (CEMS)” have been established. Current and target CTQC values are defined. A critical analysis of the CTQC non-compliance causes with the target value was carried out using FMEA analysis and Value Stream Mapping (VSM). Practical measures to improve the process quality are proposed. Process quality indicators were calculated after the implementation of corrective measures in the educational process. 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.

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

1. Introduction

Modern forms and models of the educational process quality management in higher education institutions (HEIs) provide not only for the training of highly qualified specialists, but also for the formation of a specific structure that guarantees support and continuous improvement of the educational services, educational and scientific products quality. Such a structure is the quality management system (QMS) of HEI. QMS of a modern HEI has to take into account the guidelines of international standards and national regulatory documents in the field of education quality. Such documents include, first of all, DSTU ISO 21001:2019 Educational organizations – Management systems for educational organizations – Requirements with guidance for use (ISO 21001:2018, IDT), 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) and "Recommendations for the application of criteria for assessing the quality of the educational program". As a consequence of the trend towards the use of multidisciplinary approaches to the QMS

formation, the higher education quality standards recommend the use of not only traditional (Total Quality Management), but also production-oriented quality assurance technologies (Lean Six Sigma).

The Lean Six Sigma (LSS) quality management model in HEIs is aimed at increasing and continuously improving the educational services quality while reducing the cost of all types of resources and ensuring the business processes stability, which is the primary task of HEIs in the context of the need to save resources.

2. Literature review

A detailed review of the scientists research in the field of quality assurance, which led to the idea of the possibility of combining two competing quality management models Six Sigma and Lean Production into a hybrid effective LSS methodology in the early 2000s, and then the application of this purely production-oriented concept in the field of educational services, is given by the authors in the article [1].

Ukrainian researchers, unfortunately, do not pay enough attention to the analysis of the possibilities of implementing the LSS model or its individual tools in Ukrainian universities, although the world's leading

educational institutions actively use the achievements of this leading quality management concept (Kings College, London; National University of Singapore; Valdosta State University, Georgia; Heriot Watt University, UK; Gordon State College, USA, etc.).

In the authors' article [1] the conditions for the LSS model in HEIs application were analyzed, an expert map on the use of LSS methodology tools and traditional statistical quality management tools at all stages of the basic LSS technology – the cycle of continuous improvement DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) implementation was compiled, identifies and measures critical to quality characteristics (CTQC) of the HEIs key educational process "Development of the EMS for the educational process" were identified and measured.

The article is aimed at analyzing the influencing factors that are the reasons for the non-compliance of the CTQC educational process with the target values, developing measures to eliminate inconsistencies and methods for monitoring the constancy of the educational process quality indicators using DMAIC technology and other complex LSS tools.

3. Research methodology

The practical implementation of the LSS quality model principles is based on the application of the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) continuous improvement cycle. The DMAIC cycle is used to consistently improve the business processes in the organization in order to achieve maximum stability of the processes flow and reduce the number of defects to 3.4 units per million (DPMO (Defects per Million Opportunities) is 3.4), which corresponds to the 6 "sigma" quality level. Applied aspects of improving business processes in HEIs based on the implementation of DMAIC technology are given in the articles [2, 3]. However, in order to achieve more significant results in improving business processes, it is advisable to use not only the classic version of DMAIC technology, but also complex tools of the LSS methodology, first of all, the method of Value Stream Mapping (VSM), which is discussed in detail in the authors' article [1], and the FMEA method.

The FMEA method is the analysis of possible defects significance and their consequences (consequences of non-conformity, parameter S – severity of consequences), the determination of the defects causes (potential cause of non-conformity, parameter O – probability of occurrence) and the analysis of methods for determining the defect (methods of non-conformity detection, parameter D – probability of detection). To determine the significance of the parameters, a qualimetric scale from 1 to 10 points is used.

The scale of parameter assessment for the processes taking place in HEIs differs significantly from the standard qualimetric scale of production processes FMEA [4]. The value of the parameter S varies from 1 (the occurrence of a factor does not have any effect on

the effectiveness of the process) to 10 (the occurrence of a factor makes the normal functioning of the process and the creation of an output impossible). The value of the parameter O varies from 1 (the appearance of the factor is practically impossible) to 10 (the factor is part of normal practice, the problem occurs constantly). The value of parameter D varies from 1 (the occurrence of a hazard can be detected almost always) to 10 (the occurrence of a hazard is almost impossible to detect).

The criticality of the factors is established by calculating the risk priority number (RPN) as a multiplication of the S, O and D indicators for each influencing factor.

4. Results

It was established in [1] that an important practical task of implementing the LSS concept to improve the educational process quality in HEIs is the practical implementation of the LSS technology (DMAIC cycle) in order to increase the effectiveness of the key process "Development of the EMS for the educational process".

In the article [1], the first two stages of the DMAIC cycle (Define and Measure) were implemented, the results of which were the determination of the CTQC list of the researched process and the determination of their quantitative current values (for 100 complex of educational and methodological support (CEMS) over the past 5 years, Department of Information and Measurement Technologies (IMT), NURE):

- 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 CTQC system takes into account the requirements of the normative document "Recommendations for the application of criteria for assessing the quality of the educational program" [5] and the internal document of NURE "Regulations on the complex for educational and methodological support of the discipline". CTQC target values are equal to zero.

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 study [1] developed the current state VSM of the process “Development of the EMS for the educational process”, which is formed by the sequence of production and logistics processes of creation and movement of the object (CEMS) value from the customer (Ministry of Education and Science of Ukraine) to the consumer (Higher education applicants). This tool allows to visualize the flow of the object consumer value adding in order to analyze non-productive costs and highlight the “bottlenecks” of the process.

It was determined that as process efficiency indicators it is advisable to use value-adding flow efficiency indicators: the Process Cycle Efficiency (PCE) and the Stream Non-Defectiveness Indicator (SNI). 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 %.

To develop and control the effectiveness of measures that will allow to achieve the target value of the researched process quality indicators, it is necessary to implement the last three stages of the DMAIC cycle, namely: Analyze, Improve and Control.

A (Analyze)

The purpose of the process efficiency analysis stage is to study and critically analyze the key indicators of the process in order to identify the influencing factors that cause their non-compliance with the target values, and then to identify the most important factors.

The “sigma” coefficient of non-defectiveness, which is based on the DPMO indicator determination according to the formula given in ISO 13053-1 [6], is equal to:

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

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).

The target value of the permissible number of non-conformities of critical process characteristics is calculated based on the target level of 6 sigma defect-free level. From formula (1) we get:

$$c = \frac{Y_{DPMO} \cdot n_{units} \cdot n_{CTQC}}{10^6}. \quad (2)$$

After calculations, we get a target value of 0,00306 permissible nonconformities CTQC per 100 CEMS, or only one unsuitable one is allowed for 32680 developed CEMS. In practice, this means that in order to achieve the 6-sigma level of the process “Development of the EMS for the educational process”, all critical characteristics should meet the target value, that is, there should be no inconsistencies at all.

Since, as a result of the DPMO indicator calculation according to the Six Sigma methodology, it is found that the largest number of non-compliant CEMSs arises as a result of non-compliance with the criterion of “compliance of development time with normative values”, it is advisable to analyze the time costs in order to identify the most significant factors of influence.

To rank the time costs (the waiting time (WT) between value-adding operations on the VSM [1]) according to the degree of impact on the overall result, we will use the ABC-analysis method, which is based on the Pareto principle (“80% of the result creates 20% of inputs”). The Pareto chart is shown in Fig. 1.

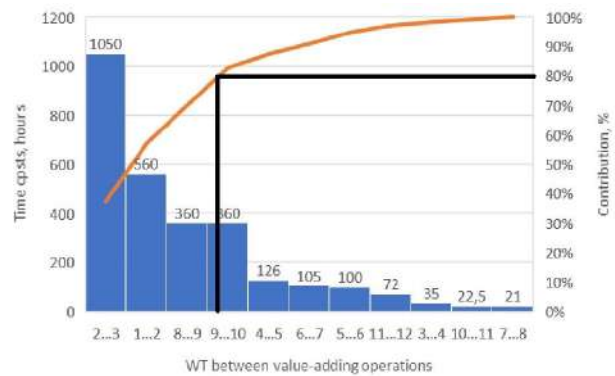


Fig. 1. Pareto Chart and Cumulative Lorentz Curve for Unproductive Time Costs

According to the Pareto principle, priority efforts should be concentrated on minimizing costs, which cause 80% of the total time consumption, namely:

WT 2...3 is the transition time between sub-processes within the process of developing CEMS elements.

WT 1...2 is the transition time from the process of work program (WP) developing to the process of WP approval at the meeting of the Department.

WT 8...9 is the transition time from the process of CEMS reviewing to the process of CEMS approval at the meeting of the Department.

WT 9...10 is the transition time from the CEMS approval process at the Department meeting to the process of CEMS approval by the Educational-Methodical Commission (EMC).

Let's analyze the reasons for these unproductive time costs within the framework of the process "Development of the EMS for the educational process" implementation.

In the LSS quality management methodology, wastes are divided into two categories:

1) first-order wastes that do not add consumer value to the product or service, but they are necessary from the point of view of the technological process (for example, the cost of design the accompanying documentation for CEMS). Such costs can and should be optimized, for which a wide range of tools has been developed within the framework of the Lean concept;

2) second-order wastes that can be removed from the technological process altogether without reducing the product or service quality (for example, the cost of transferring the approved CEMS to an employee of the scientific library (SL) for posting it on the website of the SL).

In the traditional Lean approach to quality management, there are 7 types of second-order wastes, namely: overproduction, excess inventory, defects, redundant operations and displacement in the workplace, overhandling, downtime, unnecessary product movements, and the recently added eighth type of waste – loss of creativity by employees (George, 2003). But for service organizations, and especially for HEIs, these wastes have a certain specificity, which is due to the duality of the result of the HEI's activities: the educational services delivery plus the educational and scientific products generation.

Let's analyze the second-order wastes for the process "Development of the EMS for the educational process":

1) Excess inventory during the development of an educational product are transformed into partially completed work: development of CEMS elements without checking them for compliance with critical characteristics of the process; development of CEMS elements in advance without prior approval of the WP.

2) Overproduction is considered as the provision of excessive functionality to the educational product: oversaturation of the CEMS with information that is not provided for by the content of the EP.

3) Re-execution of work: re-discovery and re-processing of information that has already been used during the development of the previous element of the CEMS; after the development and approbation of the CEMS - the reviewing.

4) Transportation can be considered as the transfer of work to other performers: peer review of CEMS.

5) Unnecessary movements in the case of educational service delivery or educational or scientific product creating are considered as switching between tasks: the transition from the development of CEMS to teaching or research activities.

6) Waiting: time delays in the form of waiting a review of the CEMS, approval of the WP and CEMS at the meeting of the Department, EMC.

7) Defects: inconsistencies between the qualitative critical characteristics of the educational product and the normative values.

8) Loss of creativity by employees.

The discrepancy between the qualitative critical characteristics of the process under study, for which, according to statistical information, the unsuitability of the educational product was revealed (inconsistency of the CEMS content with modern scientific achievements and practices and the non-compliance of the CEMS design with the requirements of the regulations), was caused by the human factor due to non-compliance with the requirements of the NURE internal document

"Regulations on the complex for educational and methodological support of the academic discipline" and EP. Measures aimed at optimizing first-order wastes and minimizing or even partially eliminating second-order waste components are developed at the next stage of the DMAIC cycle.

I (Improve)

The purpose of the Improve stage is developing measures to bring the critical characteristics of the process "Development of the EMS for the educational process" to the target values, namely, that the number of inconsistencies for all critical indicators is zero.

To identify the risks of each influencing factor and develop precautionary measures, ISO 13063-2 recommends the use of the FMEA method [7].

The FMEA results for the factors influencing the discrepancy between critical characteristics and target values identified at the analysis stage are shown in Table 1.

The values of the parameters S, O and D are determined by the expert method. The expert group was formed by staff of the Department of IMT, NURE. The degree of consistency of the scores was confirmed by the calculation of the Kendal concordance coefficients using the formula [8]:

$$Wg = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i^2)}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (3)$$

where m is the number of experts;

n – number of indicators;

d_i – deviation from the average value of total points \bar{S} ;

T_j – the sum of points duplicated by the j expert

$T_j = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^n (t_k^3 - t_k)$, where t_k is the number of indicators to which the j expert gave the k -th point.

To check the significance of the concordance coefficient for $n > 7$, the Pearson test is used. The null hypothesis h_0 assumes that Wg is close to 0 (that is, the opinions of experts are not agreed), and the alternative hypothesis h_1 is that Wg is significantly different from 0 (the opinions of experts are agreed). The empirical value of the Pearson criterion is calculated using the formula:

$$\chi^2 = m \cdot (n - 1) \cdot Wg. \quad (4)$$

The calculated concordance coefficients and the results of testing the hypothesis of agreement according to the Pearson criterion for $n=10$, $m=10$ are shown in Table 2.

Since the critical value $\chi_{cr}^2 = 21.7$ for $n = 10$ and the significance level of 0.01 (hypothesis h_1 is accepted), the consistency of expert opinions can be considered proven. For the causes of inconsistencies with the RPN value exceeding the critical value of PRN_{cr} , preventive measures must be applied without fail (an unacceptable level of criticality has been identified).

Table 1 – Results of the process "Development of EMS for the educational process" FMEA

№	Consequences of discrepancy	S	Potential cause of discrepancy	O	Methods for detecting discrepancy	D	RPN	Measures to solve the problem
1	Discrepancy between the qualitative critical characteristics of the educational product and the requirements of the RD and EP	10	Development of the CEMS elements without their current verification for compliance with critical process characteristics	4	CEMS Testing for compliance with the requirements of RD and EP	3	120	Filling out the form during the author's development with the definition and justification of the degree of compliance of the CEMS elements with the criteria for the product suitability
2	Discrepancy between the CEMS content and WP of the discipline	8	Development of CEMS elements in advance without prior approval of the WP	3	Discrepancies may be detected during the approval of the CEMS at a meeting of the Department or EMC	3	72	Filling out the form during the author's development with the definition and justification of the degree of compliance of the CEMS elements with the WP
3	Inconsistency of the criteria of volume, content and program learning outcomes with the requirements of EP	8	Oversaturation of CEMS with information that is not provided for by the content of the EP	2	Discrepancies may be detected during the approval of the CEMS at a meeting of the Department or EMC	3	54	Development of a form with the definition and justification of the degree of compliance of the CEMS elements with the criteria of volume and content
4	Discrepancy between the time of development and publication of CEMS with the requirements of the educational process	10	Retrieval and reprocessing of information that has already been used during the development of the previous CEMS element	4	Moderately high chances of detecting a discrepancy	4	160	Structuring the development of CEMS elements by topics. Documentation of current processes. Consulting with other scientific and pedagogical staff (SPS)
5	Discrepancy between the time of development and publication of CEMS with the requirements of the educational process	4	Time delays in the form of waiting a review on CEMS	3	Moderately high chances of detecting a discrepancy	4	48	Exclusion of the review process from the general cycle. Implementation of the form with the definition and justification of the degree of compliance of the CEMS elements with the criteria for the suitability of the product, which the author submits for approval of the Department
6	Discrepancy between the time of development and publication of CEMS with the requirements of the educational process	10	Transition from the development of CEMS to teaching or research activities	3	It is very difficult to identify the risk of non-compliance	8	240	Planning the workload of the teacher, taking into account the time of development of the CEMS. Rebalancing operations within the overall process according to the Yamazumi methodology
7	Discrepancy between the time of development and publication of CEMS with the requirements of the educational process	10	Time delays in the placement of CEMS on the website of the SL	4	Moderately high chances of detecting a discrepancy	4	160	Planning the workload of the SL employee
8	Discrepancy between the time of development and publication of CEMS with the requirements of the educational process	10	Time delays due to the approval of the CEMS at the meeting of the Department and the EMC	5	Moderately high chances of detecting a discrepancy	4	200	Planning the timing of the development of the current CEMS in order to synchronize the date of approval or to hold an unscheduled meeting of the Department for the purpose of approval of the CEMS
9	Discrepancy of CEMS with the RD requirements to the criterion of "design"	6	The CEMS design does not meet the RD requirements	5	Discrepancies may be detected during the approval of the CEMS at a meeting of the Department or EMC	3	90	Filling out the form "Compliance of CEMS with suitability criteria". The use of specialized software for the preparation of scientific documents, for example, the LaTeX publishing system
10	Discrepancy with the criteria of "student-centered approach", "academic freedom", "modern scientific achievements and practices"	6	Loss of creativity by the teacher	2	Discrepancies may be detected during the approval of the CEMS at a meeting of the Department or EMC	3	36	Filling out the form "Compliance of CEMS with suitability criteria".

Table 2 – Concordance Coefficients and Values χ^2

WgS	$WgPO$	WgD	χ^2_s	χ^2_o	χ^2_D
0,78	0,85	0,84	70,2	76,5	75,6

The critical value of the PRN_{cr} set at the level of 100 points for processes that do not pose a threat to human life and health. The risk diagram of ranked causes of potential nonconformities is shown in Fig. 2.

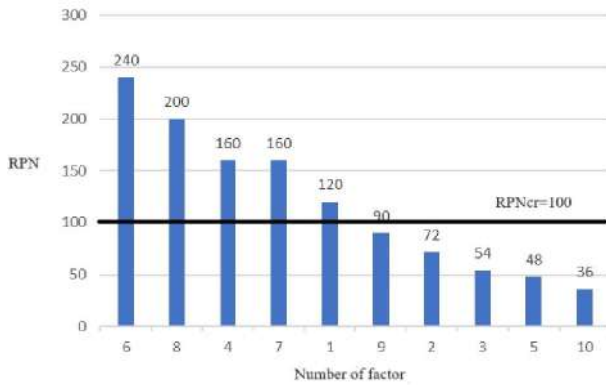


Fig. 2. Risk diagram of the causes of nonconformities according to FMEA results

Based on the results of FMEA, it is necessary to implement preventive measures to minimize the occurrence of critical risks, namely:

1) Planning the workload of the teacher, taking into account the time of CEMS development. Rebalancing operations within the overall process according to the Yamazumi methodology.

2) Planning the timing of the development of the current CEMS in order to synchronize the date of approval or to hold an unscheduled meeting of the Department for the purpose of approval of the CEMS.

3) Structuring the development of CEMS elements by topics. Documentation of current processes. Consulting with other SPSs.

4) Planning the workload of the SL employee in order to reduce the time of transition from the CEMS delivery to the CEMS placement on the website of the SL.

5) Implementation of a form with the definition and justification of the degree of compliance of the CEMS elements with the criteria for the suitability of the product, which the author submits for approval by the Department. At the same time, it is possible to exclude the review process from the general cycle.

C (Control)

After the implementation of measures to minimize the occurrence of critical risks in the process under study, it is necessary to control the results by constructing the VSM taking into account the implemented changes and calculating new critical characteristics of the process. After the implementation of the measures developed at the Improve stage, the VSM took the following form (Fig. 3).

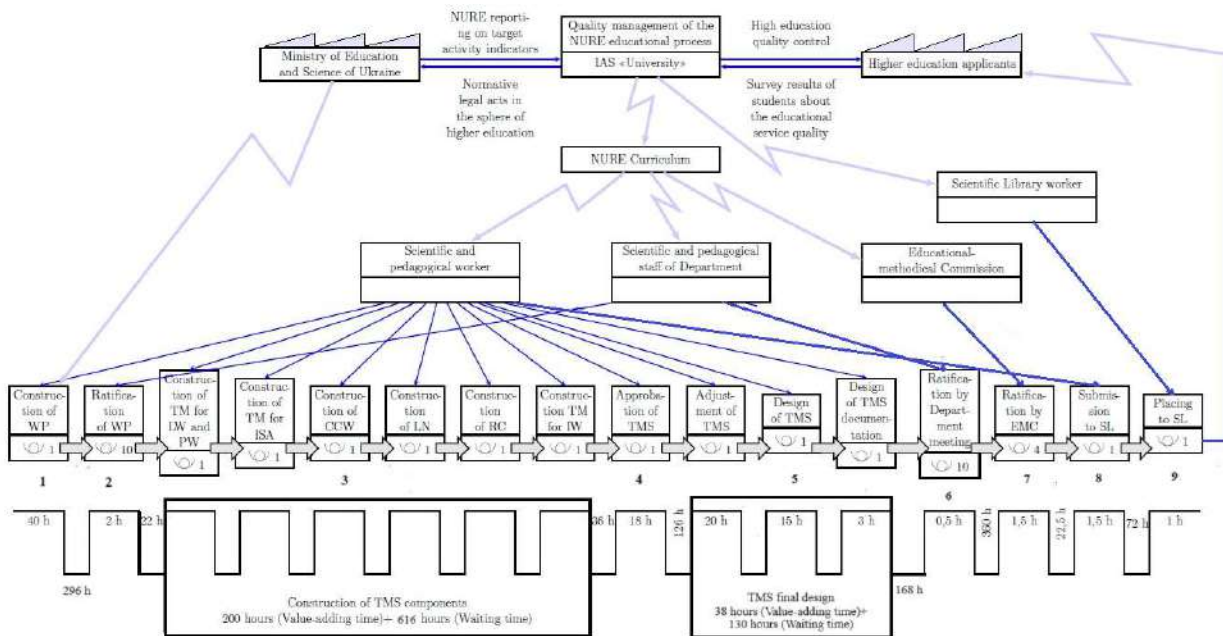


Fig. 3. VSM after the implementation of optimization measures (developed by the authors)

The PCE, calculated according to the line of chronology of the VSM, after the implemented measures, was:

$$PCE = \frac{307,5}{1848,5} \cdot 100\% = 16,6\%.$$

The complexity of the process “Development of EMS for the educational process” has decreased: instead of 12 subprocesses, 9 subprocesses remained, since the subprocess “Peer review of CEMS” was eliminated and the subprocesses “Adjustment of TMS”, “Design of

TMS”, “Design of TMS documentation” were combined, since they are consistently performed by the certain SPS and in the same conditions. As a result of scheduling the workload of the SPS in order to free up time for consistent work on the CEMS up to 6 hours a day and holding an unscheduled meeting of the Department (on average during the week) for the approval of the WP and CEMS, the calculated PCE increased to 16.6 %, which exceeds the target value of the PCE = 14.6 %. The measures were implemented within the Department of IMT, NURE, but even without reducing the time for waiting for the approval of the CEMS by EMC and planning the workload of the SL employee, the criterion of compliance with the time of development and publication of the CEMS was met.

After the development and implementation of the form with the definition and justification of the degree of compliance of the CEMS elements with the criteria for the suitability of the product, the SNI of the process “Development of the EMS for the educational process” reached 100%, that is, all the CEMS developed by the SPS of the Department of IMT, NURE during the academic year, met the qualitative criteria of suitability.

The calculation of the updated “Sigma Coefficient” of process quality (target level $Z_{value} = 6$) does not make sense under these conditions, since the number of CEMSs developed during the study period is insufficient. To achieve the target value Z_{value} only one educational product out of 32680 CEMSs may not meet the suitability criteria.

To track the presence of deviations in a certain interval from a given value in the LSS methodology, indicators are used, which are individually set for each process. For the process of “Development of the EMS for the educational process”, the indicators are the PCE and SNI, which reflect the degree of compliance of the process characteristics with the criteria of suitability. According to DSTU ISO 7870-1:2016 Control charts –

Part 1: General guidelines (ISO 7870-1:2014, IDT) the stability of the process over time is monitored by constructing Control Maps for each indicator.

5. Conclusion and agenda for future research

In the article the possibilities of implementing the LSS quality management model in HEIs are analyzed. The practical implementation of the basic LSS technology - the DMAIC cycle, with the help of which a significant increase in the effectiveness of the HEI key process “Development of the EMS for the educational process” implementation was achieved. The reasons for non-compliance of the process CTQC with the target values were determined and analyzed. According to the FMEA methodology, the risk priority analysis was carried out and measures to minimize the occurrence of critical risks were proposed. At the control stage, the VSM was built after implementation optimization measures and calculated the process efficiency indicators.

As a result of the DMAIC cycle implementation to improve the process “Development of the EMS for the educational process”, an improvement in the process performance indicators was obtained, which reflect the degree of compliance of the process characteristics with the suitability criteria, namely: the PCE increased from 11.3 % to 16.6 %, which exceeds the target value of the PCE = 14.6 %, the SNI reached the target value of 100 %.

Prospects for further research are seen in the use of DMAIC technology and other tools for implementing the LSS quality management methodology to improve the efficiency of all key educational and scientific business processes during the development of the HEI’s quality management comprehensive model in accordance with the principles of modern International and European standards in the field of education.

References

1. Moshchenko I.O., Zaporozhets O.V. 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 // *Metrology and Instruments*. 2024. № 1. P. 51-58.
2. 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).
3. 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).
4. Spiridonova A.A., Khomutova E.G. Application of FMECA method in process risk management of quality management system of higher educational institution // *University Management: Practice and Analysis*. 2013. P. 59-65.
5. 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-kriteriiv-ocinyuvannya-yakosti-OPP-ta-osvitnoi-diyalnosti-za-ciieyu-programoyu-1.pdf> [In Ukrainian]. (date of access: 12.09.2024).
6. ISO 13053-1:2011 Quantitative methods in process improvement – Six Sigma – Part 1: DMAIC methodology.
7. ISO 13053-2:2011 Quantitative methods in process improvement – Six Sigma – Part 2: Tools and techniques.
8. Velychko O. M., Kolomiets L. V., Hordiienko T. B., Shevtsov A. H., Karpenko S. R., Haber A. A. Group expert evaluation and competence of experts. Odesa, 2015. URL: <https://www.pedagogic-master.com.ua/public/groupexpert-osin.pdf> [In Ukrainian]. (date of access: 22.09.2024).

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 2: Аналіз невідповідностей, вдосконалення освітнього процесу та контроль сталості поліпшень

І.О. Мощенко, О.В. Запорожець

Анотація

Обґрунтовано актуальність застосування новітніх технологій управління якістю, а саме методології Lean Six Sigma (LSS) в забезпеченні якості освітнього процесу в ЗВО згідно з настановами 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 сучасний стан розробленості проблеми адаптації виробничоорієнтованої моделі управління якістю LSS до умов функціонування ЗВО в працях закордонних та українських науковців. Метою статті є аналіз умов впровадження моделі LSS в ЗВО з метою підвищення ефективності освітніх та наукових бізнес-процесів та прикладна реалізація технологій LSS з урахування особливостей українського освітнього середовища. Практичне значення статті полягає в підвищенні якості надання освітніх послуг в ЗВО за допомогою застосування циклу безперервного поліпшення DMAIC та інструментів LSS на прикладі підвищення ефективності реалізації ключового процесу «Розробка науково-методичного забезпечення освітнього процесу». Встановлено критичні характеристики СТQC освітнього продукту «Комплекс науково-методичного забезпечення (КНМЗ)». Визначено поточні та цільові значення СТQC. Здійснено критичний аналіз причин невідповідностей СТQC цільовим значенням за допомогою FMEA-аналізу та картографування потоку створення цінності. Запропоновано практичні заходи щодо покращення якості процесу. Розраховано показники якості процесу після впровадження корегуючих заходів в освітній процес. Перспективами дослідження є застосування технології DMAIC та інших інструментів реалізації методології управління якістю LSS для підвищення ефективності всіх ключових освітніх та наукових бізнес-процесів в рамках розробки комплексної моделі управління якістю ЗВО згідно з принципами сучасних міжнародних та європейських стандартів в галузі освіти.

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

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Андрієць В.В. (Andriets V.V.)	44	Мілушев Г.С. (Milushev George).....	5
Бакланова Л.В. (Baklanova L.V.)	27	Микийчук М.М. (Mykyuchuk M.M.).....	44
Бакланов О.М. (Baklanov O.M.)	27	Мощенко І.О. (Moshchenko I.O.)	56
Білецький П.М. (Biletskyy P.M.)	32	Ніколова Олена (Nikolova Elena)	50
Бондар Д.Ю. (Bondar D.Yu.)	44	Рибчин Б.Р. (Rybchyn B.R.)	39
Боцюра О.А. (Botsiura O.A.)	23	Ромашкін Д.Д. (Romashkin D.D.)	44
Дегтярьов А.В. (Degtyarev O.V.)	32	Рудік Ю.І. (Rudyk Yu.I.)	44
Задорожна І.М. (Zadorozhna I.M.).....	23	Сезонова І.К. (Sezonova I.K.)	32
Запорожець О.В. (Zaporozhets O.V.)	56	Середюк О.Є. (Serediuk O.Y.)	13
Захаров І.П. (Zakharov I.P.).....	23	Суржко К.А. (Surzhko K.A.)	18
Корбецький М.В. (Korbetskyy M.V.)	32	Труфан М.М. (Trufan M.M.)	13
Коробко А.І. (Korobko A.I.)	18	Хорошайло Ю.Є. (Khoroshailo Yu.E.)	32
Костовський О.А. (Kostovski O.A.)	18	Христич В.П. (Khrystich V.P.)	44
Кошовий М.Д. (Koshovyi M.D.)	9	Черножук Т.В. (Chernozhuk T.V.)	27
Криницький О.С. (Krynytskyi O.S.)	39	Шевченко І.Р. (Shevchenko I.R.)	27
Кунов Светослав (Kunov Svetoslav)	50	Юрченко О.І. (Yurchenko O.I.)	27
Кураксін Д.В. (Kuraksin D.V.)	9		

**Метрологія
та прилади**

**Metrology
and Instruments**

Науково-практичний журнал
2024, № 2

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*

Підписано до друку 16.12.2024 Формат 60x84/8. Ум.-друк. арк. 14,75. Тираж 100 прим. Зам. 1216-24

Адреса редакції: Харківський Національний університет радіоелектроніки
Кафедра ІВТ, пр. Науки, 14, 61166, м. Харків, Україна, тел. + 38 (057) 702-13-31

Віддруковано з готових оригінал-макетів в ФО-П Єфименко С.А.