

# МЕТРОЛОГІЯ ТА ПРИЛАДИ

METROLOGY AND INSTRUMENTS

3|2020

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ

МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ

КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ





Вимірюйте  
усе доступне вимірюванню  
і робіть недоступне вимірюванню  
доступним.

Galileo Galilei

ISSN 2307-2180

# Метрологія



# Та прилади

## METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 3 (83), 2020

Науково-виробничий журнал  
Scientific and production journal

### Засновники:

Академія метрології України,  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),  
Державне підприємство  
«Всеукраїнський державний  
науково-виробничий центр  
стандартизації метрології, сертифікації  
та захисту прав споживачів»  
(ДП «Укрметрестандарт»),  
ТОВ «Виробничо-комерційна  
фірма (ВКФ) «Фавор ПТД»

Видається з березня 2006 року  
Рік випуску п'ятнадцятий  
Передплачений ідентифікатор 92386

### Головний редактор

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.

### Редакційна колегія:

Зазаров І.П., д. т. н., проф.  
Коломійца Л.В., д. т. н., проф.  
Косач Н.І., д. т. н., проф.  
Копцева Л.О., д. т. н., проф.  
Козловий М.Д., д. т. н., проф.  
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.  
Кузарчук В.В., д. т. н., проф.  
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.  
Пістун Є.П., д. т. н., проф.  
Семенець В.В., д. т. н., проф.  
Середиук О.Є., д. т. н., проф.  
Туз Ю.М., д. т. н., проф.

### Іноземні члени редколегії:

Tadeusz Skubis, dr hab. inż., prof.  
(Польща)  
Zygmunt Warsza, doc. dr inż. (Польща)  
Mykhalchenko V.M., k. t. n. (Казахстан)

### Експертна рада:

Болшаков В.В., д. т. н., с. н. с.,  
заступник головного редактора  
Кузьменко Ю.В., к. т. н., с. н. с.  
Петришин І.С., д. т. н., проф.  
Романів М.С., к. т. н., с. н. с.  
Сурду М.М., д. т. н., проф.

### Редакційна група:

Фісун В.П., заступник головного  
редактора  
Винокурів Л.І., науковий редактор —  
відповідальний секретар  
Прозенко М.П., модератор сайту,  
дизайнер  
Зайцев Ю.О., дизайнер-верстальник

### Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Радзівська 11, к. 2/  
Тел.: (057) 793-23-28; (095) 00-68-665  
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net  
<http://www.ams.in.ua/journal>  
<https://nmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

### Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ПТД»  
61140, Харків, пр-т. Гагаріна 94-А, кв. 35;  
Свідомо про внесення  
до Держреєстру видавців,  
виготовлювачів і розповсюдників  
видавничої продукції  
серія ХВ № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 05.07.2020.  
Формат 80×84/8. Папір хрейдзіваний.  
Ум. друк, арм. 8,43. Обл.-внд. арм. 7,13.  
Друк офсетний. Тираж 400 прим.  
Замовлення № 23.

© «Метрологія та прилади», 2020

Журнал зареєстровано  
у Міністерстві юстиції України,  
свідоцтво серія ХВ № 22796-12696ПЗ  
від 03.07.2017;

включено до Переліку наукових  
фахових видань України, в яких  
можуть публікуватися результати  
дисертаційних робіт на здобуття наукового  
ступеня доктора наук, кандидат наук  
та ступеня доктора філософії (категорія 5),  
затверджено Наказом Міністерства освіти  
і науки України № 409 від 17.03.2020  
Журнал включено до Міжнародної  
науково-метричної бази даних  
Index Copernicus, лист від 08.03.2013  
ICV 2018 = 56,77

The Journal is Registered  
in Ministry of Justice of Ukraine,  
Certificate series ХВ № 22796-12696ПЗ  
dated 03.07.2017;

is included to the List of scientific  
professional publications of Ukraine,  
in which the results of dissertations  
for the degree of doctor of sciences,  
candidate of sciences and the degree  
of doctor of philosophy (category 5),  
may be published, approved by the order  
of the Ministry of Education and Science  
of Ukraine No. 409 dated 17.03.2020  
The journal is included in the International  
Scientific Databases Index Copernicus, Letter  
dated 08.03.2013  
ICV 2018 = 56,77

### Co-founders:

Kharkiv National University  
of Radio Electronics (KNURE);  
Public Organization  
«Academy of Metrology of Ukraine»;  
State Enterprise «Ukrainian State  
Research and Production Centre  
for Standardisation, Metrology,  
Certification and Consumers  
Rights Protection»  
(SE «Ukrmetrteststandart»);  
LLC Production and Commercial Firm  
(PCF) «FAVOR LTD»

Published since march 2006.  
Release year fifteenth  
Subscription index 92386.

### Chief editor:

Volodarskyi Ye.T., D.Sc. (Eng.), prof.

### Editorial board:

Kolomiychuk L.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.  
Koshova L.O., D.Sc. (Eng.), prof.  
Koshoviy M.D., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kukharuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.  
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.  
Semets V.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.  
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.  
Zakharov I.P., D.Sc. (Eng.), prof.  
**Foreign members of the editorial board:**  
Tadeusz Skubis, prof. dr hab. inż.  
(Poland)  
Zygmunt Warsza, doc. dr inż. (Poland)  
Mykhalchenko V.M., Ph.D.  
in Engineering Science (Kazakhstan)

### Advisory Board:

Bolshakov V.B., D.Sc. (Eng.), S.Sc.Off.  
Deputy Chief Editor  
Kuznenko Ya.V., Ph.D. (Eng.), S.Sc.Off.,  
Petryshyn I.S., D.Sc. (Eng.), prof.  
Rozhnov M.S., Ph.D. (Chem.), S.Sc.Off.  
Surd M.M., D.Sc. (Eng.), prof.

### Editorial Team:

Fisun V.P., Deputy Chief Editor  
Vynokusev L.I., Scientific Editor,  
Executive Secretary  
Fronenko M.P., site moderator, designer  
Zaitsev Yu.O., maker-up designer

### Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;  
tel.: (057) 793-23-28; (095) 00-68-665  
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net  
<https://www.ams.in.ua/journal>  
<https://nmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

### Publisher and manufacturer:

PCF «FAVOR LTD»  
61140, Kharkiv,  
pr-t. Gagarin, 94-A, sq. 35;  
Certificate of inclusion in the State  
Register of Publishers, Manufacturers  
and Distributors of Publishing Products,  
series ХВ № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 05.07.2020  
Format 80 × 84/8. Paper is coated,  
Conditional printed sheets 8.43.  
Accounting and publishing sheets 7.13.  
Offset printing. Circulation 400 copies  
Order number 23.

ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564

DOI: 10.33945/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2020



<b>МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО</b>	<b>INTERNATIONAL COOPERATION</b>
Вітальне послання директорів Міжнародних бюро мір і ваг Мартіна Мілтона та законодавчої метрології Ентоні Доннеллана з нагоди Всесвітнього дня метрології 2020 ..... 3	Messages from the Directors of the BIPM Martin Milton and of the BIML Anthony Donnellan dedicated to the World Metrology Day 2020
<b>МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ</b>	<b>METROLOGICAL ASSURANCE</b>
Лебов А. Б., Кишль С. П., Якубов С. Е., Згуря В. И. Система метрологічного забезпечення вимірювань в області контролю за обертанням гідрохлорфторуглеродів ..... 4	Glebov A. B., Kisiel S. P., Yakubov S. E., Zghuria V. I. The System of Metrological Support of Measurements in the Field of Control over the Circulation of Hydrochlorofluorocarbons
<b>ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ</b>	<b>ERRORS AND UNCERTAINTY</b>
Григорів Б. В., Гурджян Н. Р., Зеленик О. В., Любимський В. Р., Молчанова Н. И., Милець Л. И., Тарасов В. А. Восходящий и нисходящий подходи к оцінюванню неопределенности измерений светового выхода сцинтилляторов (обзор) ..... 12	Grynyov B. V., Gurdzhian N. R., Zelenyk O. V., Lyubynskiy V. R., Molchanova N. I., Militsay L. I., Tarasov V. A. Ascending and Descending Approaches to Estimating the Uncertainty of Measurements of the Light Output of Scintillators (REVIEW)
<b>МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ</b>	<b>METROLOGICAL TRACEABILITY</b>
Мельников О. О., Гаврилін В. Г., Петренко А. В., Манько О. О., Левбарг О. С. Метрологічна простежуваність результатів вимірювання рН в Україні ..... 21	Melnikov O. O., Gavrilin V. G., Petrenko A. V., Manska O. O., Ievbarg O. S. Metrological traceability of pH measurements in Ukraine
<b>ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ</b>	<b>ACCURACY AND RELIABILITY</b>
Купко О. Д. Аналіз точності способів розрахунку площі квадратної діафрагми методом Монте-Карло ..... 26	Kupko O. D. Analysis of Exactness of Methods of Calculation of Area of Square Diaphragm by the Method of Monte Carlo
<b>ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ</b>	<b>CONVERTERS AND SENSORS</b>
Гришак В. Ф., Кухарчук В. В. Математична модель накладного трансформаторного вихрострумовеого первинного вимірювального перетворювача абсолютного переміщення ..... 32	Hrihach V. F., Kukharчук V. V. Mathematical Model of Overhead Transformer Eddy Current Sensor of Absolute Movement
<b>ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ ТА ПРИСТРОЇ</b>	<b>MEASURING INSTRUMENTS AND DEVICES</b>
Черепашчук Г. А., Калашніков Е. Е., Потычак А. П. Весомісмерительные устройства для работы в специальных условиях эксплуатации ..... 38	Cherapashchuk G. A., Kalashnikov E. E., Potyichak A. P. Weight Measuring Devices for Work in Special Conditions of Operation
<b>МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ</b>	<b>MODELS AND MODELING</b>
Літвінов К. А. Математичні моделі реактора аміачної селітри з коливально імпульсним трендом вимірювальних параметрів ..... 45	Litvinov K. A. Mathematical Models of the Reactor of Ammonia Selectra with Oscillatory Impulsed Trend of Measuring Parameters
<b>ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>	<b>PARAMETERS AND CHARACTERISTICS</b>
Григоренко І. В., Григоренко С. М., Боженко М. М. Аналіз кореляції за оцінювання невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовлення губної помади ..... 50	Hryhorenko I. V., Hryhorenko S. M., Bozhenko M. M. Analysis of Correlation in the Evaluation of the Uncertainty of the Results of Temperature Measurement in the Process of Manufacturing Lipstick
<b>МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ</b>	<b>METHODS AND PROCEDURES</b>
Козубовський В. Р., Алаксєв І. П. Методи термостабілізації датчиків газу ..... 56	Kozubovskiy V. R., Alakshev I. P. Methods of Thermostabilization of Gas Sensors
<b>ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ</b>	<b>MILITARY METROLOGY</b>
Бойко В. М. Узагальнена інформаційна модель системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в Збройних Силах України: актуальні питання оптимізації системи ..... 61	Bojko V. M. Generalized Information Model of System of the Metrological Control and Management of Reference Signals of Time and Frequency which are Used in Armed Forces of Ukraine: Pressing Questions of Optimization of System
<b>КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ</b>	<b>COMPETENCE OF LABORATORIES</b>
Нижкоць О. А., Норіков В. М. Управління ризиками у лабораторії в рамках вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 ..... 67	Nyhtsuk O. A., Norikov V. M. Laboratory Risk Management Within the Requirements of DSTU ISO / IEC 17025: 2017
<b>ІНФОРМАЦІЯ</b>	<b>INFORMATION</b>
49	





**МІР І ВАГ МАРТИНА МІЛТОНА  
ТА ЗАКОНОДАВЧОЇ МЕТРОЛОГІЇ ЕНТОНІ ДОННЕЛЛАНА  
З НАГОДИ ВСЕСВІТНЬОГО ДНЯ МЕТРОЛОГІЇ 2020**



**«ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ МІЖНАРОДНОЇ ТОРГІВЛІ»**

**В**и коли-небудь змислювалися стосовно того, яка кількість різноманітних товарів і послуг є в обігу в міжнародній торгівлі у всьому світі? А чи уявляєте ви собі поточні обсяги транскордонних поставок енергії й енергоносіїв, скажимо, електрики або газу? Можливо, ви самі не володієте конкретними цифрами і сприймаєте результати вимірювань як даність, цілком покладаючись на добру волю виробників, перевізників та офіційних органів у тому, що стосується забезпечення чесності й безпеки торгових і транспортних операцій.

На щастя, на міжнародному рівні створені та функціонують системи, покликані гарантувати необхідні впевненість і довіру, коли йдеться стосовно точності подібних вимірювань та їх здатності виступити як міцний фундамент для міжнародної торгівлі.

За даними Світової організації торгівлі (СОТ) у 2018 р. Глобальний обіг товарів досяг рекордної позначки в 19,67 трильона американських доларів. Якщо врахувати, що лід час обчислення вартості значної частки продукції, яка бере участь у цьому глобальному обігу, використовуються законодавчо встановлені одиниці вимірювання, то стає очевидним, наскільки величезна і при цьому важлива роль належить метрології у сфері торгівлі по всьому світу.

Для захисту інтересів виробника і споживача на національному і міжнародному рівнях уряди держав ухвалюють відповідні технічні регламенти і стандарти. За оцінками Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР), під дію тих або інших стандартів чи регламентів підпадає приблизно 80% усього міжнародного торгового обігу. Звідси випливає потреба в надійній системі вимірювань, яка б дозволяла успішно застосовувати стандарти та регламенти, не створюючи при цьому технічних бар'єрів у торгівлі (ТБТ), що зумовлюють підвищення цін, перешкоджають вільному переміщенню товарів або змушують знову і знову проводити одні й ті ж випробування.

Упевненість у правильності оцінки відповідності технічним вимогам, що пред'являються, сприяє зменшенню витрат, зміцнює взаємну довіру між діловими кругами і споживачами; запорукою такої впевненості слугує наявність потужної й ефективної метрологічної системи.

Кожний із нас залежить від певних матеріальних благ, незалежно від того, чи розраховуємо ми отримати їх із магазину по сусідству, чи з країни десь на іншому кінці світу. Висока точність вимірювань гарантує безпеку і надійність поставки потрібних нам товарів і надання бажаних послуг.

Перебуваючи на посадах керівників Міжнародного бюро законодавчої метрології (МБЗМ) і Міжнародного бюро мір і ваг (МБМВ), ми докладасмо активні зусилля для підвищення значимості метрології у глобальній торгівлі з метою забезпечення чесних, довірчих і безпечних умов як для виробників, так і для споживачів.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.4-11

УДК: 502.55

# СИСТЕМА МЕТРОЛОГІЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ ЗА ОБРАЩЕНИЕМ ГИДРОХЛОРОФТОРУГЛЕРОДОВ

**The system of metrological support of measurements in the field of control over the circulation of hydrochlorofluorocarbons**

**А. В. Глебов**, кандидат технических наук, директор научно-производственного института,

e-mail: glebov@ukrcsm.kiev.ua

**С. П. Кисель**, начальник отдела,

e-mail: ctm@ukrcsm.kiev.ua

**С. Е. Якубов**, старший научный сотрудник,

e-mail: yakubov@ukrcsm.kiev.ua

ГП «Укрметртестстандарт»,

Киев, Украина,

**В. И. Згуря**, кандидат технических наук,

ведущий специалист отдела

аккредитации лабораторий,

e-mail: v.i.zgurya@ukr.net

Национальное агентство Украины

по аккредитации, Киев, Украина

**A. V. Glebov**, candidate of technical sciences, director of the research and production institute,

e-mail: glebov@ukrcsm.kiev.ua

**S. P. Kisiel**, head of department,

e-mail: ctm@ukrcsm.kiev.ua

**S. E. Yakubov**, senior researcher officer,

e-mail: yakubov@ukrcsm.kiev.ua

SE «Ukrmetrteststandart»,

Kiev, Ukraine,

**V. I. Zgurya**, candidate of technical sciences,

leading specialist of the laboratory

accreditation department,

e-mail: v.i.zgurya@ukr.net

National accreditation agency of Ukraine,

Kiev, Ukraine



А. В. Глебов



С. П. Кисель



С. Е. Якубов



В. И. Згуря

Приведены некоторые положения Монреальского протокола и справок к нему в части контроля за обращением озоноразрушающих веществ, в частности, гидрохлорфторуглеродов. Рассмотрены научная, нормативная, техническая и организационная основы метрологического обеспечения идентификации и количественного определения содержания гидрохлорфторуглеродов. Описаны процедуры отбора и подготовки к анализу проб, обладающих различными теплофизическими свойствами, процедура и результаты валидации соответствующей методики измерений на примере хладагента R-406A. Продемонстрирована метрологическая прослеживаемость результатов измерений и представлена информация о результатах международных сопоставлений соответствующих национальных эталонов.

Проанализовано взяті на себе Україною зобов'язання щодо виконання положень Монреальського протоколу та відповідних ратифікованих Україною поправок до нього щодо контролю за обігом гідрохлорфторуглеводів, які широко використовуються як хладагенти та, разом із тим, є озоноруйнівними речовинами.

Озоноруйнівні речовини використовуються у виробництві будівельних матеріалів, оборонній, атомній, автомобільній галузях промисловості, секторах цивільної промислової авіації,

об'їздах медичного призначення, на залізничному транспорті тощо, а їх виробництво в країні відсутнє. Імпорт цих речовин та товарів, що їх містять, а також їх споживання вимагає як регулювання на законодавчому рівні, так і наявності у країні відповідної інфраструктури, включаючи технічну та організаційну основу системи метрологічного забезпечення.

Розглянуто наукову, нормативну, технічну та організаційну основу метрологічного забезпечення ідентифікації та кількісного визначення вмісту гідрохлорфторуглеводів. Описано процедури відбору проб та підготовки зразків для аналізу зріджених вуглеводів, включаючи гідрохлорфторуглеводі з різними теплофізичними властивостями, процедуру та результати валидації відповідної методики вимірювання на прикладі хладагенту R-406A. Зазначено кінцеву точку ланцюга метрологічної прослеживаемості результатів вимірювань вмісту компонентів у зріджених вуглеводневих газах та надано інформацію стосовно результатів міжнародних звітів відповідних національних етилонів для підтвердження калібрувальних та вимірвальних можливостей країни-учасниці.

У результаті виконаної роботи автори вважають, що створена система визначення вмісту компонентів у зріджених вуглеводневих газах є надійним інструментом для виконання Україною своїх міжнародних зобов'язань щодо контролю за обігом озоноруйнівних речовин у країні.



This article analyzes the obligations undertaken by Ukraine to implement the provisions of the Montreal Protocol and the relevant amendments to the Protocol ratified by Ukraine regarding the control of the circulation of hydrochlorofluorocarbons, which are widely used as refrigerants, while being ozone-depleting substances.

Ozone-depleting substances are used in the production of building materials, defense, nuclear, civil and industrial aviation, medical and railway industries etc., and their production in the country is absent. The import of these substances and related products, as well as their consumption, requires both regulation at the legislative level and the availability of appropriate infrastructure in the country, including the technical and organizational basis of the metrological support system.

The scientific, normative, technical and organizational basis of metrological support of identification and quantitative determination of the content of hydrochlorofluorocarbons is considered.

The procedures for sampling and preparing samples for the analysis of liquefied hydrocarbons, including hydrochlorofluorocarbons with various thermophysical properties, the procedure and validation results of the corresponding measurement procedure using the example of R-406A refrigerant are described. The end point in the chain of metrological traceability of the results of measurements of the content of components in liquefied hydrocarbon gases is indicated and information is provided on the results of international comparisons of the relevant national standards in order to confirm the measuring and calibration capabilities of the participating countries.

As a result of the work performed, the authors consider what the created system for determining the content of components in hydrochlorofluorocarbons is a reliable tool for Ukraine to fulfil its international obligations for the control of the circulation of ozone-depleting substances.

**Ключевые слова:** Монреальский протокол, озоноразрушающие вещества, гидрохлорфторуглероды, хладагенты, методика измерений, молярная доля, эталон, сравнение, прослеживаемость.

**Ключові слова:** Монреальський протокол, озоноруйнівні речовини, гідрохлорфторуглеці, холодоагенти, методика вимірювань, молярна частка, еталон, звірення, простежуваність.

**Keywords:** Montreal Protocol, ozone-depleting substances, hydrochlorofluorocarbons, refrigerants, measurement procedure, molar fraction, measurement standard, comparisons, traceability.

**В** настоящее время Украина участвует в реализации международного проекта, фиксируемого Организацией Объединенных Наций (далее — ООН): «Начальная реализация ускоренного изъятия из обращения гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) в регионе стран с переходной экономикой». Целью данного проекта является прекращение текущего потребления ГХФУ на территории Украины согласно установленным критериям, а также предоставление стране помощи в выполнении положений [1] относительно потребления ГХФУ. В 2016 году была принята Кигалийская поправка [2] к [1], согласно которой установлены требования по регулированию фторированных парниковых газов по механизму сокращения потребления озоноразрушающих веществ.

В соответствии с международными обязательствами, взятыми на себя Украиной по выполнению положений [1], на основании пунктов 5 и 6 статьи 2F Поправки к [1], ратифицированной Украиной [3], наша страна обязалась запретить потребление озоноразрушающих веществ группы I приложения C до 01.01.2020, исключая потребление, ограниченное обслуживанием холодильного оборудования и оборудования для кондиционирования воздуха, в период с 2020 по 2030 год при условиях, определенных [2]. Это требование также закреплено [4], принятым сторонами Монреальского протокола 22.11.2012.

Озоноразрушающие вещества и фторированные парниковые газы (применяемые, в основном, в качестве заменителей озоноразрушающих веществ) используются как вспениватели, растворители и охладители в производстве строительных материалов, оборонной, атомной, автомобильной отраслях промышленности, секторах гражданской и промышлен-

ной авиации, объектах медицинского назначения, на железнодорожном транспорте и т.д.; а их производство в стране отсутствует. Импорт этих веществ и содержащих их товаров, а также их потребление требует как регулирования на законодательном уровне, так и наличия в стране соответствующей инфраструктуры, включающей в себя техническую и организационную основы системы метрологического обеспечения (наличия соответствующих средств измерительной техники, методик измерений, квалифицированного персонала, выполняющего аналитические исследования). Отсутствие возможности надлежащего контроля за оборотом ГХФУ не позволяет обеспечивать объективной отчетности Украины, как Стороны Монреальского протокола в озоновом Секретариате, о реальном состоянии дел по учету ввозимых/вывозимых веществ.

С целью обеспечения надлежащего контроля за обращением ГХФУ Государственным предприятием «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей» (ГП «Укрметрестандарт») была разработана методика измерений молярной доли компонентов в сжиженных углеводородных газах методом газовой хроматографии.

Метод измерения основан на использовании хроматографического разделения газовых смесей на отдельные компоненты на специальных набивных или капиллярных колонках с последующей регистрацией сигналов с помощью масс-спектрометрического детектора на этапе идентификации компонентов и термокондуктометричного или пламенно-ионизационного детектора на этапе количественного определения компонентов. Идентификацию



Таблиця 1. Теплофізическіє свойства некоторых хладагентов

Table 1. Thermophysical properties of some refrigerants

Обозначение хладагента	Озоноразрушающий потенциал	Температура кипения, °С	Обозначение хладагента	Озоноразрушающий потенциал	Температура кипения, °С
R-13	1,000	- 81,0	R-142b	0,065	- 10,0
R-410A	0,000	- 51,4	R-31	0,020	- 9,0
R-22	0,055	- 41,0	R-114	1,000	4,0
R-115	0,600	- 39,0	R-21	0,040	9,0
R-406A	0,036	- 32,7	R-11	1,000	24,0
R-12	1,000	- 30,0	R-123	0,020	27,0
R-134a	0,000	- 26,0	R-141b	0,011	32,0
R-124	0,022	- 12,0	R-113	0,800	48,0

компонентов проводят с помощью данных интегрированной библиотеки масс-спектров. Молярную долю компонентов рассчитывают методом сравнения с сертифицированными значениями тех же компонентов в стандартных образцах, которые применяют в таких же хроматографических условиях, что и анализируемые образцы.

Учитывая различные теплофизические свойства сжиженных углеводородных газов (см. табл. 1 на примере некоторых хладагентов), особое значение приобретает способ отбора образцов и их последующая пробоподготовка.

Учитывая низкую температуру кипения большинства хладагентов, анализируемую пробу из исходной тары (бочки, баллона, автомобильной или железнодорожной цистерны и т.д.) целесообразно отбирать в специальный баллон постоянного давления (см. рис. 1), который обеспечивает хранение

и транспортировку отобранной пробы, не допуская ее фазового разделения вне зависимости от внешних условий. Непосредственно перед отбором пробы камеру компенсационного газа баллона постоянного давления заполняют гелием таким образом, чтобы давление гелия в камере компенсационного газа было на (20—25) % выше, чем в емкости, из которой будет осуществляться отбор пробы для анализа. Контроль давления гелия в баллоне постоянного давления осуществляют при помощи манометра, которым оснащена камера компенсационного газа. Давление в емкости с исследуемой пробой определяют по манометру, которым оснащена соответствующая емкость. Рабочий объем баллона постоянного давления заполняют исследуемой пробой не более чем на 80 %, учитывая возможное температурное расширение пробы во время транспортировки или хранения.



Рис. 1. Баллон постоянного давления  
Fig. 1. Constant pressure cylinder



Аналитическую пробу готовят в вакуумированном стальном баллоне по [5] или в баллоне из алюминиевого сплава по [6] в следующей последовательности.

Определяют расчетное значение молярной доли компонентов в смеси по формуле:

$$N_{\text{mol}} = \frac{\frac{N_{\text{me}}}{M_i}}{\sum \frac{N_{\text{me}}}{M_i}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{mol}}$  — молярная доля компонента  $i$ ;

$N_{\text{me}}$  — массовая доля компонента  $i$ , % (согласно технической спецификации производителя);

$M_i$  — молярная масса компонента  $i$ , г/моль.

Молярную долю компонента в чистом веществе принимают равной 1. Молярные массы компонентов и соответствующие неопределенности — согласно [7].

Рассчитывают молярную массу смеси ( $M_s$ , г/моль) по формуле:

$$M_s = \sum (N_{\text{mol}} \cdot M_i). \quad (2)$$

Рассчитывают плотность смеси ( $\rho_s$ , г/см<sup>3</sup>) по формуле:

$$\rho_s = \sum (N_{\text{mol}} \cdot \rho_i). \quad (3)$$

где  $\rho_i$  — плотность компонента  $i$ , г/см<sup>3</sup>.

Плотность соответствующих чистых веществ приведена в [8].

Рассчитывают массу смеси ( $m_s$ , г), которую необходимо ввести в баллон:

$$m_s = \frac{0,7 \cdot M_s \cdot V_0}{V_m}, \quad (4)$$

где 0,7 — поправочный коэффициент, для гарантированного полного испарения смеси в подготовленном баллоне;

$M_s$  — молярная масса смеси, рассчитанная по формуле (2), г/моль;

$V_0$  — вместимость баллона, дм<sup>3</sup>;

$V_m$  — молярный объем (24 дм<sup>3</sup>/моль при атмосферном давлении 101,3 кПа и температуре 20 °С).

Для смесей, в состав которых входят компоненты, температура кипения которых превышает или равна 0 °С, необходимо выполнить проверку критического давления подготовленной пробы, для чего:

• рассчитывают массу гелия для введения в баллон ( $m_{\text{He}}$ , г) с учетом 10-ти кратного разбавления по формуле:

$$m_{\text{He}} = m_s \cdot \frac{C_{\text{He}}}{C_s} \cdot \frac{M_{\text{He}}}{M_s}, \quad (5)$$

где  $m_s$  — масса смеси, рассчитанная по формуле (4), г;

$C_{\text{He}}$  — доля гелия, 90 %;

$C_s$  — доля смеси, 10 %;

$M_{\text{He}}$  — молярная масса гелия (4,0026 г/моль);

$M_s$  — молярная масса смеси, рассчитанная по формуле (2), г/моль;

• рассчитывают давление в баллоне ( $p_0$ , 10<sup>5</sup> Па) после введения смеси и гелия без учета фактора сжимаемости:

$$p_0 = \left( \frac{m_s}{M_s} + \frac{m_{\text{He}}}{M_{\text{He}}} \right) \cdot \frac{V_m}{V_0}; \quad (6)$$

• рассчитывают максимально допустимое давление ( $p_n$ , 10<sup>5</sup> Па) подготовленной пробы для компонента, температура кипения которого превышает или равна 0 °С, по формуле:

$$p_n = \frac{P_{\text{нас}} \cdot 100}{1,4 \cdot C_s \cdot N_{\text{mol}}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{нас}}$  — давление насыщенного пара  $i$ -го компонента при 15 °С;

1,4 — коэффициент снижения давления в баллоне для сохранения стабильности свойств подготовленной пробы;

• рассчитанное давление в баллоне ( $p_0$ ) должно быть меньше или равным максимально допустимому давлению ( $p_n$ ). В противном случае необходимо уменьшить массу смеси ( $m_s$ ) до такого значения, при котором будет выполняться условие:  $p_0 \leq p_n$ .

Рассчитывают объем смеси ( $V_s$ ), который необходимо ввести в баллон, по формуле:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s}. \quad (8)$$

Рассчитанный по формуле (8) объем пробы из баллона постоянного давления вводят в предварительно оттарированный баллон и взвешивают на весах. Определяют действительную массу введенной в баллон исследуемой пробы ( $m_{\text{act}}$ , г).

Баллон подсоединяют к установке для последовательного дозирования газов в баллоны под давлением (рис. 2) и наполняют гелием. Массу гелия, которую необходимо ввести в баллон, рассчитывают по формуле:

$$m_{\text{He}} = m_{\text{act}} \cdot \frac{C_{\text{He}}}{C_s} \cdot \frac{M_{\text{He}}}{M_s}. \quad (9)$$

Баллон с подготовленной анализируемой пробой выдерживают в помещении лаборатории не менее 72 часов для ее гомогенизации.

Идентификацию компонентов в анализируемой пробе выполняют с использованием масс-спектрометрического детектора.

Для количественного определения содержания компонентов в анализируемой пробе готовят 3 калибровочные газовые смеси гравиметрическим методом согласно [9] с содержанием определяемого компонента:

• максимально возможным согласно технической спецификации на конкретный исследуемый объект;



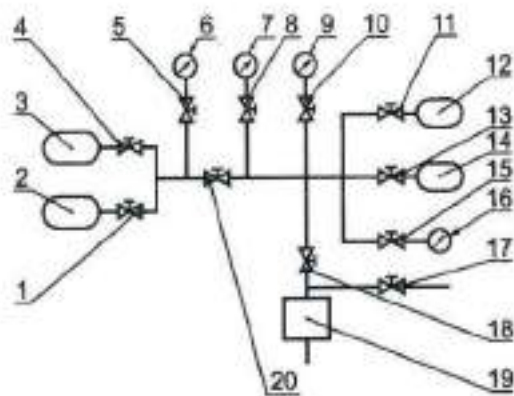


Рис. 2. Принципіальна схема установки для последовательного дозирования газов в баллоны под давлением

1, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 20 — вентили;  
2, 3 — баллоны со стандартными образцами или гелием; 6, 7, 9 — манометры;  
12, 14 — баллоны для калибровочных газовых смесей или анализируемой пробы; 16 — вакуумметр;  
19 — вакуумный насос

Fig. 2. Schematic diagram of the installation for sequential dosing of gases in pressure cylinders  
1, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 20 — valves;  
2, 3 — cylinders with standard samples or helium;  
6, 7, 9 — pressure gauges; 12, 14 — cylinders for calibration gas mixtures or the analyzed sample;  
16 — a vacuum gauge; 19 — vacuum pump

- равным номинальному значению компонента согласно технической спецификации на конкретный исследуемый объект;

- на 5% ниже номинального значения компонента согласно технической спецификации на конкретный исследуемый объект (для чистых веществ) или минимально возможным согласно технической спецификации на конкретный исследуемый объект (для смеси веществ).

Молярную долю компонентов в анализируемой пробе ( $x_{\text{анал}}$ , %) определяют по функции анализа согласно [10].

Расчетное значение молярной доли основного компонента в анализируемой пробе чистого вещества ( $x_{\text{рас}}$ , %) определяют по формуле:

$$x_{\text{рас}} = \frac{\frac{m_{\text{ад}}}{M_i}}{\frac{m_{\text{ад}}}{M_i} + \frac{m_{\text{доб}}}{M_{\text{доб}}}} \cdot 100. \quad (10)$$

Значение молярной доли основного компонента в анализируемой пробе чистого вещества ( $N_{\text{анал}_i}$ , %) рассчитывают по формуле:

$$N_{\text{анал}_i} = \frac{x_{\text{анал}}}{x_{\text{рас}}} \cdot 100. \quad (11)$$

Значение молярной доли  $i$ -го компонента в анализируемой пробе смеси веществ ( $N_{\text{анал}_i}$ , %)

рассчитывают по формуле:

$$N_{\text{анал}_i} = \frac{x_{\text{анал}}}{\sum x_{\text{анал}}} \cdot 100. \quad (12)$$

Массовую долю  $i$ -го компонента в анализируемой пробе ( $N_{\text{масс}_i}$ , %) рассчитывают по формуле:

$$N_{\text{масс}_i} = \frac{N_{\text{анал}_i} \cdot M_i}{\sum (N_{\text{анал}_j} \cdot M_j)} \cdot 100. \quad (13)$$

Валидацию методики измерений проводили с учетом положений [11]. При валидации методики определяли следующие характеристики:

- селективность (на этапе идентификации компонентов);
- правильность,  $b_{\text{анал}}$ , % (смещение);
- прецизионность (предел сходимости,  $r_{\text{анал}}$ , % и предел промежуточной прецизионности,  $I_{\text{анал}}$ , %);
- относительную суммарную стандартную неопределенность  $u_{\text{анал}}$ , %;
- устойчивость.

Результаты валидации методики измерений представлены на примере анализа компонентов смеси хладагентов R-406A, в состав которого входят: хлордифторметан (R-22), 1-хлор-1,1-дифторэтан (R-142b) и изобутан (R-600a). При валидации применяли: газовый хроматограф Agilent 7890A с масс-спектрометрическим детектором (на этапе идентификации компонентов смеси) и газовый хроматограф HP 6890 с термокондуктометрическим детектором (на этапе количественного определения компонентов смеси), входящие в состав вторичного эталона единицы молярной доли компонентов в газовых средах ВЕТУ 05-01-01-03.

Аналитическая селективность характеризует степень применимости метода для определения конкретных компонентов в смеси без помех со стороны других компонентов с аналогичными свойствами. Проверка селективности необходима, поскольку пик на хроматограмме может быть идентифицирован как соответствующий определенному компоненту на том основании, что стандартный образец, содержащий этот компонент, вызывает сигнал в той же точке хроматограммы, однако неизвестно, обусловлен этот сигнал данным компонентом или каким-либо другим веществом, элюирующимся одновременно. Из литературных источников известно, что высокую селективность обеспечивают современные хроматографы с масс-спектрометрическим детектором. Тем не менее, желательным является подтверждение результатов идентификации с использованием еще, как минимум, одного детектора. Для подтверждения селективности методики анализировали стандартные образцы, содержащие исследуемые компоненты, используя газовые хроматографы



с масс-спектрометрическим и термокондуктометрическим детекторами. Полученные результаты оказались идентичными, использование дополнительных способов подтверждения селективности методики считали нецелесообразным.

Правильность характеризует гипотетическую возможность методики обеспечивать близкие к опорному значению результаты измерений. Правильность не является величиной и, следовательно, не может быть выражена в числовом виде. Однако, можно получить практическую оценку правильности через «смещение». Для определения смещения применяли по 2 стандартных образца с содержанием определяемых компонентов между 1-й и 2-й и 2-й и 3-й точками градуировочной характеристики. Смещение ( $h_{\text{см}}$ , %) определяли как среднее арифметическое разности между средними значениями результатов измерений и соответствующими опорными значениями.

Исследование прецизионности проводили с применением одного стандартного образца для каждого исследуемого компонента в границах его рабочего диапазона. Исследования выполняли в одной лаборатории при таких условиях измерения:

- \* условия сходимости;
- \* условия промежуточной прецизионности с отличием по фактору «время»;
- \* условия промежуточной прецизионности с отличием по факторам «время» и «оператор».

Выполняли по 6 независимых измерений мольной доли каждого исследуемого компонента для каждого из указанных условий. Вычисляли среднее значение результатов повторных измерений для  $j$ -го условия измерения ( $\bar{x}_j$ ) для всех  $j = 1, 2, 3$ :

$$\bar{x}_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I x_{ji}, \quad (14)$$

где  $x_{ji}$  — результат  $i$ -го повторного измерения для  $j$ -го условия;

$I$  — число повторных измерений для каждого условия ( $I = 6$ ).

Вычисляли общее среднее из  $J$  средних значений для всех условий ( $\bar{x}$ ):

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{x}_j. \quad (15)$$

Вычисляли суммы квадратов ( $SS_1$  и  $SS_2$ ) и соответствующие числа степеней свободы ( $v_1$  и  $v_2$ ):

$$SS_1 = J \sum_{j=1}^3 (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \quad v_1 = J - 1 = 2, \quad (16)$$

$$SS_2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^J (x_{ji} - \bar{x}_j)^2, \quad v_2 = J(I - 1). \quad (17)$$

Вычисляли средние квадраты ( $MS_1$ ,  $MS_2$ ), которые являются оценками соответствующих дисперсий:

►  $MS_1$  — оценка дисперсии, характеризующей рассеяние результатов измерений между условиями;

►  $MS_2$  — оценка дисперсии, характеризующей рассеяние результатов измерений при определенных условиях (дисперсия сходимости):

$$MS_1 = \frac{SS_1}{v_1}, \quad (18)$$

$$MS_2 = \frac{SS_2}{v_2}. \quad (19)$$

Рассчитывали относительное стандартное отклонение сходимости ( $s_r$ , %) по формуле:

$$s_r = \frac{\sqrt{MS_2}}{\bar{x}} \cdot 100. \quad (20)$$

Рассчитывали относительное стандартное отклонение промежуточной прецизионности ( $s_p$ , %) по формуле:

$$s_p = \frac{\sqrt{MS_1 + MS_2}}{\bar{x}} \cdot 100. \quad (21)$$

Рассчитывали предел сходимости ( $r$ , %) по формуле:

$$r = \sqrt{2} \cdot t \cdot s_r, \quad (22)$$

где  $t$  — двухсторонний критерий Стьюдента для числа степеней свободы  $v_2$ .

Рассчитывали предел промежуточной прецизионности ( $l$ , %) по формуле:

$$l = \sqrt{2} \cdot t \cdot s_p. \quad (23)$$

При определении суммарной стандартной неопределенности в бюджет неопределенности включали:

▲ в качестве неопределенности по типу А — стандартное отклонение промежуточной прецизионности, рассчитанное по формуле (21), с коэффициентом чувствительности 1;

▲ стандартную неопределенность с коэффициентом чувствительности минус 1, обусловленную смещением, рассчитанную по формуле:

$$u_s(b) = \frac{h_{\text{см}}}{\sqrt{3}}; \quad (24)$$

▲ наибольшее из стандартных неопределенностей сертифицированных значений стандартных образцов, которые применяли для определения смещения с учетом коэффициента охвата  $k = 2$ , принятого для расчета расширенной неопределенности, согласно [10], сертифицированных значений стандартных образцов для доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

При оценке устойчивости методики принимали во внимание, что ее характеристики могут быть изменены при несоответствии условий выполнения измерений, указанных в методике. Однако, указанные условия жестко контролируются оператором при выполнении измерений с занесением соответствующих записей в протокол измерений. При



Таблиця 2. Результати валідації методики измерений для компонентів суміші хладагентів R-406A

Table 2. Validation results of the measurement procedure for the components of the R-406A refrigerant mixture

Обозначение компонента	$r_{\text{полн.}} \%$	$r_{\text{полн.}} \%$	$r_{\text{полн.}} \%$	$r_{\text{полн.}} \%$
R-22	- 0,65	0,225	0,447	0,19
R-142b	- 0,0053	0,176	0,513	0,20
R-600a	- 0,092	0,828	1,612	0,65

несоответствии реальных условий требованиям методики измерения прекращают, предпринимают соответствующие меры и возобновляют измерения только после установления необходимых условий измерений.

Результаты валідації методики представлені в табл. 2.

Результаты измерений содержания компонентов в сжиженных углеводородных газах, в том числе ГХФУ, прослеживаются к Государственному первичному эталону единицы молярной доли компонентов в газовых средах ДЕТУ 05-01-95. В свою очередь указанный первичный эталон подтверждает свои метрологические характеристики путем участия в международных сличениях [12].

Основная проблема, препятствующая международному сотрудничеству в области контроля за обращением хладагентов (приобретению/продаже сертифицированных стандартных образцов, проведению международных межлабораторных сличений, в том числе, с целью проверки квалификации, проведению международных сличений эталонов для установления их эквивалентности и обеспечения метрологической прослеживаемости), — это таможенные барьеры свободному перемещению стан-

дартных образцов (в том числе, озоноразрушающих хладагентов) между странами. Данная проблема детально отражена в [13]. Зачастую власти разных стран рассматривают стандартные образцы как некую вещественную форму (образцы человеческого, животного и растительного происхождения, химические вещества, взрывчатка, лекарства, и т.д.), а не как необходимые инструменты для выполнения измерений. Также проблема отражена в документе COOMET [14], согласно которому одной из целей сотрудничества по созданию и применению стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов в рамках COOMET является устранение таможенных барьеров при передаче стандартных образцов из одной страны в другую с целью проведения межлабораторных сличений, межлабораторной характеристики и других видов метрологических работ.

**ВЫВОДЫ**

1. Созданная система определения содержания компонентов в сжиженных углеводородных газах, в том числе ГХФУ, является надежным инструментарием для выполнения Украиной взятых на себя международных обязательств по выполнению положений [1] в части контроля за обращением озоноразрушающих веществ.

2. Измерительные возможности ПП «Укрметр-тестстандарт» в области анализа сжиженных углеводородных газов признаны на международном уровне и размещены на официальном сайте Международного бюро мер и весов.


3. Результаты измерений содержания компонентов в сжиженных углеводородных газах, в том числе ГХФУ, прослеживаются к национальному эталону единицы молярной доли компонентов в газовых средах ДЕТУ 05-01-95.

4. Дальнейшее развитие данного направления, углубление международного сотрудничества возможны после решения вопроса о свободном перемещении стандартных образцов между странами.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES**

1. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Montreal, 16 september 1987 (Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой).
2. Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Kigali, 15 October 2016 (Поправка к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой).
3. Закон Украины «О ратификации Поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой» от 02.11.2000 № 2083-III (Law of Ukraine «On Ratification of the Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer» of November 2, 2000 № 2083-III).
4. Решение XXIV/18 двадцать четвертого совещания сторон Монреальского протокола: «Несоблюдение Монреальского протокола Украиной» (Decision XXIV/18 of the Twenty-Fourth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol: «Non-compliance with the Montreal Protocol by Ukraine»).
5. ДСТУ 3245-95 Балони сталеві зварні для скрапленнях



- вуглеводневих газів на тиск до 1,6 МПа. Загальні технічні умови (DSTU 3245-95 Welded steel cylinders for liquefied hydrocarbon gases at pressures up to 1.6 MPa. General technical conditions).
6. EN 1975:1999 Transportable gas cylinders. Specification for the design and construction of refillable transportable seamless aluminum and aluminum alloy gas cylinders of capacity from 0,5 liters up to 150 liters (Переносные газовые баллоны. Технические требования к конструкции и изготовлению переносных бесшовных газовых баллонов из алюминия и алюминиевых сплавов многократного использования вместимостью от 0,5 л до 150 л).
  7. IUPAC, Commission on atomic weights and isotopic abundances: Atomic Weights of Elements, biennial review, 2007. (Комиссия по атомным массам и распространённости изотопов Международного Союза теоретической и прикладной химии, 2007).
  8. GAS ENCYCLOPAEDIA, Elsevier science publishing company inc., 1976.
  9. ДСТУ ISO 6142-1:2017 Аналіз газів. Приготування калібрувальних газових сумішей. Частина 1. Гравіметричний метод для сумішей класу I (ISO 6142-1:2015 Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures — Part 1: Gravimetric method for Class I mixtures).
  10. ДСТУ ISO 6143:2003 Аналіз газів. Методи компарування для визначання та перевіряння складу повірочних газових сумішей (ISO 6143:2001 Gas analysis — Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures).
  11. Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods — A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics (Руководство Eurachem: Пригодность аналитических методов для конкретного применения. Руководство для лабораторий по валидации методов к смежным вопросам).
  12. [www.bipm.org/utls/common/pdf/final\\_reports/QM/S4/COOMET.QM-S4.pdf](http://www.bipm.org/utls/common/pdf/final_reports/QM/S4/COOMET.QM-S4.pdf)
  13. ISO/TR 11773:2013 Global distribution of reference materials (Глобальное распространение стандартных образцов).
  14. COOMET D3:2008 Меморандум о сотрудничестве по созданию и применению стандартных образцов состава и свойства вещества и материалов в рамках COOMET (COOMET D3: 2008 Memorandum of Cooperation for the development and application of standard samples of the composition and properties of substances and materials within COOMET). 

Отримано / received: 02.06.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. П.Г. Круковським (Україна).  
 Prof. P.G. Krukovskiy, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.12-20

УДК 53.088.22:539.1.074.6:006.915:621.397.46

# ВОСХОДЯЩИЙ И НИСХОДЯЩИЙ ПОДХОДЫ К ОЦЕНИВАНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СВЕТОВОГО ВЫХОДА СЦИНТИЛЛЯТОРОВ (ОБЗОР)

## Ascending and Descending Approaches to Estimating the Uncertainty of Measurements of the Light Output of Scintillators (REVIEW)

**Б. В. Гринев**, академик НАН Украины,  
директор Института сцинтилляционных  
материалов НАН Украины,  
председатель ТН 99.

**Н. Р. Гурджян**, инженер 1-й категории,

**О. В. Зеленская**, ведущий инженер,

**В. Р. Любинский**, заведующий отделом метрологии,  
заместитель председателя ТН 99,

**Н. И. Молчанова**, кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,

**Л. И. Мицай**, ведущий инженер,

**В. А. Тарасов**, доктор физико-математических наук,  
заведующий отделом сцинтилляционной радиометрии  
и радиохимических методов исследования,  
Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины,  
г. Харьков, Украина,  
e-mail: nana.mneyan@gmail.com

**B. V. Grynyov**, Academic of National Academy  
of Sciences (NAS) of Ukraine, Director of the Institute for  
Scintillation Materials of NAS of Ukraine,  
Chief Researcher, Head of TC 99.

**N. R. Gurdzhian**, Engineer of the First Category,

**O. V. Zelenskaya**, Leading Engineer,

**V. R. Lyubynskiy**, Metrological Department Chief,  
Deputy Head of TC 99,

**N. I. Molchanova**, Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,

**L. I. Mityay**, Leading Engineer,

**V. A. Tarasov**, Doctor of Physical  
and Mathematical Sciences,  
Department Head,  
Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine,  
Kharkov, Ukraine,  
e-mail: nana.mneyan@gmail.com

Настоящий обзор содержит анализ опубликованных авторами в 2012—2020 гг. работ, посвященных оценке качества результатов измерений технического светового выхода (ТСВ), в фотонах/МэВ (фот/МэВ), сцинтилляторов, изготовленных в Институте сцинтилляционных материалов Национальной Академии наук Украины (ИСМА НАНУ).

Проводилось оценивание неопределенности результатов измерений ТСВ сцинтилляторов при восходящем (модельном) подходе, в соответствии с ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [2], и точности — при нисходящем (экспериментальном) подходе, в соответствии с ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1-2-4:2005 [5, 13, 16].

Показано, что рассматриваемые подходы, несмотря на различные методики расчетов, дают значения оценок качества результата измерений ТСВ, отличающиеся на (2—5) %.

Цей огляд містить аналіз опублікованих авторами у 2012—2020 рр. робіт, присвячених оцінюванню якості результатів вимірювань технічного світлового виходу (ТСВ), у фотонах/Мев (фот/Мев), сцинтиляторів, які були виготовлені в Інституті сцинтиляційних матеріалів Національної Академії наук України (ИСМА НАНУ).

Проводився порівняльний аналіз висхідного (модельного) і низхідного (експериментального) підходів до оцінювання якості результатів вимірювань технічного світлового виходу (ТСВ) циліндричних сцинтиляторів на основі монокристалів NaI (Тl), CsI (Тl), CsO, BGO, p-терфенілу, антрацену, стилбену та PS.

Розраховувалися оцінки показників невизначеності, за висхідного підходу до оцінювання, відповідно до ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [2], та точності, за низхідного підходу, відповідно до ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1-2-4:2005 [5, 13, 16]. Результати оціню-

вання показників невизначеності та точності представлені в Таблицях 1—2 та на рис. 2 і 6.

Показано, що основний внесок у невизначеність (точність) результату вимірювання ТСВ вносить невизначеність (похибка) атестації за ТСВ робочого зразка.

Встановлено, що оцінки аналогічних складових показників невизначеності та точності вимірювання ТСВ відрізняються, що пов'язано з різними методиками розрахунку. Однак, оцінки розширеної невизначеності вимірювання ТСВ, за висхідного підходу, та точності, за низхідного підходу, дають порівняно близькі значення: 7,52% — 7,19% — для CsI(Tl) та 7,71% — 7,66% — для BGO. Це зумовлено домінуючим внеском у величину сумарної невизначеності (правильності) результату вимірювання ТСВ випробуваного сцинтилятора невизначеності (похибки) атестації за ТСВ робочого зразка.

This review contains an analysis published by the authors in 2012-2020 works devoted to assessing the quality of the technical light output (TLO) measurement results. TLO in photons / MeV (phot/MeV) were determined for scintillators manufactured at the Institute for Scintillation Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (ISMA NASU).

Cylindrical scintillators based on NaI(Tl), CsI(Tl) single crystals, CsO, BGO, p-terphenyl, anthracene, stilbene and PS were investigated. A comparative analysis of ascending (model) and descending (experimental) approaches to assessment the quality of TLO measurement results was carried out.

Estimates of uncertainty indicators were calculated with an ascending approach to estimation in accordance with [2], and accuracy indicators with a descending approach in accordance with [5, 13 and 16]. The results of the uncertainty and accuracy indicators estimation are presented in Tables 1-2 and Figures 2 and 6.



It is shown that the main contribution to the uncertainty (accuracy) of the TLO measurement results is made by the uncertainty (error) in the working sample TLO certification.

It was found that the estimates of similar components of the TLO measurement uncertainty and accuracy are different, what is associated with different calculation methods. However, estimates

of the expanded uncertainty TLO measurement with the ascending approach and accuracy with the descending approach give relatively close values: 7,52% — 7,19% for CsI(Tl) and 7,71% — 7,66% for BGO. This is due to the dominant contribution to the total uncertainty (correctness) of the test scintillator TLO measurement result, the uncertainty (error) of the working sample TLO certification.

**Ключевые слова:** сцинтиллятор, технічний світловий вихід, неопределенность, повторяемость, воспроизводимость, приближенность, правильность, точность.

**Ключові слова:** сцинтилятор, технічний світловий вихід, невизначеність, повторюваність, відтворюваність, приближеність, правильність, точність.

**Keywords:** scintillator, technical light output, uncertainty, repeatability, reproducibility, precision, trueness, accuracy.

## ВВЕДЕНИЕ

Данная обзорная работа продолжает цикл работ, посвященных оцениванию качества измерения ТСВ, в фот/МэВ, различных сцинтилляторов производства ИСМА НАНУ. Результаты этих работ были опубликованы авторами в 2012-2020 гг. в различных журналах.

Началу публикаций указанных работ предшествовало вступление Украины в 2008 г. во Всемирную Торговую Организацию. Одними из требований для вступления в данную организацию являлись усовершенствование системы стандартизации, гармонизация стандартов и других отечественных нормативных документов (НД) с международными документами. Внедрение гармонизации давало возможность получения одинаковых результатов измерений, проведенных в различных, в том числе и в зарубежных лабораториях.

В настоящее время основной методологией оценки качества измерений является международная рекомендация GUM [1] (1993 г.), реализующая концепцию «неопределенности измерений» в виде модельного (восходящего) подхода. «Неопределенность (uncertainty) измерений» как параметр, в соответствии с [1], характеризует рассеяние множества возможных значений измеряемой величины.

В Украине практические рекомендации по применению [1] представлены в Руководстве [2] (2006 г.). Однако, в процессе практического применения [1] было установлено наличие у него ряда существенных недостатков [3].

В то же время был разработан международный стандарт ISO 5725 [4] (1994 г.) по оценке точности измерений, основанный на использовании экспериментального (нисходящего) подхода. В соответствии с [4], параметр «точность» (accuracy) характеризует степень близости результата измерений к принятому опорному значению (accepted reference value). Гармонизированным документом к этому стандарту в Украине является ДСТУ ГОСТ ISO 5725 [5] (2005 г.).

В основе указанных НД лежат различные подходы к оцениванию неопределенности (точности) измерений.

Как указано в [6], «подход GUM описывает неопределенность в виде дисперсии, полученной на основе дисперсий входных данных, соответствующих математической модели. При экспериментальном подходе используется тот факт, что, если одни и те же воздействия заметно изменяются в процессе исследования воспроизводимости (повторяемости), то наблюдаемая дисперсия и является оценкой исследуемой неопределенности (точности)». В идеале обе оценки должны совпадать. Однако на практике значения неопределенности, полученные на основе различных подходов, отличаются. Причиной отличия могут служить неполные математические модели, при наличии неизвестных воздействий, неверное определение оценки значимости вклада в неопределенность либо неполное или несущественное изменение всех воздействующих факторов в процессе оценки воспроизводимости (повторяемости). Поэтому сравнение двух различных оценок полезно для оценки полноты модели измерений.

Целью данной работы является сравнение полученных при восходящем и нисходящем подходах, оценок неопределенности (точности) измерения ТСВ различных сцинтилляторов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Объекты исследования

Методом сравнения с рабочим образцом, в соответствии с [7], определялся ТСВ,  $C_{\text{пр}}$ , в фот/МэВ, цилиндрических сцинтилляторов на основе монокристаллов NaI(Tl), CsI(Tl), CWO, BGO, *n*-терфенила, антрацена, стильбена и пластмассового сцинтиллятора (ПС). Внешний вид, размеры всех образцов, кроме ПС, и аппаратура описаны в работе [8]. Размеры образца ПС составляли  $\varnothing 45 \times 20$  мм. Измерения проводились с использованием ФЭУ R1307 «Hamamatsu» при возбуждении сцинтилляторов источником гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_{\gamma} = 662$  кэВ).

Проводилось  $n = 9$  измерений (3 серии по 3 измерения) в условиях внутрилабораторной воспроизводимости между сериями и повторяемости внутри серии. Предполагалось нормальное распределение



результатов измерений с доверительной вероятностью  $P_d = 0,95$ .

**2. Восходящий (модельный) подход**

Подход к оцениванию неопределенности измерений, используемый в [2], или модельный подход, основан на построении линеаризованной модели в виде функции  $F$ , связывающей результат измерений  $Y$  (выходную величину) с  $N$  входными величинами  $X$  (влияющими факторами):

$$Y = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N). \quad (1)$$

Причем величины  $X_1, X_2, X_3$  могут быть непосредственно измеряемыми величинами и также зависеть от других поправочных коэффициентов, учитывающих систематические эффекты:

$$X_1 = F(Z_1, Z_2, \dots, Z_c) \quad (2)$$

и т.д.

Для корректной оценки неопределенности результата измерений, при модельном подходе, необходимо выявить как можно большее количество влияющих факторов (источников неопределенности). Затем корректно оценить неопределенности всех выявленных источников и сложить их по определенным правилам. Из-за ориентации на входные величины этот подход называют восходящим [6].

В наших работах [9—10] (2012—2013 гг), на примерах сцинтилляторов NaI(Tl), CsI(Tl), CWO и BGO, была составлена графическая модель измерений в виде векторной диаграммы причина-следствие и показано, что величина технического светового выхода испытуемого сцинтиллятора  $C_{\text{рп}}$ , определяемая относительным методом сравнения с рабочим образцом, является функцией следующих входных величин:

$$C_{\text{рп}} = F(C_{\text{рб}}, K, f, f_{\text{гп}}, a_1, a_2, a_3), \quad (3)$$

где:  $C_{\text{рб}}$  — ТСВ рабочего образца, в фот/МэВ;  $K$  — нормирующий множитель, используемый в расчетах при сравнении образцов с различными размерами выходных окон;  $f$  — отношение амплитуд сигналов от испытуемого и рабочего образцов;  $f_{\text{гп}}$  — ограниченная чувствительность сигналы многоканального анализатора, в каналах;  $a_1$  — методическая погрешность;  $a_2$  — фактор влияния температуры окружающего воздуха;  $a_3$  — фактор влияния непрерывной работы спектрометрического устройства.

В свою очередь, величина  $f_{\text{гп}}$  также является функцией определенных величин:

$$f_{\text{гп}} = F(V_{\text{а}}, V_{\text{а}}, V_0), \quad (4)$$

где:  $V_{\text{а}}$  — значение амплитуды импульсов, соответствующее максимуму пика полного поглощения рабочего образца, в каналах;  $V_0$  — значение амплитуды импульсов, соответствующее максимуму пи-

ка полного поглощения испытуемого образца, в каналах;  $V_0$  — значение начальной точки характеристики преобразования спектрометрического устройства, в каналах.

Все перечисленные факторы обладают собственной неопределенностью и формируют суммарную и расширенную неопределенности результата измерений технического светового выхода.

В [9—10] было показано, что влияние методической погрешности  $a_1$  на неопределенность результата измерения существенно меньше, чем влияние других факторов, что позволяет пренебречь фактором  $a_1$ . Проведение измерений в условиях кондиционированного помещения и применение систем стабилизации измерительного тракта позволяют пренебречь влиянием факторов  $a_2$  и  $a_3$ .

Влияние на неопределенность результата множителя  $K$  в данной работе также не рассматривается, поскольку испытуемые и рабочие образцы имеют одинаковые или близкие размеры выходных окон.

Таким образом, математическую модель искомой величины ТСВ,  $C_{\text{рп}}$ , можно представить в виде следующей функции:

$$C_{\text{рп}} = F(C_{\text{рб}}, f, V_{\text{а}}, V_0). \quad (5)$$

Схема восходящего (модельного) подхода к оцениванию неопределенности результата измерения ТСВ представлена на рис. 1.

Как следует из схемы, среднеквадратическое отклонение (СКО) отношения амплитуд  $S(f)$  определяет статистический разброс величины  $f$  и, в соответствии с [2], формирует неопределенность результата по типу А, в долях. Значение СКО светового выхода,  $S(C_{\text{рб}})$ , в фот/МэВ, формирует неопределенность

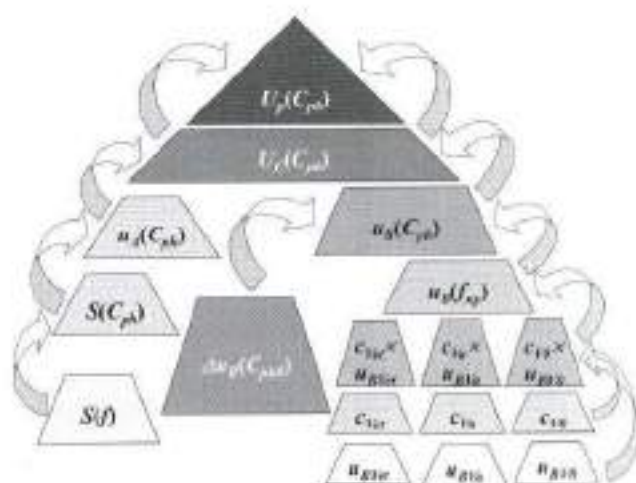


Рис. 1. Схема восходящего (модельного) подхода к оцениванию неопределенности результата измерения ТСВ сцинтилляторов

Fig.1. Scheme of the ascending (model) approach to evaluation the uncertainty of the measurement result scintillators TLO



результата измерения по типу А,  $u_A(C_{ph})$  уже в фот/МэВ.

Аттестованное значение суммарной погрешности ТСВ рабочего образца,  $\Delta C_{ph}$  [11] и, соответственно, неопределенности  $\Delta u_A(C_{ph})$  вносит значительный вклад в неопределенность результата измерения  $u_B(C_{ph})$ , вычисленную по типу В.

Коэффициенты чувствительности приборной неопределенности по типу В,  $c_{V_{et}}$ ,  $c_{V_a}$ ,  $c_{V_0}$ , к неопределенности отсчетов  $V_{et}$ ,  $V_a$ ,  $V_0$  рассчитывались как частные производные от  $C_{ph}$  по каждому фактору. Значения стандартных неопределенностей  $u_{B_{et}}$ ,  $u_{B_a}$ ,  $u_{B_0}$  вычислялись в соответствии с [2]. Вклад каждого фактора  $x_i$  в  $u_B(C_{ph})$  определялся в соответствии с [2], как произведение  $(c_{x_i} \times u_{B_{x_i}})$ .

Таким образом, согласно схеме, при восходящем подходе выражение для оценивания относительной расширенной неопределенности результата  $n$  измерений ТСВ сцинтилляторов,  $\hat{U}_p(C_{ph})$ , можно представить в виде:

$$\hat{U}_p(C_{ph}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{phi} - \bar{C}_{phi})^2}{\bar{C}_{ph}^2 \times [n(n-1)]} \times 10^4 + \frac{\Delta u_A^2(C_{ph})}{B} + \left[ \frac{u_{BV_{et}}}{(V_{et} + V_0)} \right]^2 + \left[ \frac{u_{BV_a}}{(V_a + V_0)} \right]^2 + \left[ \frac{u_{BV_0}}{(V_a + V_0)} \right]^2} \times 10^4. \quad (5)$$

Подробные расчеты численных оценок вкладов всех влияющих факторов в неопределенность, рассчитанную по типу В,  $u_B(C_{ph})$ , а также оценки величин суммарной  $U_C(C_{ph})$  и расширенной неопределенности  $U_p(C_{ph})$  результата измерения ТСВ для всех испытуемых сцинтилляторов, кроме ПС, приведены в наших работах [8] (2017 г) и [12] (2017 г). Показатели неопределенности для ПС оценивались в настоящей работе.

Гистограмма, изображающая распределение вкладов влияющих факторов (составляющих неопределенности) в суммарную неопределенность результата измерения  $U_C(C_{ph})$ , полученную при использовании восходящего подхода для различных сцинтилляторов, приведена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что величина вкладов  $u_A(C_{ph})$  и  $u_B(f_{sp})$  в суммарную неопределенность результата измерения  $U_C(C_{ph})$  уменьшается, соответственно, от (0,7–0,6) % до (0,1–0,2) %, при увеличении ТСВ от 2800 фот/МэВ до 35500 фот/МэВ. При этом вели-



Рис. 2. Распределение вкладов составляющих в суммарную неопределенность результата измерения ТСВ (восходящий подход).

Fig. 2. Contributions distribution of components to the total uncertainty TLD measurement result (ascending approach).

чина вклада неопределенности,  $u_B(C_{ph})$ , рассчитанной по типу В с учетом  $\Delta u_A(C_{ph})$ , уменьшается всего лишь от 3,80 % до 3,76 %. Это свидетельствует о том, что определяющий вклад в  $U_C(C_{ph})$  вносит неопределенность рабочего образца  $\Delta u_A(C_{ph})$ , составляющая в данном эксперименте 3,75 %.

### 3. Нисходящий (экспериментальный) подход

Экспериментальный подход к оцениванию неопределенности (точности) измерений основан на статистическом анализе данных эксперимента. Это позволяет учитывать факторы, определяющие рассеяние результатов, без составления модельного уравнения.

После завершения эксперимента проводится статистическое оценивание точности результата измерения в соответствии с [13]. Из-за ориентации на полное выполнение метода (эксперимента) этот подход называют еще нисходящим [6].

Надо отметить, что термин «точность», выражает суммарное отклонение результата от истинного или принятого опорного значения, вызванное не только случайными (прецизионность), но и систематическими (правильность) причинами. Прецизионность (precision) характеризует степень близости независимых результатов измерений друг к другу в конкретных регламентированных условиях, правильность (trueness) — степень близости среднего значения, полученного на основании серии измерений, к принятому опорному. Количественной мерой



прецизионности, зависящей от регламентированных условий, является СКО результата единичного измерения. Показателем правильности является значение систематической погрешности.

Как следует из [13], с целью оценки точности (правильности и прецизионности) метода измерений, предполагается, что каждый результат измерений,  $y$ , представляет собой сумму трех составляющих

$$y = m + B + e, \quad (7)$$

где:  $m$  — общее среднее значение (математическое ожидание);  $B$  — лабораторная составляющая систематической погрешности в условиях повторяемости;  $e$  — случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости.

Статистическую модель оценки точности каждого результата измерений ТСВ сцинтилляторов,  $C_{pi}$ , также можно представить в виде:

$$C_{pi} = \bar{C}_{pi} + B + e, \quad (8)$$

где  $C_{pi}$  —  $i$ -е измеренное значение ТСВ испытуемого образца, в фот/МэВ;  $\bar{C}_{pi}$  — среднее значение ТСВ испытуемого образца, в фот/МэВ.

При оценке прецизионности величина  $B$ , как составляющая систематической погрешности, не влияет на результат и является постоянной в нашем эксперименте, как в условиях повторяемости (*repeatability*) (неизменяемые влияющие факторы), так и в условиях внутрिलाбораторной воспроизводимости (*reproducibility*) (малый временной интервал между сериями).

Вследствие постоянства  $B$ , оценку показателей прецизионности результата, как в условиях повторяемости,  $S_r(C_{pi})$ , так и в условиях внутрिलाбораторной воспроизводимости,  $S_{Rr}(C_{pi})$ , мы определяли непосредственно как СКО составляющей погрешности  $e$ .

Схематическое изображение нисходящего подхода к оцениванию прецизионности результата измерения ТСВ представлено на рис. 3.

Количественное оценивание,  $S_r(C_{pi})$ , в фот/МэВ, (в предположении отсутствия выбросов) осуществляли по формуле:

$$S_r(C_{pi}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{pi} - \bar{C}_{pi})^2}{n-1}}, \quad (8)$$

где:  $n$  — число измерений.

Оценивание  $S_{Rr}(C_{pi})$ , в фот/МэВ, проводили по формуле:

$$S_{Rr}(C_{pi}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (C_{pi} - \bar{C}_{pi})^2}{l-1}}, \quad (9)$$

где:  $l$  — число серий измерений.



Рис. 3. Схематическое изображение нисходящего (экспериментального) подхода к оцениванию прецизионности результата измерения ТСВ сцинтилляторов

Fig.3. Schematic representation of the descending (experimental) approach to evaluation the precision of the scintillators TLD measurement result

Численные абсолютные и относительные оценки прецизионности результата измерения ТСВ сцинтилляторов на основе CsI(Tl), NaI(Tl), стильбена, антрацена и  $n$ -терфенила, полученные в различных условиях, приведены в наших работах [14—15], а также на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что значения  $S_{Rr}(C_{pi})$  меньше, чем значения  $S_r(C_{pi})$ , что может быть связано с меньшим разбросом результатов внутри серии из 3-х измерений, чем из 9.

Для оценивания правильности (систематической погрешности) результата измерений ТСВ, в соответствии с [16], в выражении (8) среднее значение  $\bar{C}_{pi}$  можно заменить на

$$\bar{C}_{pi} = \mu(C_{pi}) + \delta(C_{pi}), \quad (10)$$

где:  $\mu(C_{pi})$  — принятое опорное значение измеряемой характеристики, в фот/МэВ;  $\delta(C_{pi})$  —

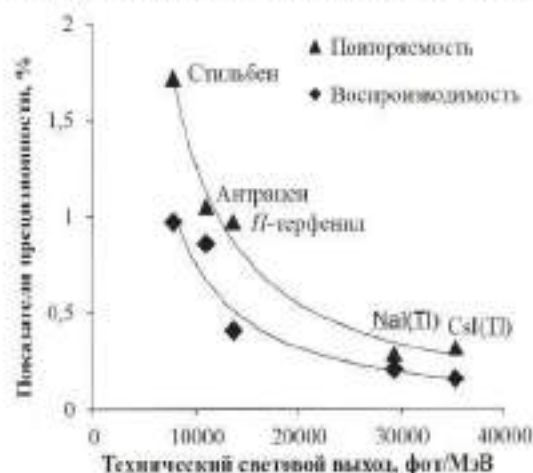


Рис. 4. Прецизионность различных сцинтилляторов в условиях повторяемости и внутрिलाбораторной воспроизводимости

Fig.4. Precision of various scintillators under conditions of repeatability and intralaboratory reproducibility



Таблиця 1. Показатели неопределенности измерения ТСВ испытуемых сцинтилляторов (восходящий подход)

Table 1. Uncertainty indicators for the TLO of the tested scintillators (bottom-up approach)

Сцинтиллятор	$C_{\text{рв}}$ , фот/МэВ	$u_1(C_{\text{рв}})$		$u_0(f_{\text{гр}})$		$u_2(C_{\text{рв}})$		$U_1(C_{\text{рв}})$		$U_2(C_{\text{рв}})$	
		Абс., фот/МэВ	Отн., %	Абс., фот/МэВ	Отн., %	Абс., фот/МэВ	Отн., %	Абс., фот/МэВ	Отн., %	Абс., фот/МэВ	Отн., %
CsI(Tl)	35500	47,65	0,134	67,39	0,19	1333	3,76	1334	3,76	2670	7,52
NaI(Tl)	29500	30,00	0,102	51,92	0,18	1105	3,75	1108	3,76	2220	7,52
п-терфенил	13700	44,25	0,320	23,63	0,17	514	3,76	516	3,77	1032	7,54
Антрацен	11100	38,84	0,350	33,67	0,31	416	3,77	418	3,78	836	7,56
Стильбен	7900	45,23	0,570	53,61	0,68	301	3,81	305	3,86	610	7,71
СВО	5100	8,45	0,167	11,14	0,22	190	3,76	191	3,76	381	7,53
ПС	4300	29,84	0,694	13,99	0,33	162	3,77	165	3,83	329	7,66
BGO	2800	19,22	0,687	15,83	0,57	106	3,80	108	3,86	216	7,71

систематическая погрешность метода измерений, в фот/МэВ.

В нашем случае принятые опорные значения ТСВ различных сцинтилляторов указаны во 2-м столбце Таблицы 1.

Тогда модель принимает следующий вид:

$$C_{\text{рв}} = \mu(C_{\text{рв}}) + \delta(C_{\text{рв}}) + B + e. \quad (11)$$

Если математическое ожидание систематической погрешности  $\Delta_m(C_{\text{рв}})$ , в фот/МэВ, представить выражением:

$$\Delta_m(C_{\text{рв}}) = \delta(C_{\text{рв}}) + B, \quad (12)$$

то модель (11) может быть записана в виде:

$$C_{\text{рв}} = \mu(C_{\text{рв}}) + \Delta_m(C_{\text{рв}}) + e. \quad (13)$$

Согласно определению [16], математическое ожидание систематической погрешности соответствует разности между математическим ожиданием результатов измерений и принятым опорным значением. Поэтому оценку математического ожидания систематической погрешности  $\hat{\Delta}_m(C_{\text{рв}})$  мы определяли [16] по формуле:

$$\hat{\Delta}_m(C_{\text{рв}}) = \bar{C}_{\text{рв}} - \mu(C_{\text{рв}}), \quad (14)$$

где  $\bar{C}_{\text{рв}}(C_{\text{рв}})$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Примеры оценок математического ожидания систематической погрешности измерения ТСВ различных сцинтилляторов приведены (для 3-х серий измерений) на рис. 5.

Доверительные границы относительной оценки показателя правильности результата измерения ТСВ  $\pm \hat{\Delta}_c(C_{\text{рв}})$ , включающего все влияющие вклады, вычисляли, в соответствии с [5], по формуле:

$$\pm \hat{\Delta}_c(C_{\text{рв}}) = 1,1 \sqrt{\hat{\Delta}(C_{\text{рв}})^2 + \hat{\Delta}_m(C_{\text{рв}})^2 + \hat{\theta}(f_{\text{гр}})^2}, \quad (15)$$

где:  $\hat{\Delta}(C_{\text{рв}})$  — доверительные границы относительной оценки суммарной погрешности аттестации по ТСВ рабочего образца, равной 6,5 %;  $\hat{\theta}(f_{\text{гр}})$  — доверительные границы относительной оценки приборной погрешности измерения, в процентах.

Если в формулу (15) подставить выражение для  $\hat{\theta}(f_{\text{гр}})^2$  [8], она приобретает вид:

$$\pm \hat{\Delta}_c(C_{\text{рв}}) =$$

$$= 1,1 \sqrt{\hat{\Delta}(C_{\text{рв}})^2 + \hat{\Delta}_m(C_{\text{рв}})^2 + \left[ \frac{\theta_{V_a}}{V_a + V_0} \right]^2 + \left[ \frac{\theta_{V_b}}{V_b + V_0} \right]^2 + \left[ \frac{V_{\text{гр}} + V_a + 2V_b}{V_a + V_b} \right]^2 \times \left[ \frac{\theta_{f_{\text{гр}}}}{V_a + V_0} \right]^2} \times 10^{-4}. \quad (16)$$

Количественные абсолютные и относительные оценки вкладов влияющих факторов в показатель правильности результата измерения ТСВ сцинтилляторов на основе CsI(Tl), NaI(Tl), стильбена, антрацена и п-терфенила приведены в работах [14—15].

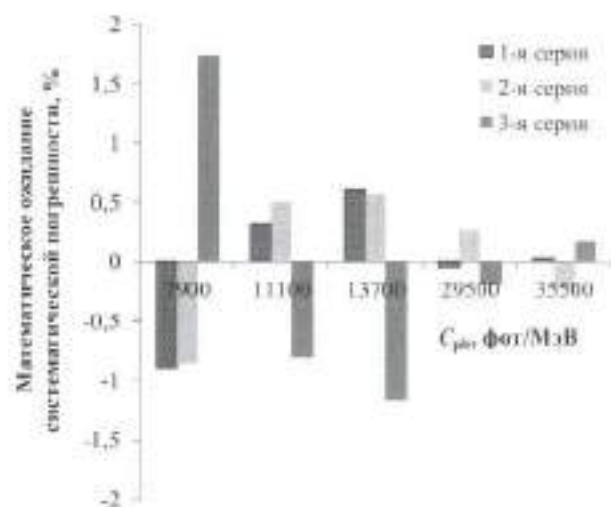


Рис. 5. Математическое ожидание систематической погрешности измерения ТСВ различных сцинтилляторов

Fig.5. Mathematical expectation of the systematic error in measuring of various scintillators TLO



Таблиця 2. Показатели точности измерений ТСВ испытываемых сцинтилляторов (нисходящий подход)

Table 2. Measuring accuracy of the TLO of the tested scintillators (top-down approach)

Сцинтиллятор	Прецизионность, $S_{R_s}(C_{ps})$		Приборная погрешность, $\theta(f_{sp})$		Правильность, $\pm\Delta_r(C_{ps})$		Коефф. $Z$	Точность, $\pm\Delta(C_{ps})$	
	Абс., фот/МэВ	Отн., %	Абс., фот/МэВ	Отн., %	Абс., фот/МэВ	Отн., %		Абс., фот/МэВ	Отн., %
CsI(Tl)	54,4	0,15	132,6	0,375	2538,4	7,17	1,91	2543,5	7,19
NaI(Tl)	56,0	0,19	109,1	0,372	2108,5	7,18	1,91	2114,7	7,21
<i>n</i> -терфенил	55,6	0,404	45,0	0,329	987,5	7,22	1,91	997,8	7,29
Антрацен	94,5	0,856	64,2	0,580	798,1	7,22	1,92	828,8	7,50
Стильбен	76,3	0,969	102,2	1,292	586,3	7,42	1,92	619,7	7,84
CWO	20,4	0,404	21,2	0,419	365,2	7,21	1,91	369,2	7,29
ПС	20,9	0,486	24,9	0,580	322,9	7,51	1,91	326,7	7,60
BGO	16,2	0,582	30,4	1,090	210,4	7,55	1,91	213,4	7,66

Доверительные границы относительной оценки показателя точности измерения ТСВ испытываемых сцинтилляторов  $\pm\tilde{\Delta}(C_{ps})$  определяли [5] по формуле:

$$\pm\tilde{\Delta}(C_{ps}) = Z \sqrt{\tilde{S}_{R_s}(C_{ps})^2 + \left(\frac{\tilde{\Delta}_r(C_{ps})}{1,1\sqrt{3}}\right)^2}, \quad (17)$$

где:  $Z$  — коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и соотношения случайной и систематической составляющих точности. Он определяется [5] по эмпирической формуле:

$$Z = \frac{t\tilde{S}_{R_s}(C_{ps}) + \tilde{\Delta}_r(C_{ps})}{\tilde{S}_{R_s}(C_{ps}) + \frac{\tilde{\Delta}_r(C_{ps})}{1,1\sqrt{3}}}, \quad (18)$$

где:  $t$  — коэффициент Стьюдента, равный 1,96.

#### 4. Сравнение подходов

Для сравнения восходящего и нисходящего подходов к оценке неопределенности (точности) измерения ТСВ испытываемых сцинтилляторов все оценки характеристик неопределенности измерения представлены в таблице 1 [8], а точности — в таблице 2.

Оценки показателей точности измерения ТСВ сцинтилляторов на основе CWO, BGO, *n*-терфенила и ПС получены в работе [17] и пересчитаны в данной работе с учетом доверительного интервала.

Из данных, приведенных в таблицах, видно, что оценки аналогичных составляющих показателей неопределенности и точности измерения ТСВ отличаются, что связано с различными методиками расчета. Оценки  $u_r(C_{ps})$  и  $S_{R_s}(C_{ps})$  для сцинтилляторов с различными ТСВ отличаются на 12 % для CsI(Tl) и на 70 % — для стильбена. Оценки  $u_\theta(f_{sp})$  и  $U_r(C_{ps})$  меньше соответствующих оценок показателей пра-

вильности  $\theta(f_{sp})$  и  $\pm\Delta_r(C_{ps})$  примерно в (1,7—1,9) раза. Однако, оценки расширенной неопределенности измерения ТСВ  $U_{rel}(C_{ps})$ , при восходящем подходе, и точности  $\pm\Delta(C_{ps})$ , при нисходящем подходе, дают сравнительно близкие значения. Небольшое превышение оценок  $U_{rel}(C_{ps})$  над оценками  $\pm\Delta(C_{ps})$  составляет 2—5 %.

В качестве иллюстрации полученных данных, распределение аналогичных показателей неопределенности и точности измерения ТСВ сцинтилляторов на основе CsI(Tl), *n*-терфенила, ПС и BGO приведены на рисунке 6.

Из Рис. 6 видно, что для всех испытываемых сцинтилляторов показатели неопределенности и точности измерения ТСВ уменьшаются при увеличении ТСВ и увеличиваются при суммировании составляющих.

Надо отметить, что, в идеале, значения показателей расширенной неопределенности измерения

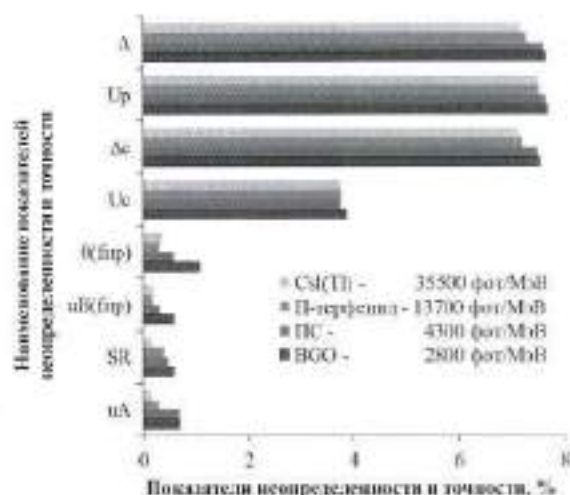


Рис. 6. Показатели неопределенности и точности измерения ТСВ сцинтилляторов  
Fig. 6. Indicators of uncertainty and accuracy of scintillators TLO measurement



ТСВ сцинтилляторів, отримані при восходящем підході, і показателів точності вимірювання ТСВ, отримані при нисходящем підході, повинні збігатися. В нашій роботі ці показателі слегка відрізняються. Однією з причин кращих показателів точності може бути близькість опорного значення ТСВ конкретного сцинтиллятора до його середнього значення. Даний факт може обумовлювати занижені значення показателів математичного очікування систематичної погрешності і, відповідно, показателів правильності і точності.

Слід також відзначити, що отримані значення неопределенності і точності результату вимірювання ТСВ слід представляти в різній формі. Неопределенність результату вимірювання ТСВ представляється в вигляді інтервалу, що містить множину можливих значень вимірюваної величини  $\bar{C}_m - U_p(C_m) \pm \bar{C}_m + U_p(C_m)$ , точність — в вигляді зміщення результату вимірювання відносно прийнятого опорного значення  $\bar{C}_m \pm \Delta(C_m)$ .

## ВИВОДИ

Проведено оглядовий аналіз опублікованих авторами в 2012—2020 гг робіт, присвячених проблемі оцінювання якості вимірювання ТСВ сцинтилляторів.

Проведено порівняльне оцінювання якості (неопределенності і точності) результатів вимірювань ТСВ сцинтилляторів при восходящем (модель-

ном) і нисходящем (експериментальном) підходах з використанням як уже опублікованих експериментальних даних, так і нових, опублікованих в 2020 г.

Показано, що розглядавані підходи дають порівняльно близькі значення оцінки якості результату вимірювань, незважаючи на різні методи розрахунків. Це робить можливим використання обох підходів без взаємного протиріччя.

Встановлено, що для всіх вимірюваних сцинтилляторів показателі неопределенності і точності вимірювання ТСВ зменшуються при збільшенні ТСВ і збільшуються при суммуванні складових.

Показано, що основний вклад в неопределенність (точність) результату вимірювання ТСВ, вносить неопределенність (погрешність) атестації ТСВ робочого зразка.


Недостатком восходящего (модельного) підходу до оцінки неопределенності вимірювання ТСВ сцинтилляторів є неможливість повністю і правильно оцінити вплив всіх факторів для побудови коректної моделі. Завжди залишаються неучтенні або не повністю учтенні впливаючі фактори.

Недостатком емпіричного підходу (при оцінці прецизійності результату вимірювання ТСВ) є неможливість аналізу вкладів різних факторів в суммарне статистичне розсіяння, що дозволило б в подальшому оптимізувати вимірний процес.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM): First edition. — ISO, Switzerland, 1993, 101 p.
2. Руководства по выражению ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT). Київ, Держспоживстандарт України (State standard of Ukraine RMG 43:2006 Metrology. Application of the «Guidelines for the expression of measurement uncertainty» (RMG 43:2001, IDT). Kyiv: State standards publ. (In Ukrainian)), 2006, с/р. 18.
3. О.А. Ботсюра, И.П. Захаров. Ревизия GUM: проблемы и пути решения. IX-а Міжнародна науково-техн. конф. «Метрологія та вимірвальна техніка» (МЕТРОЛОГІЯ — 2014), 15-16 жовтня 2014 р, Харків: наук. праці конф.- X.: ННЦ Інститут метрології (Botsiura O.A., Zakharov I.P. [GUM audit: problems and solutions] Naukovi praci IX Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferenciji «Metrologhija ta vymirjuvalna tekhnika» [Proc. IX International Scientific and Technical Conference «Metrology and measuring technology»]. Kharkiv (In Russian)), 2014, с. 31—34.
4. ISO 5725-1:1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions, p. 24.
5. ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення (ГОСТ ИСО 5725-1:2003, IDT), Київ, Держспоживстандарт України (State standard of Ukraine ISO 5725-1:2005, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: General principles and definitions. Kyiv: State standards publ. (In Ukrainian)), 2006, с.24.
6. ISO/TS 21748:2004 ISO 21748:2010 Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation, 2010, p. 38.
7. ДСТУ IEC 62372:2009 Ядерне приладобудування. Сцинтилятори упаковані. Методи контролювання технічного світлового виходу та власної роздільної здатності (IEC 62372:2006, IDT), Київ, Держстандарт України (State standard of Ukraine IEC 62372:2009, Nuclear instrumentation. Packaged scintillators. Methods of controlling the technical light output and its own



- resolution (IEC 62372:2006, IDT). Kyiv, State standards publ. (In Ukrainian), 2013, с. 22.
8. Гринев Б.В. и др. К вопросу о различных концепциях оценки качества результатов измерения светового выхода сцинтилляторов. Аспекты сцинтилляционной техники (под редакцией А.В. Гектина). — Харьков: ИСМА (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Mitsay L.I., Molchanova N.I., Tarasov V.A., [To the question of different concepts of assessing the quality of the results of measuring the light output of scintyllators]. Aspects of scintillation technology. Kharkiv, ISMA (In Russian), 2017, с. 42—71.
  9. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В., Любинский В.Р., Молчанова Н.И., Тарасов В.А. Сравнительный анализ методик вычисления погрешности и неопределенности измерений на примере сцинтиллятора. Міжнародна науково-техн. конфер. «Метрологія та вимірвальна техніка» (METROLOGIJA-2012): Наукові праці VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 09—11 жовтня 2012, Харків (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Molchanova N.I., Tarasov V.A. [Comparative analysis of the methods of calculating the error and uncertainty of measurements using the example of the scintillator]. Naukovi praci VIII Mizhnarodnoji naukovo-tehniknoji konferenciji «Metrologhija ta vymirjuvaljna tekhnika» [Proc. VIII International Scientific and Technical Conference «Metrology and measuring technology»]. Kharkiv, 2012, (In Russian), p/c. 54—60.
  10. Гринев Б., Гурджян Н., Зеленська О., Любинський В., Молчанова Н., Тарасов В. (2013) Оцінювання якості результатів вимірювання світлового виходу упакованих сцинтиляторів на основі неорганічних кристалів. Метрологія та прилади (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Molchanova N.I., Tarasov V.A. (2013) Estimation of light output measurement results of packaged scintillators based on inorganic crystals. Metrologhija ta prylyady (In Ukrainian)). — № 3, с/р. 31—39.
  11. E. Sysoeva, V. Tarasov, O. Zelenskaya Comparison of the methods for determination of Scintillation Light Yield Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 486, 2002, p. 67—73.
  12. Б.В. Гринев, Н.Р. Гурджян, О.В. Зеленская, В.Р. Любинский, Л.И. Мицай, Н.И. Молчанова, В.А. Тарасов. (2017) Влияние приборных факторов на оценивание неопределенности измерений технического светового выхода сцинтилляторов. Український метрологічний журнал (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Mitsay L.I., Molchanova N.I., Tarasov V.A. (2017) The effect of instrumentation on the assessment of the uncertainty of measurements of the technical light output of scintyllators. Ukrajsjkyj metrologichnyj zhurnal (In Russian)), № 4, с/р. 39—47.
  13. ДСТУ ГОСТ ISO 5725-2:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 2. Основний метод визначення повторюваності та відтворюваності стандартного методу вимірювання. (ГОСТ ІСО 5725-2:2003, IDT), Київ, Держспоживстандарт України (State standard of Ukraine ISO 5725 2:2005. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2. Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Kyiv, State standards publ. (In Ukrainian)), 2006, с/р. 50.
  14. Гринев Б., Гурджян Н., Зеленська О., Любинський В., Молчанова Н., Тарасов В. (2013) Щодо різних підходів до передавання характеристик точності вимірювань. Метрологія та прилади (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Molchanova N.I., Tarasov V.A. (2013) On different approaches to the transfer of measurement accuracy characteristics. Metrologhija ta prylyady (In Ukrainian)), № 5, с/р. 20—27.
  15. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В., Любинский В.Р., Молчанова Н.И., Тарасов В.А. (2014) Контроль и обеспечение качества результатов измерений испытательной лаборатории на примере измерения светового выхода сцинтилляторов. Системы обработки информации (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Molchanova N.I., Tarasov V.A. (2014) Monitoring and quality assurance of the measurement results of the testing laboratory using the example of measuring the light output of scintillators. Sistemyi obrabotki informatsii (In Russian)), № 3, с/р. 90—95.
  16. ДСТУ ГОСТ ISO 5725-4:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 4. Основні методи визначення правильності стандартного методу вимірювання (ГОСТ ІСО 5725-4:2003, IDT), Київ, Держспоживстандарт України (State standard of Ukraine ISO 5725 4:2005. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 4. Basic methods for determining the accuracy of the standard measurement method. Kyiv, State standards publ. (In Ukrainian)), 2006, 34 с/р.
  17. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В., Любинский В.Р., Мицай Л.И., Молчанова Н.И., Тарасов В.А. Влияние неоднородности фотоприемника на точность измерения светового выхода сцинтилляторов. Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія, інформаційно-вимірвальні технології та системи» (MIMTS-2020). Український метрологічний журнал (Gryunov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Mitsay L.I., Molchanova N.I., Tarasov V.A., [The influence of heterogeneity of the photodetector on the accuracy of measuring the light output of scintillators]. Materials of 7th International scientific and technical conference «Metrology, Information-Measuring Technologies and Systems» (MIMTS-2020). Ukrajsjkyj metrologichnyj zhurnal (In Russian)), 2020, № 1A, с/р. 26. 

Отримано / received: 17.06.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.І. Змієм (Україна).  
Prof. V.I. Zmij, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.21-25

УДК 53.089.68

# МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ $pH$ В УКРАЇНІ

**Metrological traceability  
of pH measurements in Ukraine**

**О. О. Мельников**, начальник науково-виробничого відділу вимірювань фізико-хімічних величин,

e-mail: amelnikov@ukrcsm.kiev.ua

**В. Г. Гаврилкін**, начальник лабораторії науково-виробничого відділу,

e-mail: solution@ukrcsm.kiev.ua

**А. В. Петренко**, науковий співробітник науково-виробничого відділу,

e-mail: pavpostbox@gmail.com

**О. О. Манська**, науковий співробітник науково-виробничого відділу,

e-mail: manska.aleksa@gmail.com

**О. С. Левбарг**, начальник науково-дослідної лабораторії відділу вимірювань складу і властивостей речовин та матеріалів,

e-mail: molar@ukrcsm.kiev.ua

ДП «Укрметрестандарт»,

м. Київ, Україна

**O. O. Melnikov**, head of the research and production department of measurements of physical and chemical quantities,

e-mail: amelnikov@ukrcsm.kiev.ua

**V. G. Gavrilkin**, head of the laboratory of the research and production department,

e-mail: solution@ukrcsm.kiev.ua

**A. V. Petrenko**, researcher of the research and production department,

e-mail: pavpostbox@gmail.com

**O. O. Manska**, researcher of the research and production department,

e-mail: manska.aleksa@gmail.com

**O. S. Levbarg**, head of the research laboratory of the department of measurements of the composition and properties of substances and materials,

e-mail: molar@ukrcsm.kiev.ua

State Enterprise «Ukrmetrteststandard»,

Kyiv, Ukraine

Розроблено ланцюг метрологічної простежності результатів вимірювання  $pH$ . Реалізація в Україні міжнародної системи метрологічної простежності для цього виду вимірювання дасть змогу значно поліпшити якість вимірювання.

Metrological traceability chain for pH measurement is developed. Realisation in Ukraine of the international system of the metrological traceability chain for this kind of measurements will enable to improve significantly the quality of measurements.

**Ключові слова:** вимірювання  $pH$ , буферні розчини, простежність результатів вимірювання, Державний первинний еталон  $pH$ .

**Keywords:** pH measurement, buffer solution, traceability chain, the State primary standard of pH.

Поняття  $pH$  як фізичної величини, що характеризує концентрацію іонів водню у водних розчинах, вперше ввів С. Серенсен у роботі 1909 року [1]. З того часу теорія і практика вимірювань  $pH$  набули значного розвитку [2, 3]. Чинні рекомендації IUPAC 2002-го року визначають величину  $pH$  як від'ємний десятковий логарифм від активності іонів водню  $H^+$  [4]:

$$pH = -\lg a_{H^+}, \quad (1)$$

де  $a_{H^+}$  — активність іонів водню.

Фактично  $pH$  є величиною, яка визначає важливі властивості рідкого середовища: кисла чи лужна

рідина та насільки. Величину  $pH$  вимірюють повсякденно в багатьох лабораторіях, оскільки вона є дуже важливою для різних галузей промислового виробництва, охорони довкілля, охорони здоров'я, контролю безпечності умов праці, контролю якості харчових продуктів і ліків тощо [2]. Парк  $pH$ -метрів, іоніметрів, іоноселективних електродів та автоматичних титраторів вітчизняного та зарубіжного виробництва для потенціометричних вимірювань в Україні становить понад 200 тисяч одиниць і щорічно поповнюється новими приладами. Поширеність вимірювання  $pH$  у рядових лабораторіях



зумовлена простотою виконання й низькою вартістю робіт.

Якість вимірювань та можливість зіставлення результатів, отриманих у різних лабораторіях, забезпечують, окрім іншого, дотриманням простежності результатів вимірювання. Практично цього досягають за допомогою Державної еталонної бази й системи передавання одиниці (значень) величини від еталонів до робочих ЗВТ. Забезпечення простежності результатів вимірювання *pH* в Україні і є темою цієї публікації.

Державний первинний еталон *pH* ДЕТУ 05-03-07 (далі — еталон) було створено й досліджено в ДП «Укрметрестандарт» для забезпечення автономності держави у цьому виді вимірювань на сучасному науково-технічному рівні, що підтверджено результатами міжнародних звірень еталонів та зареєстрованими у *VIRM* рядками *СМС* (калібрувальних та вимірвальних можливостей) [5].

Принцип роботи еталона коротко виглядає таким чином. В еталонних устаткуваннях для вимірювання *pH* застосовують модифіковану комірку Харнеда, показану на рис. 1. Комірка Харнеда складається з платинового (I) та хлор-срібного (II) напівелементів, з'єднаних між собою рідинним мостиком (3). Застосування комірки Харнеда відповідає критеріям первинної референтної методики вимірювання.

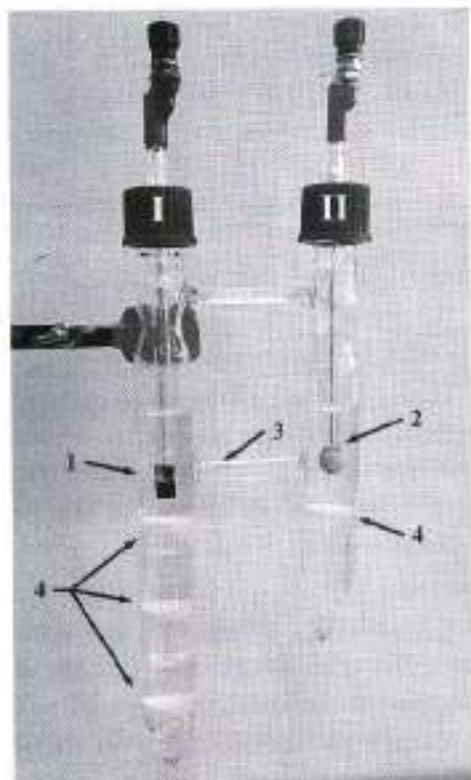


Рис. 1. Комірка Харнеда в модифікації Л. Вискочила для первинного вимірювання *pH*  
 Fig. 2. Harned cell for primary *pH* measurement (modified by L. Vyskočil)



Рис. 2. Схема відтворення значень *pH* на Державному первинному еталоні  
 Fig. 2. Scheme of reproducing *pH* values by the State Primary Standard

Значення *pH*, отримане у такий спосіб, метрологічно простежується до Міжнародної системи одиниць, і в цьому разі одиницею *SI* є число 1.

Схему відтворення одиниці *pH* на еталоні подано на рис. 2. На першому етапі, застосовуючи кулонометричний титратор, атестують розчини HCl з номінальною концентрацією HCl 0,01 моль/кг (відносна стандартна невизначеність атестованого значення має бути не вищою за 0,15 %). На другому етапі заповнюють комірки Харнеда розчином HCl та атестують еталонні хлор-срібні електроди. На третьому етапі на основі еталонного буферного розчину (далі — ЕБР) готують не менше трьох зразків з відомим вмістом натрій хлориду, заповнюють ними комірки Харнеда, вимірюють електрорушійну силу (далі — ЕРС) і розраховують кислотну функцію *p(a<sub>HCl</sub>/c)* для кожного зразка. На четвертому етапі за допомогою лінійної екстраполяції визначають кислотну функцію ЕБР *p(a<sub>HCl</sub>/c)<sup>0</sup>*. На п'ятому етапі розраховують *pH* ЕБР та обчислюють невизначеність отриманого значення *pH*.

Передавання значень *pH* від еталона до робочих ЗВТ описує схема «Ланцюг метрологічної простежності результатів вимірювання *pH*», показана на рис. 3. В її основі лежить технічний звіт IUPAC [6]. Зі схеми видно, що одиниці постійної напруги (В) та температури (К) отримують з інших державних



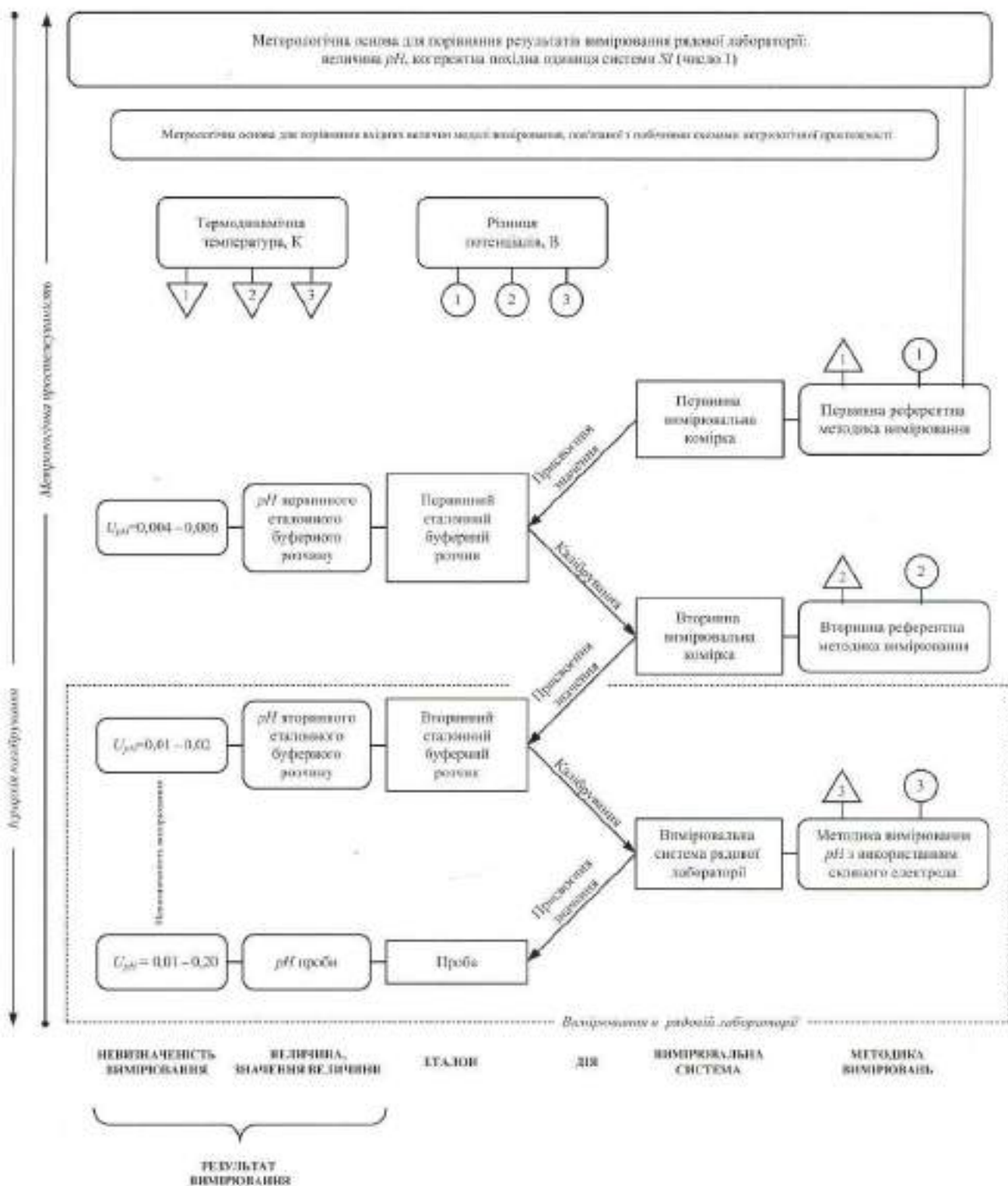


Рис. 3. Ланцюг метрологічної простежуваності результатів вимірювання рН  
 Fig. 3. Metrological traceability chain for pH measurement

еталонів й їхню невизначеність урахувують під час вимірювання рН. Застосовуючи первинну комірку, присвоюють значення рН первинним ЕБР з відповідною невизначеністю. До складу еталона входять дев'ять первинних ЕБР з такими номінальними значеннями рН (за температури 25,00 °С): 1,68; 3,56; 4,01; 6,87; 7,41; 9,18; 10,01; 12,45. Розширена невизначеність рН первинних ЕБР становить від 0,004 до 0,006 ( $k = 2$ ;  $P = 0,95$ ). Від первинних ЕБР значення рН передають вторинним ЕБР. Щоби уник-

нути дифузійної складової невизначеності, під час передавання значень рН від первинних до вторинних ЕБР використовують однакові за хімічним складом розчини. Наприклад, розчин зі значенням рН ( $6,86 \pm 0,01$ ) атестують, використовуючи розчин зі значенням рН ( $6,860 \pm 0,006$ ). У таблиці наведено типи вторинних ЕБР та їхні значення рН залежно від температури. Розширена невизначеність рН вторинних ЕБР може становити від 0,01 до 0,02 ( $k = 2$ ;  $P = 0,95$ ). Залежно від поставленого завдання та рівня



Таблиця. Значення рН буферних розчинів за температури від 0 до 90°C  
 Table. pH values of buffer solutions over the temperature range from 0 to 90°C

Тип СЗ рН	Температура розчину, °C												
	5	10	15	20	25	30	37	40	50	60	70	80	90
6.1UMTS_pH		1,64	1,64	1,64	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,66	1,67	1,69	1,72
6.2UMTS_pH					3,56	3,55	3,54	3,54	3,54	3,55	3,57	3,60	3,63
6.3UMTS_pH	3,84	3,82	3,80	3,79	3,78	3,77	3,76	3,75	3,75				
6.4UMTS_pH	4,00	4,00	4,00	4,00	4,01	4,01	4,02	4,03	4,05	4,08	4,12	4,16	4,21
6.5UMTS_pH	6,94	6,91	6,89	6,87	6,86	6,84	6,83	6,82	6,81	6,82	6,83	6,85	6,90
6.6UMTS_pH	7,48	7,46	7,44	7,42	7,41	7,39	7,37	7,38	7,37				
6.7UMTS_pH	9,41	9,35	9,29	9,23	9,18	9,13	9,07	9,05	8,98	8,93	8,90	8,88	8,84
6.8UMTS_pH	10,21	10,15	10,10	10,05	10,00	9,95	9,89	9,87	9,80	9,75	9,73	9,73	9,75
6.9UMTS_pH	13,16	12,97	12,78	12,60	12,43	12,27	12,05	11,96	11,68	11,42	11,19	10,98	10,80

метрологічних характеристик, робочі ЗВТ можна калібрувати чи повіряти як первинними, так і вторинними ЕБР, але у більшості випадків розширена невизначеність ЕБР від 0,01 до 0,02 ( $k = 2; P = 0,95$ ), що відповідає вторинним ЕБР, є достатньою. У сертифікатах ЕБР називають сертифікованими стандартними зразками рН (далі СЗ рН), з відповідними присвоєним значенням і його розширеною невизначеністю.

Згідно з означеною схемою простежності передбачається найближчим часом провести комплексні роботи з повного приведення методології передавання значень рН у повну відповідність до вимог рекомендації ПУРАС 2002 року, оскільки чинна державна повірочна схема для засобів вимірювання рН [7] це не враховує.

Застосовуючи СЗ рН, ДП «Укрметртестстандарт», регіональні метрологічні центри та калібрувальні лабораторії повіряють, калібрують та оцінюють відповідність приладів, що вимірюють рН середовищ [8–16]. Підприємства й наукові установи для гра-

дування та контролювання метрологічних характеристик ЗВТ можуть застосовувати у повсякденних роботах буферні розчини, придбані або власного виробництва, а для особливо відповідальних робіт використовують СЗ рН. Наведена на рис. 4 діаграма попиту на СЗ рН за період 2008-2019 рр. показує збільшення кількості виготовлених СЗ рН, що свідчить стосовно тенденції зростання потреби у СЗ рН.

ДП «Укрметртестстандарт» як організація-зберігач еталона рН ставить своєю метою донести до користувачів ЗВТ інформацію щодо забезпечення простежності результатів вимірювання рН в Україні. Важливо пам'ятати, що застосування буферних розчинів, виготовлених не належним чином і до яких немає відповідної супровідної документації, а також порушення умов їх зберігання може призвести до недостовірних результатів вимірювання рН.

Державний первинний еталон рН регулярно бере участь у міжнародних звіреннях, результати яких публікують у базі даних ключових звірень (Kcdb, <http://kcdb.bipm.org>) та статтях [17 — 21]. На основі позитивних результатів звірень було зареєстровано вимірювальні та калібрувальні можливості України (ДП «Укрметртестстандарт») у базі вимірювальних та калібрувальних можливостей Національних метрологічних інститутів ВІРМ [5].

**ВИСНОВКИ**

У статті описано способи забезпечення простежності результатів вимірювання рН і ланцюги передавання одиниці рН та ЕРС від еталона рН до робочих ЗВТ в Україні.

Регістрація вимірювальних та калібрувальних можливостей України (ДП «Укрметртестстандарт») у базі вимірювальних та калібрувальних можливостей Національних метрологічних інститутів ВІРМ [5] свідчить стосовно того, що Державний первинний

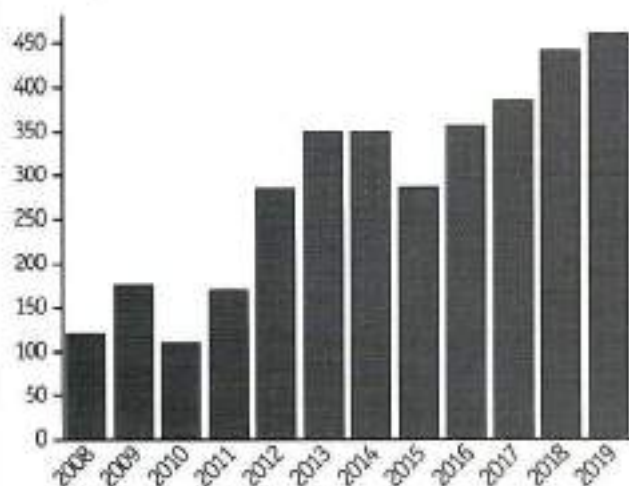


Рис. 4. Діаграма попиту на еталонні буферні розчини за період 2008-2019 роки  
 Fig. 4. Chart of demand for standard buffer solutions for the period of 2008-2019



еталон рН забезпечує відтворення значень рН для потреб української промисловості, закладів охоро-

ни здоров'я й довкілля, наукових установ на сучасному метрологічному рівні.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- Enzymstudier II. (1909) Om Maalingen og Betydningen af Brintionkoncentrationen ved enzymatiske Processer / S.P.L. Sørensen // *Meddelelser fra Carlsberg Laboratoriet*. — Vol. 8.
- R.G. Bates (1973) *Determination of pH. Theory and practice*. New York: Wiley.
- P. Spitzer (2011) The history and development of rigorous metrological basis for pH measurements / P. Spitzer, K.W. Pratt // *Journal of Solid State Electrochemistry*. — N 15. — P. 69–76. doi: 10.1007/s10008-010-1106-9.
- R.P. Buck (2002) Measurement of pH. Definition, standards, and procedures (IUPAC Recommendations 2002) / R.P. Buck, S. Rondinini, A.K. Covington, F.G.K. Baucke, C.M.A. Brett, M.F. Camões, M.J.F. Milton, T. Mussini, R. Naumann, K.W. Pratt, P. Spitzer, G.S. Wilson // *Pure and Applied Chemistry*. — Vol. 74, N 11. — P. 2169–2200. doi: 10.1351/pac200274112169.
- Електронний ресурс: [http://kdcb.bipm.org/appendixC/QM/UA/QM\\_UA\\_6\\_7.pdf](http://kdcb.bipm.org/appendixC/QM/UA/QM_UA_6_7.pdf)
- Paul De Bièvre (2011) Metrological traceability of measurement results in chemistry: concepts and implementation (IUPAC Technical Report) / Paul De Bièvre, René Dybkaer, Aleš Fajgelj, D. Brynna Hibbert // *Pure Appl. Chem.* — Vol. 83, No. 10. — P. 1873–1935. doi: 10.1351/PAC-REP-07-09-39.
- ДСТУ 4869:2007 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання рН (DSTU 4869:2007 Metrology. State traceability scheme for the instruments intended for measuring pH).
- МПУ 405/05-2015 Метрологія. Рекомендації. Електроди скляні для визначення активності іонів водню. Методика повірки. (MPU 405/05-2015 Metrology. Recommendations. Glass electrodes for the hydrogen ions activity determination. Verification procedure)
- МПУ 407/05-2015 Метрологія. Рекомендації. Електроди допоміжні для потенціометричних вимірювань. Методика повірки. (MPU 407/05-2015 Metrology. Recommendations. Reference electrodes for the potentiometric measurements. Verification procedure)
- МПУ 167/05-2004 Рекомендації. Метрологія. рН-метри й іонометри лабораторні. Методика повірки. (MPU 167/05-2004 Metrology. Recommendations. Laboratory pH-meters and ion-meters. Verification procedure)
- МПУ 080/05-2003 Рекомендації. Метрологія. Титратори автоматичні загального призначення. Методика повірки. (MPU 080/05-2003 Metrology. Recommendations. Automatic titrators for general purposes. Verification procedure)
- МКУ 384-36/05-2015 Метрологія. Рекомендації. електроди скляні для визначення активності іонів водню. Методика калібрування. (MKU 384-36/05-2015 Metrology. Recommendations. Glass electrodes for the hydrogen ions activity determination. Calibration procedure)
- МКУ 385-36/05-2015 Метрологія. Рекомендації. електроди іоноселективні. Методика калібрування. (MKU 385-36/05-2015 Metrology. Recommendations. Ion-selective electrodes)
- МКУ 386-36/05-2015 Метрологія. Рекомендації. електроди допоміжні для потенціометричних вимірювань. Методика калібрування. (MKU 386-36/05-2015 Metrology. Recommendations. Reference electrodes for the potentiometric measurements. Calibration procedure)
- МКУ 387-36/05-2015 Метрологія. Рекомендації. електроди порівняння хлорсрібні еталонні. Методика калібрування. (MKU 387-36/05-2015 Metrology. Recommendations. Reference silver-silver chloride reference electrodes. Calibration procedure)
- МКУ 010-36/05-2011 Метрологія. Рекомендації. рН-метри й іонометри лабораторні. Методика калібрування. (MKU 010-36/05-2011 Metrology. Recommendations. Laboratory pH-meters and ion-meters. Calibration procedure)
- K.W. Pratt, Final report on key comparison CCQM-K20: pH of tetroxalate buffer, *Metrologia*, — 2009, V. 46, doi: 10.1088/0026-1394/46/1A/08022.
- Гаврилкін В.Г., Манська О.О., Нагібін С.М., Прокопенко Л.В. (2012) Результати міжнародних звірень державного первинного еталона рН ДЕТУ 05-03-07. Український метрологічний журнал (Gavrilkin V.G., Manska O.O., Nagibin S.M., Prokopenko L.V. (2012) Results of key comparisons measurements for state primary etalon of the pH ДЕТУ 05-03-07). — № 4. — С/Р. 52–57.
- P. Spitzer, F. Bastkowski, B. Adel, L. Dimitrova, F.B. Gonzaga, P.T. Jakobsen, P. Fisicaro, D. Stoica, T. Asakai, I. Maksimov, Z.N. Szilágyi, A. Reyes, M. Norroy, G.T. Canaza, W. Kozłowski, M. Pawlina, V. Kutovoy, I. Vyskocil, A. Mathiasova, T. Nongluck, F. Fircioglu, V. Gavrilkin, K. W. Pratt, J. Waters (2013) Final report on CCQM-K91: Key comparison on pH of an unknown phthalate buffer, *Metrologia*. — V. 50, doi: 10.1088/0026-1394/50/1A/08016.
- F.B. Gonzaga, J.C. Dias, K.W. Pratt, J. Waters, L. Dimitrova, M. Delgado, G.T. Canaza, R.D. Cristancho, L.A. Chavarro, S. Fajardo, P. Rodruangthum, N. Tangpraisarnkul, V. Gavrilkin, S. Nagibin, A. Petrenko, A. Manska, (2015) Report of key comparison SIM.QM-K91 pH of phthalate buffer (nominal pH = 4.01 at 25 °C), *Metrologia*. — V. 52(1A), doi: 10.1088/0026-1394/52/1A/07015.
- F. Bastkowski, P. Spitzer, B. Sander, M. Máriássy, L. Dimitrova, A. Reyes, A. Rodríguez, V. Lara Manzano, A. Vospelova, P.T. Jakobsen, M. Pawlina, M. Korol, W. Kozłowski, M. Delgado, G. Ticona Canaza, J.C. Dias, F.B. Gonzaga, Z. Nagyné Szilágyi, B. Jakusovszky, T. Nongluck, J. Waters, K.W. Pratt, T. Asakai, I. Maksimov, Z. Hankova, E. Uysal, V. Gavrilkin, S.V. Prokunin, E. Ferreira, S. Fajardo, (2016) Key comparison on pH of an unknown phosphate buffer, *Metrologia*. — V. 53, doi: 10.1088/0026-1394/53/1A/08007. 

Отримано / received: 20.03.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.М. Величком (Україна).  
Prof. O.M. Velychko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2190(3)2020.26-31

УДК 53.088.3:53.085.345

# АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ СПОСОБІВ РОЗРАХУНКУ ПЛОЩІ КВАДРАТНОЇ ДІАФРАГМИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

**Analysis of Exactness of Methods of Calculation  
of Area of Square Diaphragm  
By the Method of Monte Carlo**

**О. Д. Купко**, доктор технічних наук,  
провідний науковий співробітник наукового центру  
температурних і оптичних вимірювань,  
Національний науковий центр «Інститут метрології»,  
Харків, Україна,  
e-mail: kupko@meta.ua

**O. D. Kupko**, doctor of technical sciences,  
leading researcher of scientific center of temperature  
and optical measurements,  
National research center «Institute of Metrology»,  
Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: kupko@meta.ua

Ця теоретична робота стосується вимірювань площі діафрагми під час фотометричних та радіометричних досліджень. Вона заснована на математичному моделюванні за методом Монте-Карло та стосується невизначеностей вимірювання площі квадратної діафрагми. Приведені результати порівняння розрахунку площі та її невизначеності для квадратної діафрагми 5 способами, які засновані на вимірюванні координат точок на межах діафрагми. Перший спосіб полягає у вимірюванні координат чотирьох точок за вершинами квадрата, та великої кількості точок, приблизно рівномірно розподілених у межах діафрагми. Другий спосіб полягає в багаторазовому вимірюванні тільки координат вершин і усередненні отриманих результатів. За цими двома способами площа розраховувалася за формулою Гауса. Третій спосіб полягає також у багаторазовому вимірюванні тільки координат вершин і обчисленні прилеглих до одного кута сторін квадрата й розрахунку площі. Площею квадрата вважалася сума площ двох прямокутних трикутників, побудованих на протилежних вершинах. Четвертий спосіб полягає у використанні формули обчислення площі, як теори довжин двох сторін, одна з яких вважається паралельною осі відлікової координат. П'ятий спосіб полягає у припущенні, що площа квадрата є чверть від суми площ побудованих на кожній стороні квадрата. Невизначеність вимірювань координат моделювалася додаванням до координат точок випадкової величини. Як випадкова величина використовувалася стандартна функція Excel, щільність розподілу якої за великого числа реалізацій близька до рівномірної. Загальне число вимірювань однакове у всіх випадках. Стандартне відхилення цієї випадкової величини розраховувалося. Розрахунки за кожним способом були проведені 100 разів для декількох значень стандартного відхилення випадкової величини. Було розраховано середнє значення і стандартне відхилення площі по кожному із способів. Показано, що стандартне відхилення площі, розраховане із урахуванням точок, розташованих на сторонах квадрата, приблизно на 20 % більше, ніж розраховані за іншими способами для такого ж числа вимірювань.

This theoretical work touches measurements of diaphragm area during the leadthrough of photometric and aerophare researches. It is based on a mathematical design on the method of Monte Carlo and touches the nonpederemoshchey measuring of area of square diaphragm. The results of comparison of calculation of area and its vagueness are resulted for a square diaphragm by 5 methods, based on measuring of co-ordinates of points on the limits of diaphragm. The first method consists in measuring of coordinates of four points on the tops of square and plenty of points, approximately evenly up-diffused on the limits of diaphragm. The second method consists in the frequent measuring only of coordinates of tops and averaging of the got results, in these two methods an area settled accounts after the formula of Gausse. The third method consists also in the frequent measuring only of coordinates of tops and calculation of adjoining to one corner sides of square and calculation of area. The area of square was consider the sum of areas of two rectangular triangles of built on opposite tops. A fourth method consists in the use of formula of calculation of area, as works of lengths of sides, each of which was considered the parallel landmark of the proper coordinates. A fifth method consists in supposition, that an area of square is a fourth from the sum of areas which are built on every side of square. The vagueness of measurings of coordinates was designed adding to the co-ordinates of points of casual size. As a casual size was utilized built-in function of Excel, distributing of which at the large number of realization close to even. The incurrence of measurings is identical in all of cases. Standard deviation of this casual size settled accounts. Calculations on every method were conducted 100 times for a few values of standard deviation of casual size. A mean value and standard deviation of size of area was expected on each of methods. It is retined, standard that rejection of size of area, which is expected taking into account points which are located on the sides of square approximately on 20% more than expected after another ways for the same number of measurings.

**Ключові слова:** точність вимірювання, діафрагма, площа, метод Монте-Карло.  
**Keywords:** measurement accuracy, aperture, area, Monte Carlo method.

**В**имірювання площі діафрагми у фотометрії дозволяє пов'язати потік, яскравість та освітленість (1), тобто постійно актуально для широкого кола завдань. Існують апаратні способи вимірювань площі (2, 3) та такі, що засновані на вимірюванні





координат меж діафрагми різними методами, зокрема координатними машинами, а також мікроскопами (4—6). Наявні роботи, щодо розрахунків площі діафрагми за координатами меж діафрагми (7). Під час вимірювань важливе не тільки величина площі, але й те, з якою невизначеністю вона виміряна. Найширше поширена оцінка невизначеності відповідно до GUM (8), яка заснована на лінійному наближенні й використанні модельного рівняння. Такий підхід дозволяє аналітично однозначно пов'язати невизначеності членів модельного рівняння і невизначеності результату. У разі, коли модельне рівняння істотно нелінійно, або результат вимірювання визначається у результаті вирішення складної системи рівнянь, або модельне рівняння є незручним для розрахунків, тоді використання GUM утруднене. У таких випадках значні переваги має обчислення невизначеностей за методом Монте-Карло. У документі (9) розглянуто деякі аспекти використання цього методу. Зокрема, точність розрахунку залежить від числа реалізацій. Оскільки способи розрахунку за GUM і методом Монте-Карло відрізняються, то природно існують відмінності у результатах. Приклад дослідження таких відмінностей можна знайти в (10).

У фотометрії й радіометрії найбільш поширені круглі діафрагми, проте поширені фотодіоди з приблизно 100 % внутрішньою квантовою ефективністю, наприклад, S1337-1010ER фірми «Hamamatsu» (11) мають квадратну приймальну площу. Її розмір близько 10 мм. Для зменшення впливу поляризації випромінювання фотодіод розміщують під кутом 45 градусів до вхідного випромінювання у такий спосіб, щоби за послідовного падіння на фотодіоди  $p$  та  $s$  площини поляризації за чергою змінювалися. Тому вхідна діафрагма повинна бути у  $\sqrt{2}$  разів меншою від розміру фотодіода, тобто приблизно 7 мм. Використання квадратної діафрагми дозволяє збільшити корисну площу, а внаслідок цього і сигнал більш ніж на  $(4-\pi)/4$ , тобто приблизно на 20 %, тому використання квадратної діафрагми має певну перевагу.

У теоретичній роботі (12) розглянуто деякі питання розрахунку площі й її невизначеності для круглої діафрагми. Оскільки відповідність форми діафрагми ідеальному кругу потребує доказу, то використовувався розрахунок площі круга за координатами границі діафрагми. Пропонується використати аналогічний підхід для квадратної діафрагми. Необхідність цього дослідження зумовлена тим, що на відміну від круга у квадрата існують вершини — чотири особливі точки, внесок їх невизначеностей у результативну невизначеність може відрізнятися від внеску решти точок. Способи подальшого розрахунку пло-

щі квадрата можуть відрізнитися. Метою цієї роботи є порівняння деяких способів обчислення площі квадратної діафрагми й її невизначеності за наслідками вимірювання координат її меж.

## МЕТОД

Для вирішення поставленого завдання використовувалося математичне моделювання — метод Монте-Карло. Вибиралася модельна діафрагма — квадрат зі сторонами, паралельними осям координат. Таке розміщення діафрагми не знижує загальності. Розглядалися п'ять способів обчислення площі цього квадрата з використанням однакового числа вимірювань, точніше — імітацій вимірювань. За першим способом моделювалося вимірювання координат у 64 точках  $(x_p, y_p)$ , що рівномірно розподілені по межі квадрата, у тому числі й точки у вершинах. Площа квадрата розраховувалася за формулою Гауса:

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right|.$$

Другий спосіб полягав у використанні цієї ж формули, але моделювалося вимірювання тільки координат вершин квадрата  $(x_{i,j}, y_{i,j})$ . Вершини нумерувалися за годинниковою стрілкою від 1 до 4, починаючи від верхньої лівої вершини. Визначалася площа. Процедура повторювалася  $j = 1 \dots 16$  разів для того, щоби загальне число імітацій вимірювання було таким самим. Результатом розрахунку площі вважалася середнє із набутих 16 значень площі:

$$A = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{16} \left| \sum_{i=1}^3 x_{i,j} y_{i+1,j} + x_{4,j} y_{1,j} - \sum_{i=1}^3 x_{i+1,j} y_{i,j} - x_{1,j} y_{4,j} \right|.$$

Третій спосіб полягав у використанні обчислення площі, як твори довжин сторін. Вершини нумерувалися як і у попередньому разі. Відмінністю кута квадрата від 90 градусів нехтувалося. Нехтувалося і непаралельністю сторін квадрата осям координат. Площею квадрата вважалася сума площ двох прямокутних трикутників, які побудовано на точках 4,1,2 і 4,3,2. За цим способом процедура так само повторювалася 16 разів для того, щоби загальне число імітацій вимірювань було таким же.

$$A = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{16} \sqrt{(x_{1,j} - x_{4,j})^2 + (y_{1,j} - y_{4,j})^2} \times \\ \times \sqrt{(x_{1,j} - x_{2,j})^2 + (y_{1,j} - y_{2,j})^2} + \\ + \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{16} \sqrt{(x_{1,j} - x_{4,j})^2 + (y_{1,j} - y_{4,j})^2} \times \\ \times \sqrt{(x_{3,j} - x_{2,j})^2 + (y_{3,j} - y_{2,j})^2}$$



Четвертий спосіб полягав у використанні формули обчислення площі, як твори довжин сторін, кожна із яких уважалася паралельною осі відповідної координати. Як і у попередньому випадку, вершини нумерувалися за годинниковою стрілкою від 1 до 4, починаючи від верхньої лівої вершини. Відмінністю кута квадрата від 90 градусів нехтувалося. Площею вважалось середнє значення між площею квадратів, що побудовані на сторонах 1—4, 1—2 та 3—4, 3—2. Довжина сторони вважалася залежною тільки від однієї координати. За цим способом процедура так само повторювалася 16 разів для того, щоби загальне число імітацій вимірювань було таким самим.

$$A = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{16} [(x_{1,j} - x_{4,j}) \cdot (y_{1,j} - y_{4,j}) + (x_{2,j} - x_{3,j}) \cdot (y_{4,j} - y_{3,j})].$$

П'ятий спосіб полягав у припущенні, що площа квадрата — це чверть від суми площ, побудованих на кожній стороні квадрата:

$$A = \frac{1}{64} \sum_{j=1}^{16} [(x_{1,j} - x_{4,j})^2 + (x_{2,j} - x_{3,j})^2 + (y_{1,j} - y_{4,j})^2 + (y_{2,j} - y_{3,j})^2].$$

У запропонованих способах поступово збільшується кількість припущень. Для першого способу припускається неістотна кривизна сторін. Для другого способу припускається прямолінійність сторін. За третім способом до прямолінійності сторін додається припущення стосовно того, що принаймні два кути прями. За четвертим способом додатково припускається, що під час вимірювань сторони квадрата розміщені точно паралельно осям координат. П'ятий спосіб полягає в обчисленні й усередненні площі за кожною зі сторін, розташованих паралельно осям координат. У всіх способах одиниці вимірювання координат і площі не фіксовані, тобто застосовні до будь-яких реальних розмірів, проте для зручності розглядався квадрат зі стороною 7 мм. Координати всіх точок точно відомі, площа квадрата так само точно відома. Моделювання вимірювань полягало в тому, що в середовищі Excel генерувалося випадкове число у заданому діапазоні. Розраховувалося стандартне відхилення цих чисел. За великого числа реалізацій розподіл цих випадкових чисел близький до рівномірного. Ці випадкові числа додавалися до точно відомих координат точки, тобто відповідно до (13) моделювалася похибка вимірювання — виміряне значення величини мінус референтне значення величини. Звичайно такий розподіл характерний для невилученої систематичної похибки. Для випадкових похибок зазвичай передбачається

Гаусовий розподіл, проте за малого числа вимірювань відмінність впливу рівномірного і Гаусового розподілів незначна. За формулами 1—5 розраховувалися площі. Після цього значення випадкових чисел оновлювалися і процедура повторювалася. Було проведено 100 таких процедур для різних значень випадкових чисел. За ними розраховувалися середні площі й стандартні відхилення для кожної з формул. Стандартні відхилення розглядалися як оцінка невизначеності відповідної величини. Передбачається, що для першого способу обчислення площі вплив невизначеностей, пов'язаних з визначенням координат, відрізнятимуться від останніх внаслідок наявності точок, розташованих на сторонах квадрата. Явна відмінність ступеня впливу невизначеності вимірювання координат на невизначеність обчислення площі за рівного числа вимірювань може слугувати підставою для вибору способу вимірювання та розрахунку. Зрозуміло, що для обраного числа реалізацій (100) точність визначення стандартних відхилень невелика, але достатня для приблизних оцінок.

## РЕЗУЛЬТАТИ

Типовий розподіл випадкових чисел для 100 000 реалізацій функції Excel (СЛУЧМЕЖДУ(-100;100)/100), яку було використано, подано на рис. 1.

Результати розрахунку площі за кожною з формул (1—5) представлено в таблиці 1.

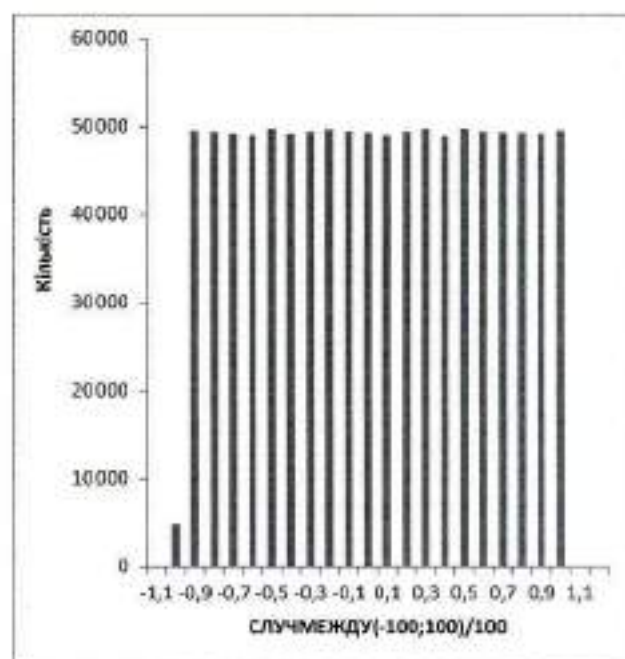


Рис. 1. Розподіл випадкових чисел функції СЛУЧМЕЖДУ(-100;100)/100 для 100 000 реалізацій.  
Fig. 1. Distributing of random numbers of СЛУЧМЕЖДУ(-100;100)/100 function, which were utilized for a 100 000 realization.



Таблиця 1. Результати розрахунку площі квадрата за формулами 1—5.  
Table 1. Results of calculation of area of square on formulas 1—5.

Відносне стандартне відхилення сторони, %	0,010	0,026	0,051	0,102	0,482
Стандартне відхилення сторони, мм	0,00072	0,00180	0,00359	0,00717	0,03372
Середня довжина сторони, мм	7,00000005	6,99999558	6,99999713	6,99998134	6,99994961
Площа за формулою 1	48,999905	49,000029	48,999964	48,998564	48,999954
Площа за формулою 2	49,000021	49,000165	48,999801	49,002990	48,986534
Площа за формулою 3	49,000007	49,000316	48,999718	49,003233	48,989615
Площа за формулою 4	49,000022	49,000205	48,999867	49,002839	48,987271
Площа за формулою 5	49,000023	49,000209	48,999880	49,002886	48,988396

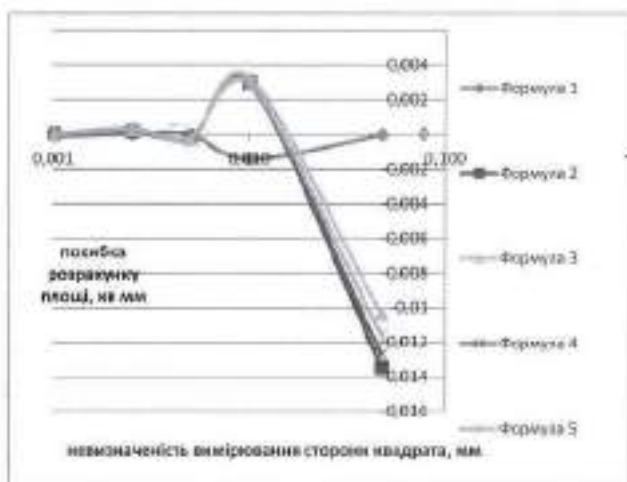


Рис. 2. Відмінності розрахованих за формулами 1—5 площ від їх дійсного значення по 100 реалізаціям  
Fig. 2. Difference of areas on formulas 1—5 from its veritable value for to a 100 realization

Для наочності відмінності розрахованих площ від їх дійсних значень (оцінки похибки), нормовані на площу для кожного значення стандартного відхилення координат, яке використано, в графічному виді подано на рис. 2. Отримані відхилення мають різні знаки, і видно, що результат розрахунку пло-

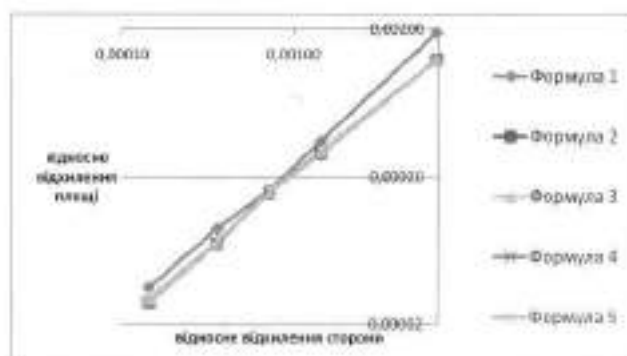


Рис. 3. Відносні стандартні відхилення сторін та площ квадрата за формулами 1—5, розраховані по 100 реалізаціям  
Fig. 3. Relative standard deviations of side length and areas of square on formulas 1—5, which estimate for 100 realization

щі за формулою 1 істотно відрізняється від останніх у меншу сторону. Для експериментальних результатів таку залежність отримати неможливо, оскільки справжня величина зазвичай невідома, відома тільки її оцінка.

Результати розрахунку стандартних відхилень, обчислених за 100 реалізаціями площ по кожній із формул (1—5), подано в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати розрахунку стандартних відхилень, обчислених за 100 реалізаціями площ за формулами (1—5).  
Table 2. Results of calculation of standard deviation of area which estimate for 100 realization on formulas (1—5).

Стандартне відхилення сторони, мм	Стандартне відхилення площі за формулою 1, кв. мм	Стандартне відхилення площі за формулою 2, кв. мм	Стандартне відхилення площі за формулою 3, кв. мм	Стандартне відхилення площі за формулою 4, кв. мм	Стандартне відхилення площі за формулою 5, кв. мм
0,0010	0,0017	0,0014	0,0015	0,0014	0,0014
0,0025	0,0043	0,0035	0,0036	0,0035	0,0035
0,0051	0,0080	0,0076	0,0078	0,0075	0,0075
0,0101	0,0170	0,0140	0,0146	0,0140	0,0140
0,0475	0,0926	0,0606	0,0612	0,0599	0,0599



Таблиця 4. Відносне стандартне відхилення площі квадрата, поділене на відносне стандартне відхилення сторони

Table 4. Relative standard deviation of area of square, divided by relative standard deviation of side length

Відносне стандартне відхилення сторони	Відносне стандартне відхилення площі, поділене на відносне стандартне відхилення сторони				
	1 спосіб	2 спосіб	3 спосіб	4 спосіб	5 спосіб
0,0001	0,244	0,195	0,207	0,191	0,191
0,0004	0,245	0,195	0,203	0,196	0,196
0,0007	0,225	0,213	0,219	0,213	0,213
0,0014	0,241	0,198	0,207	0,197	0,197
0,0068	0,278	0,182	0,184	0,180	0,180
Середнє значення для розглянутих стандартних відхилень сторони					
	0,247	0,197	0,204	0,195	0,195

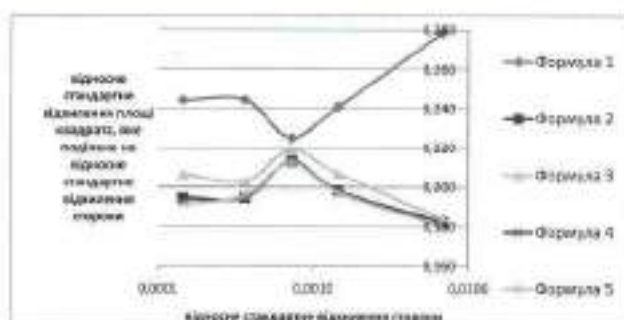


Рис. 4. Відносне стандартне відхилення площі квадратної діафрагми, поділене на відносне стандартне відхилення сторін для способів визначення площі, які розглянуто.

Fig. 4. Relative standard deviation of area of square diaphragm which is divided by relative standard deviation of side length for the methods of determination of area which were utilized.

Оскільки відомі точні значення сторін (7 мм) і площі (49 кв. мм), ці результати подано у відносному виді на графіку на рис. 3. Графік подано у логарифмічному масштабі для обох осей.

Отримані залежності приблизно лінійні як у логарифмічному, так і у звичайному масштабі. Тому наведені результати дозволяють оцінити усереднену залежність відносного стандартного відхилення площі, поділеної на відносне стандартне відхилення сторін, що в такому випадку можна розглядати як зв'язок відносної невизначеності вимірювання сторони квадрата з відносною невизначеністю обчислення площі. Це відношення можна розглядати як критерій для вибору способу вимірювання і розрахунку. Результати розрахунків (безрозмірні величини) подані у таблиці 3 і на рис. 4.

#### ВИСНОВКИ

Проведені розрахунки не пов'язані з реальними розмірами, подана в останньому рядку в таблиці 4 та на рис. 4 величина характеризує способи ви-

мірювання і розрахунку площі квадратної діафрагми незалежно від її конкретних розмірів. Основний результат проведених обчислень полягає в тому, що отримані величини одного порядку, хоча у формулі 1 використовується тільки одноразове вимірювання координат кожної точки, а у формулах 2, 3, 4 і 5 по 16. Середнє відхилення розрахованої величини площі від істинної для формули 1, як видно з таблиці 1 і графіка на рис. 1, менше ніж для інших формул. Середньоквадратичне відхилення величини площі, розрахованої за формулою 1, як видно з таблиці 4 та рис. 4, більше ніж для інших. Мале число реалізацій (100) не дає достатніх підстав говорити стосовно того, що розрахунок площі з використанням формули Гауса за точками на сторонах і вершинах квадрата точно дає на 20 % більшу невизначеність, хоча за результатами, які подано, це можна припустити. Середньоквадратичні відхилення величин площі, розраховані за формулами 2—5, між собою різняться несуттєво. Тобто можна рекомендувати використовувати будь-яку з цих формул. Загальне число вимірювань (64) вибрано достатньо довільно. Тому основні переваги використання кожної з формул 1—5 полягають не в значній відмінності невизначеності, а в кількості використаних припущень. Для використання формули 1 прямолінійність сторін і величина кута при вершині не мають великого значення. Для застосування формули 2 не обов'язкова точна відповідність кутів діафрагми прямому куту. Формули 3, 4 і 5 найбільш прості для їх застосування необхідно бути впевненим у прямолінійності сторін і в точності прямих кутів при вершинах, для формул 4 і 5 стає важливою паралельність сторін діафрагми осям координат.


Проведені розрахунки було здійснено у зв'язку з потребами фотометрії, проте було розглянуто тільки прості геометричні розрахунки, які застосовні



для будь-якої сфери, де потрібні знання площі і розрахунки її невизначеності. Найчастіше у фотометрії знання площі діафрагми потрібне для зв'язку енергетичного або світлового потоку з освітленістю або яскравістю, причому часто для отримання інформації стосовно потоку використовується електричний сигнал фотодіода. Тому для вимірювань у фотометрії і радіометрії, окрім знання площі діафрагми, потрібна інформація стосовно рівномірності розподілу освітленості, стосовно наявності віддзеркалень від країв діафрагми, стосовно впливу дифракції, рівномірності чутливості прий-

мача й інші відомості. У бюджеті невизначеностей величина площі діафрагми й її невизначеність має бути тільки однією зі складових. Для трап детектора або PQED конфігурації потрібно порівнювати отримані невизначеності з невизначеностями величини внутрішньої квантової ефективності приймача. У будь-якому випадку вибір способу вимірювання і розрахунку площі квадратної діафрагми вимагає всебічного аналізу й урахування специфіки конкретного випадку, а розглянутий підхід і проведені обчислення допоможуть обґрунтувати такий вибір.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM), ISO/IEC GUIDE 99:2007(E/F).
2. A new optical method for high-accuracy determination of aperture area, — E.Ikonen, P.toivanen and A. Lassila *Metrologia*. — 1998. — 35. — 369—372.
3. Optical aperture area determination for accurate illuminance and luminous efficacy measurements of LED lamps. — Timo Donsberg, Henrik Mantynen, Erkki Ikonen. — *Opt Rev.* — (2016). — 23. — стр. 510—521.
4. Measurement of Aperture Areas Using an Optical Coordinate Measuring Machine. — Björn Hemming, Erkki Ikonen & Mart Noorma. — *International Journal of Optomechatronics*. — 2007. — 297—311.
5. Geometric area measurements of circular apertures for radiometry at NIST. — Joel Fowler and Maritoni Litorja. — *Metrologia*. — 40. — 2003. — S9—S12.
6. Measurement Traceability and Uncertainty in Machine Vision Applications, Björn Hemming, Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology, Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 17th of December 2007.
7. IWSSIP 2010 — 17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing 494, Measurement of the aperture area: an edge enhancement algorithms comparison. Pedro Bastos Costa, Fabiana Rodrigues Leta.
8. ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008) ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018 Неопределенность измерений. Часть 3. Руководство по представлению неопределенности в измерениях (GUM:1995).
9. ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT.
10. Новиков В.В. (2007) Вычисление расширенной неопределенности. — Системы обработки информации (Novikov V.V. (2007) Calculation of the extended vagueness. — *Sistemi of treatment of information*), № 6(64). — с/р. 74—76.
11. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/>
12. Купко О.Д. (2019) Аналіз точності розрахунку площі діафрагми методом Монте-Карло. — *Метрологія та прилади* (Kurko O.D. (2019) Analysis of exactness of calculation of diaphragm area by the method of Monte Carlo. — *Metrologiya and instruments*). — 6. — с/р. 22—26.
13. JCGM 200:2012. Міжнародний словник з метрології — Основні й загальні поняття та пов'язані з ними терміни (VIM). Видання 3 Версія 2008 року з незначними виправленнями (JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). — 3 edition. — version 2009). — с/р. 69. 

Отримано / received: 14.05.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. Ю.І. Добровольським (Україна).  
D. Sc. (Techn.) Yu.I. Dobrovolskyi, Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.32-37

УДК 681.366

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАКЛАДНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АБСОЛЮТНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ

**Mathematical Model of Overhead  
Transformer Eddy Current Sensor  
of Absolute Movement**

**В. Ф. Граняк**, кандидат технічних наук, доцент,  
**В. В. Кухарчук**, доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри,  
Вінницький національний технічний університет,  
Україна,  
e-mail: titanxp2000@ukr.net

**V. F. Hraniak**, candidate of technical sciences, docent,  
**V. V. Kukharchuk**, doctor of technical sciences,  
professor, head of the department,  
Vinnitsa National Technical University,  
Ukraine,  
e-mail: titanxp2000@ukr.net

Розроблено математичну модель накладного трансформаторного вихрострумовеого первинного вимірювального перетворювача абсолютного переміщення. Показано, що у функціональній залежності від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем за постійного значення струму струмової обмотки у вихідному сигналі перебувають як амплітудне значення вихідної напруги так і зміщення її початкової фази. Встановлено, що за вимірювального перетворення типу «аксіальне зміщення — амплітудне значення вихідної напруги» та діапазону вимірювання від 0,5 до 2,5 мм статична характеристика типового накладного трансформаторного вихрострумовеого сенсора матиме суттєву нелінійність. Показано, що ефективним способом зменшення похибки нелінійності статичної характеристики зазначеного первинного вимірювального перетворювача є звуження діапазону вимірювання.

The mathematical model of the overhead transformer eddy current primary measuring transducer of absolute movement is developed in the work. It is shown that in the functional dependence on the distance between the sensor and the conductive medium at a constant value of the current of the current winding in the output signal are both the amplitude value of the output voltage and the displacement of its initial phase. It is established that during the measurement transformation of the type "axial displacement — amplitude value of the output voltage" and the measurement range from 0.5 to 2.5 mm, the static characteristic of a typical overhead transformer eddy current sensor will have significant nonlinearity. It is shown that an effective way to reduce the nonlinearity error of the static characteristic of the specified primary measuring transducer is to narrow the measuring range.

**Ключові слова:** накладний трансформаторний вихрострумовеого сенсор, математична модель, статична характеристика, абсолютне переміщення, чутливість.

**Keywords:** overhead transformer eddy current sensor, mathematical model, static characteristic, absolute displacement, sensitivity.

## ВСТУП

Широковживаним на сьогодні є визначення поточного технічного стану силових електричних машин (турбо- та гідроагрегатів, гідрогенераторів, оборотних машин і т. ін.) за допомогою вібродіагностування [1]. Це пов'язано як з високою інформативністю такого параметра, так і з можливістю вимірювання цього параметра безпосередньо за реального режиму роботи електричної машини без втручання в її конструкцію [2]. Серед інших віброхарактеристик високу інформативність має радіальна й осьова складові.

Під час дослідження осьової складової вібросигналу найбільший інтерес з точки зору інформативності стосовно технічного стану машини, зокрема технічного стану її опорних вузлів, можна отримати на основі аналізу значення зміщення ротора відносно статора чи іншої жорстко закріпленої конструкції, що не є його частиною [3]. Особливістю цієї складової вібросигналу є те, що вона має слабкий кореляційний зв'язок з кутовим положенням ротора та частотою його обертання [4]. Основною причиною



В. Ф. Граняк



В. В. Кухарчук



ї виникнення є люфт ходу ротора в осьовому напрямку внаслідок дії осьової складової сили, що передається від робочого органу (може також додаватися і гравітаційна складова, у випадку вертикальної конструкції електричної машини). Оскільки в процесі розвитку дефектів опорних вузлів (їх зношення) поступово зростає і люфт за дії однакової осьової проекції зусилля, то поточний контроль такого технічного параметра дозволяє не лише виявити наявність дефектів підшипникових вузлів, але й дозволяє запобігти повному руйнуванню агрегата, що має високу ймовірність у випадку аварійного виходу з ладу вузлів кріплення ротора.

Перспективними для моніторингу осьового зміщення ротора електричних машин є засоби вимірювання абсолютного переміщення, в основу яких покладено вихрострумний метод вимірювання. Такі сенсори дозволяють вимірювати абсолютні переміщення феромагнітних конструкцій порядку 0,1 мкм за забезпечення необхідної для роботи системи технічного контролю чи діагностування швидкодії. А також, у випадку використання накладних вихрострумних вимірювальних перетворювачів (ВВП) не потребують втручання у конструкцію електричної машини [5]. Однак, широке застосування таких ВВП та засобів вимірювання осьового зміщення, побудованих на їх основі, ускладнюється відсутністю високоточних математичних моделей вихрострумних сенсорів [6]. Тож, розроблення таких математичних моделей має значне як загальнотеоретичне, так і прикладне значення.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Накладні ВВП можуть бути параметричними, якщо мають одну обмотку, та трансформаторними, з двома і більше обмотками [6]. Проте трансформаторні сенсори мають ряд суттєвих переваг перед параметричними. Зокрема, вони характеризуються більш високою стабільністю вихідного сигналу. Також, за використання однообмоткових (параметричних) сенсорів власний опір обмотки додається з корисним внесеним опором, що робить вихідний сигнал більш залежним від зовнішніх впливних величин (температури, вологості та ін.) [6]. Ураховуючи сказане, є очевидним, що для побудови високоточних систем технічного контролю та діагностування силових електричних машин доцільним є використання засобів вимірювання саме на основі трансформаторних ВВП. Тому у подальших дослідженнях зосередимося саме на них.

З точки зору моделювання вихідних сигналів накладних ВВП за певних умов (зазори, частоти, струмі тощо) основною задачею є розрахунок комплексної

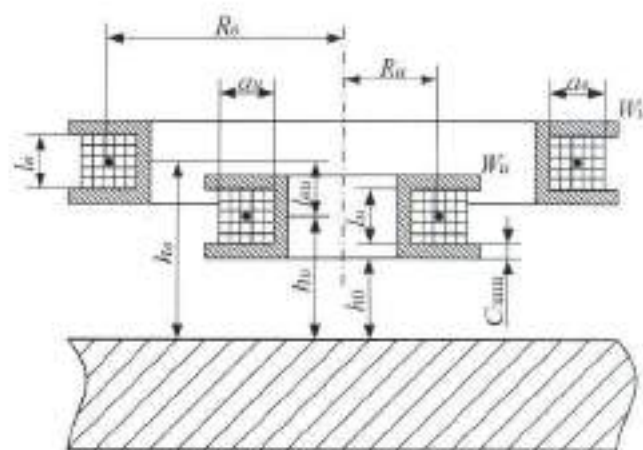


Рис. 1. Розрахункова модель накладного двохобмоткового ВВП

Fig. 1. Estimated model of overhead double-winding GDP

внесеної напруги на вимірювальній обмотці двохобмоткового ВВП.

Найчастіше на практиці використовується катушка з коловими витками.

Типову конструктивну схему такого сенсора без каркаса та елементів кріплення наведено на рис. 1 [6]. Безпосередньо на основі даних рис. 1 з урахуванням товщини захисної щічки  $C_{st}$ , взаємного розташування  $l_m$  і висоти обмоток  $l_1$ ,  $l_2$  можна знайти значення зазорів.

### АНАЛІЗ ШЛЯХІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Основним вихідним параметром трансформаторного вихрострумного сенсора є значення ЕРС або напруги на вимірювальних обмотках.

Коли поблизу накладного ВВП немає об'єкта контролю, то початкова напруга на його вимірювальній обмотці визначатиметься взаємоіндуктивністю  $M$  між його катушками:

$$\underline{U}_2 = -j\omega M_{12} \underline{I}_1, \quad (1)$$

причому значення взаємоіндуктивності між обмотками для конкретного сенсора  $M_{12}$  можна отримати за допомогою відомих співвідношень [8, 9].

Розглянемо сенсор з малим поперечним перерізом обмоток, а потім поширимо отримані результати на реальні сенсори. Взаємне розташування

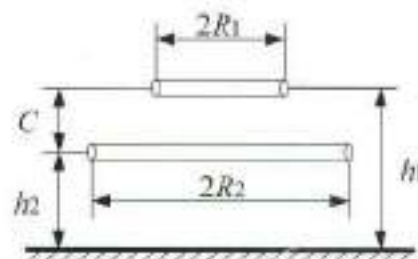


Рис. 2. Розташування обмоток трансформаторного сенсора

Fig. 2. Location of transformer sensor windings



обмоток для ідеального випадку наведено на рис. 2.

Як показано у [9], напруженість електричного поля може бути описана таким виразом:

$$\underline{E} = -j\omega W_1 \underline{A}_1, \quad (2)$$

де  $\underline{A}_1$  — вектор-потенціал сумарного поля у верхньому півпросторі;  $W_1$  — кількість витків струмової обмотки.

ЕРС вимірювальної обмотки визначається як циркуляція напруженості електричного поля  $\underline{E}$ , по контуру вимірювальної обмотки радіусом  $R_2$ :

$$EPC_2 = \oint_{\Gamma_2} \underline{E} dl, \quad (4)$$

де  $\Gamma$  — контур інтегрування.

У силу того, що напруженість  $\underline{E}$  постійна на будь-якому співвісному з струмовою обмоткою контурі, маємо

$$EPC_2 = 2\pi R_2 W_2 \underline{E}, \quad (5)$$

де  $W_2$  — кількість витків вимірювальної обмотки сенсора.

Підставивши (4) у (5), отримаємо:

$$EPC_2 = -j2\pi\omega R_2 W_1 W_2 \underline{A}_1. \quad (6)$$

Виконавши перетворення (6), можна отримати відповідні точні вирази ЕРС вимірювальної обмотки для середовищ різної структури. Проте, інтерпретація цих виразів, навіть за допомогою сучасної комп'ютерної техніки, є достатньо трудомісткою задачею. Звідси доцільним є використання саме наближених розрахунків для поля у верхньому півпросторі. Ураховуючи це, а також (6), отримуємо таку формулу для ЕРС вимірювальної обмотки у першому наближенні:

$$EPC_2 = -j \frac{10\mu_0}{4\pi} (34x - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{x}{2R_1}} \underline{I} - j \frac{10\mu_0}{4\pi} (34x - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{h_1+h_2}{2R_2}} \underline{I}\varphi_1(\lambda). \quad (7)$$

У наведеному виразі

$$c = |h_2 - h_1|, \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{3}{2R_2}. \quad (9)$$

Підставимо у (7)  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м), отримаємо:

$$EPC_2 = -j\omega 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{x}{2R_1}} \underline{I} - j\omega 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{h_1+h_2}{2R_2}} \underline{I}\varphi_1(\lambda). \quad (10)$$

У відповідності з (10) можна побудувати еквівалентну схему заміщення сенсора над провідним середовищем, наведену на рис. 3, уважаючи, що перший доданок виразу (10) є ЕРС, наведена у вимірювальній обмотці струмовою обмоткою зі струмом  $\underline{I}$ ,

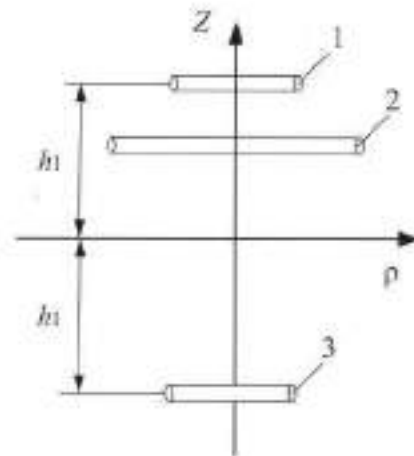


Рис. 3. Схема заміщення двообмоткового трансформаторного сенсора: 1, 2 — обмотки сенсора, 3 — уявна обмотка

Fig. 3. Scheme of replacement of the two-winding transformer sensor: 1, 2 — sensor windings, 3 — imaginary winding

а другий доданок — ЕРС, наведена дзеркальним відображенням струмової обмотки зі струмом  $\underline{I}\varphi_1(\lambda)$ .

У відповідності з наведеною схемою заміщення, вираз (10) можна записати у такому виді:

$$EPC_2 = -j\omega M_{12} \underline{I} - j\omega M_{22} \underline{I}\varphi_1(\lambda), \quad (11)$$

де  $M_{12}$  — взаємна індуктивність між струмовою та вимірювальною обмотками;  $M_{22}$  — взаємна індуктивність між зображеннями струмової обмотки та вимірювальною обмотками.

$$M_{12} = 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{x}{2R_1}}, \quad (12)$$

$$M_{22} = 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{h_1+h_2}{2R_2}}. \quad (13)$$

Перші частини формул (7), (10) та (11) дають вираз для початкової ЕРС сенсора  $EPC_n$  за відсутності провідного середовища, другі частини — ЕРС, що наводиться вихровим струмом провідного середовища, тобто відносно  $EPC_{\text{вх}}$ .

Ураховуючи відносно невелике значення напруженості магнітного поля, що створюється струмовою обмоткою, значення відносної магнітної проникності торцевої частини ротора можна вважати постійним. У такому випадку [8]:

$$\varphi_1(\lambda) = j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14\beta^2}}{3\mu + \sqrt{9 + 14\beta^2}}, \quad (14)$$

де  $\mu$  — відносна магнітна проникність торцевої частини ротора;  $\beta$  — коефіцієнт, що враховує електромагнітні властивості торцевої частини ротора (феромагнітного середовища, що впливає на сенсор) та визначається у такий спосіб:

$$\beta = R_2 \sqrt{\omega\sigma\mu_0}, \quad (15)$$



де  $\sigma$  — питома електропровідність торцевої частини ротора;  $\mu$  — відносна магнітна проникність торцевої частини ротора.

Уведемо такі позначення:

$$\begin{cases} U_{2c} = -EPC_2, \\ U_{2a} = 34 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I. \end{cases} \quad (16)$$

де  $U_{2c}$  — напруга на вимірювальній котушці;  $U_{2a}$  — модуль початкової напруги на вимірювальній котушці за відсутності провідного середовища.

З урахуванням (16), а також урахувавши те, що відстань між сенсором та струмовідним середовищем  $x$  дорівнює  $h_2$  та прив'язавши нульову початкову фазу до початкової фази струму в струмовій обмотці, можемо записати таку наближену залежність:

$$U_2 = jU_{2a} \left( e^{-\frac{3x}{2R_1}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} \right) j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}}. \quad (17)$$

Отриманий вираз однозначно пов'язує вхідну (відстань між сенсором та струмовідним середовищем) і вихідну (комплексну напругу на вимірювальній котушці) величини. Оскільки від відстані між сенсором та струмовідним середовищем залежать два параметри: амплітудне значення вихідної напруги та її зміщення за фазою, — то на основі (17) можна подати рівняння перетворення такого сенсора у виді:

$$U_2(x) = \sqrt{2} \cdot \left[ j \cdot 34 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I \times \left( e^{-\frac{3x}{2R_1}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} \right) j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}} \right]. \quad (18)$$

$$\varphi_2(x) = \arg \left[ j \cdot 34 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I \times \left( e^{-\frac{3x}{2R_1}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} \right) j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}} \right]. \quad (19)$$

Вирази (18) та (19), по суті, є рівняннями перетворення накладного трансформаторного ВВП за перетворення вимірювального сигналу у діюче значення напруги та зміщення фази, відповідно. Оскільки на практиці амплітудне значення вихідної напруги прямо пропорційне амплітуді струму обмотки струму, то доволі поширеною практикою є зменшення останнього з метою зменшення потужності інформаційних кіл сенсора та застосування додаткового нормуючого підсилювача на виході вимірювальної котушки [5]. У такому випадку рівняння (18) можна записати

у такому виді:

$$U_2(x) = k \left[ j \cdot 48 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I \times \left( e^{-\frac{3x}{2R_1}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} \right) j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu_0}} \right], \quad (20)$$

де  $k$  — коефіцієнт підсилення нормуючого перетворювача.

Для моделювання залежностей (19) та (20) задано параметрами вихрострумове сенсор, наведеного у [9], для якого характерні такі технічні параметри: радіус струмової обмотки — 1,5 мм, радіус вимірювальної обмотки — 7,5 мм, кількість витків струмової обмотки — 260, кількість витків вимірювальної обмотки — 400, частота напруги живлення — 125 Гц, відстань між обмотками — 2 мм, діюче значення струму струмової обмотки — 0,1 А. Також для моделювання було прийнято: коефіцієнт підсилення

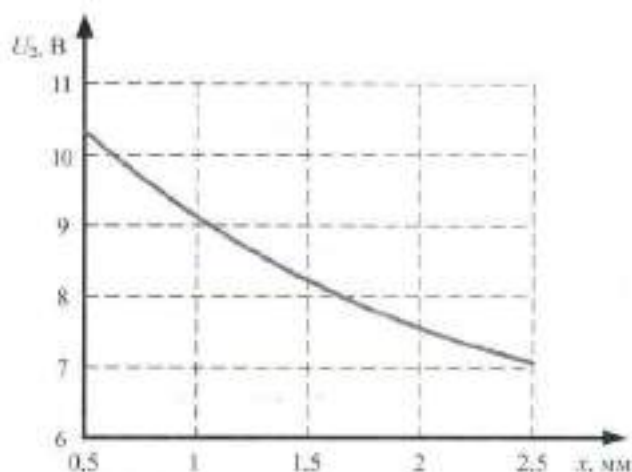


Рис. 4. Статична характеристика накладного трансформаторного ВВП за діючим значенням напруги  
Fig. 4. Static characteristics of the overhead transformer GDP by the current voltage value

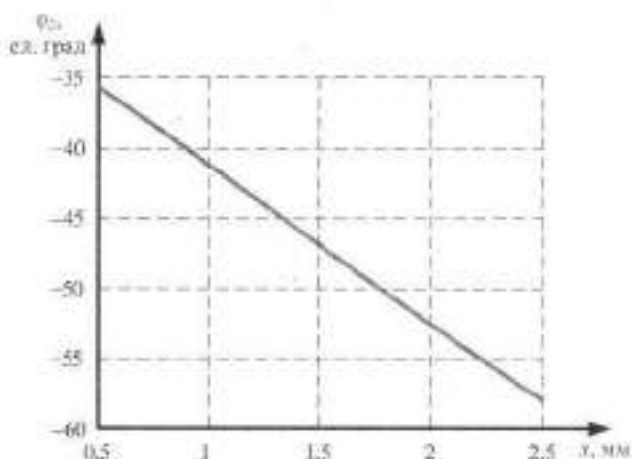


Рис. 5. Статична характеристика накладного трансформаторного ВВП за зміщенням початкової фази  
Fig. 5. Static characteristics of the overhead transformer GDP by the displacement of the initial phase



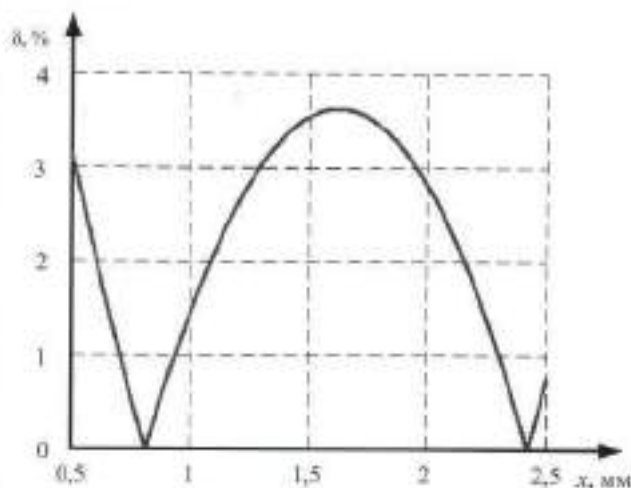


Рис. 6. Залежність відносної похибки нелінійності від виміряного значення відстані між сенсором та струмовідним середовищем

Fig. 6. Dependence of the relative error of nonlinearity on the measured value of the distance between the sensor and the conductive medium.

нормуючого перетворювача — 265, питома електропровідність торцевої частини ротора —  $10^7$  См/м; відносна магнітна проникність торцевої частини ротора —  $10^7$ . Статичні характеристики сенсора за діючим значенням струму та зміщення початкової фази наведено на рис. 4 та рис. 5, відповідно.

Як випливає з аналізу статичних характеристик (рис. 4 та рис. 5), задовільна чутливість за забезпечення заданих габаритних розмірів та енергетичних характеристик сенсора забезпечується лише за амплітудним значенням напруги, оскільки доволі легко піддається масштабуванню шляхом використання масштабованого перетворювача з необхідним коефіцієнтом. Тоді як чутливість, що забезпечується за вказаних габаритних розмірів накладного трансформаторного ВВП, є недостатньою для вимірювання осьового зміщення ротора у діапазоні від 0,5 до 2,5 мм з необхідною точністю та не може бути масштабована без використання доволі складних вимірювальних перетворювачів [10].

Ще однією особливістю, що випливає із аналізу статичної характеристики перетворення відстані між сенсором та струмовідним середовищем в амплітуду вихідної напруги (рис. 4), є її нелінійний характер, що для заданих параметрів моделювання носить значний характер. З метою оцінювання нелінійності статичної характеристики остання була апроксимована лінійною залежністю, що проходила через точки (0,5 мм; 10 В) та (2,5 мм; 7 В). Для отриманих значень вихідної напруги оцінено відносну похибку нелінійності за такою залежністю:

$$\delta(x) = \frac{|UL_2(x) - U_2(x)|}{U_2(x)} \cdot 100\%, \quad (21)$$

де  $UL_2(x)$  — напруга на виході сенсора, розрахована за допомогою лінійної апроксимації.

Результати моделювання (21) наведено на рис. 6.

Як випливає з рис. 6, відносна похибка нелінійності статичної характеристики для заданих параметрів сенсора та заданого діапазону вимірювання перевищує 3,6 %, що є недопустимим за побудови сучасних високоточних засобів вимірювання осьового зміщення ротора електричних машин. Ураховуючи сказане, є очевидною необхідність розроблення підходів для зменшення цієї складової похибки. Перспективними шляхами зменшення нелінійності статичної характеристики є зменшення діапазону вимірювань. Тож дослідимо вплив ширини вимірювального діапазону на зміну похибки нелінійності описаного вище сенсора.

Для дослідження впливу зменшення діапазону вимірювань проведено апроксимацію лінійною статичною характеристикою звуженого удвічі діапазону вимірювання (від 1,0 до 2,0 мм). Апроксимацію звуженої статичної характеристики було здійснено оптимальною лінійною залежністю за зміни напруги початку та кінця характеристики з кроком квантування 0,1 В. Отримана лінійна характеристика проходила через точки (1,0 мм; 9,1 В) та (2,0 мм; 7,5 В). Результати моделювання відносної похибки нелінійності для звуженого діапазону наведено на рис. 7.

Як випливає із аналізу залежності відносної похибки нелінійності, наведеної на рис. 6 та рис. 7, звуження діапазону вимірювання є ефективним методом зменшення похибки нелінійності. Зокрема,

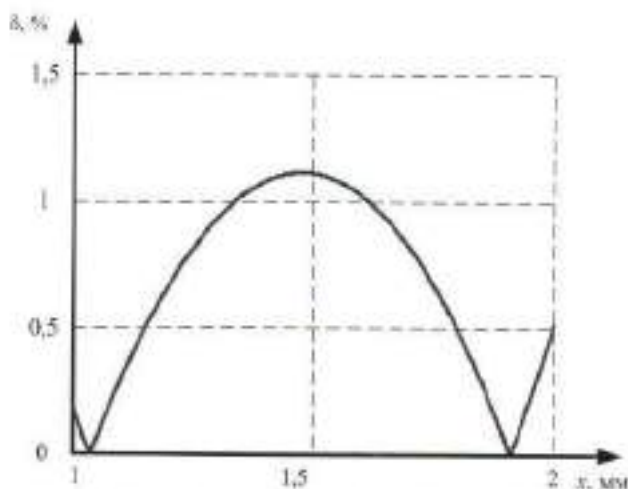


Рис. 7. Залежність відносної похибки нелінійності від виміряного значення відстані між сенсором та струмовідним середовищем для звуженого діапазону вимірювання

Fig. 7. Dependence of the relative error of nonlinearity on the measured value of the distance between the sensor and the conductive medium for the narrowed measuring range



для досліджуваного сенсора зменшення діапазону вимірювання вдвічі призводить до трикратного зменшення відносної похибки нелінійності.

### ВИСНОВКИ

Отримано математичну модель накладного трансформаторного ВВП. Показано, що у функціональній залежності від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем за постійного значення струму струмової обмотки перебуває як діюче значення напруги вимірювальної обмотки, так і зміщення її початкової фази.

Показано, що за збереження допустимих габаритних розмірів сенсора чутливість за перетворення відстані між сенсором та струмопровідним середовищем у зміщення початкової фази вихідного струму є недостатньою (для наведених конструктивних параметрів сенсора не перевищує 35 електричних градусів), для забезпечення необхідної точності вимірювання у повному діапазоні зміни аксіального зміщення. Тоді як за перетворення відстані між сенсором та струмопровідним середовищем в амплітудне значення напруги, значення останньої може бути доволі легко масштабоване до забезпечення необхідного

значення чутливості. Зокрема, для описаного сенсора, з урахуванням коефіцієнта підсилення нормуючого перетворювача, за забезпечення максимального рівня вихідної напруги  $\approx 10,24$  В та діапазону зміни відстані між сенсором та струмопровідним середовищем від 0,5 до 2,5 мм, вихідний сигнал напруги змінювався в діапазоні від 10,325 до 7,053 В. Тож, враховуючи сказане, є очевидною доцільність використання саме первинного вимірювального перетворення типу «відстань — амплітудне значення вихідної напруги».

Теоретично доведено, що у діапазоні зміни відстані від 0,5 до 2,5 мм та первинному вимірювальному перетворенні типу «аксіальне зміщення — амплітудне значення вихідної напруги» статична характеристика сенсора матиме суттєву нелінійність (для заданих конструктивних параметрів сенсора відносна похибка нелінійності перевищуватиме 3,6%).

Для зменшення нелінійності статичної характеристики накладних трансформаторних ВВП запропоновано несуттєве звуження діапазону вимірювання. Зокрема, для наведених конструктивних параметрів сенсора звуження діапазону вимірювання вдвічі призводить до трикратного зменшення відносної похибки нелінійності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Алексеев В.А. (2002) Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. Москва: НИЦ ЭНАС (Alekseev V.A. (2002) Determination of the state (diagnosis) of large hydrogenerators. Moscow: NTs ENAS). 144 с/р.
2. Hraniak V.F., Kukharchuk V.V., Kucheruk V.Y., Khassenov A. (2018) Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machines. Bulletin of the Karaganda University: PHYSICS Series. 1 (89): 72-80.
3. Ширман А.Р., Соловьев А.В. (1996) Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва: Машиностроение (Shirman A.R., Soloviev A.B. (1996) Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment. Moscow: Engineering). 276 с/р.
4. Rao S.S. (2007) Vibration of continuous systems. New York, USA: John Wiley & Sons. 720 p.
5. Троицкий В.А. (2011) Вихрековый контроль. Учебн. Пособие. Киев: Феникс (Troitsky V.A. (2011) Eddy current control. Training Allowance. Kiev: Phoenix). 148 с/р.
6. Кухарчук В.В., Бедицький Ю.Г., Граняк В.Ф. (2019) Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Монографія: Вінниця: ВНТУ (Kukharchuk V.V., Vedmitsky Yu.G., Graniak V.F. (2019) Vimiryuvannya parameters in the obturnal rukh of electro-mechanical overturning energy in the transition modes of the robot. Monograph: Vinnitsya: VNTU). 152 с/р.
7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. (1981) Расчёт индуктивностей. Ленинград: Энергоиздат (Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. (1981) Calculation of inductances. Leningrad Energoizdat). 136 с/р.
8. Учанин В.Н. (2010) Вихрековые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации. Техническая диагностика и неразрушительный контроль. (Uchanin V.N. (2010) Eddy current overhead transducers: advanced classification, comparative analysis and typical implementation examples. Technical diagnostics and non-destructive testing). 2010; 4: 22—28.
9. Соболев В.С., Шкарлет В.С. (1967) Накладные и экранные датчики. Монография. Новосибирск: Наука (Sobolev V.S., Shkarlet V.S. (1967) Overhead and screen sensors. Monograph. Novosibirsk: Science). 144 с.
10. Викторов В.А., Лункин В.В., Совлуков А.С. (1989) Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. Москва: Энергоатомиздат (Viktorov V.A., Lunkin V.V., Sovlukov A.S. (1989) Radio wave measurements of process parameters. Moscow: Energoatomizdat). 208 с/р.

Отримано / received: 16.05.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М.І. Стадніком (Україна).  
Prof. M.I. Stalnik, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.38-44

УДК 681.5

# ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАБОТЫ В СПЕЦИАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

## Weight Measuring Devices for Work In Special Conditions of Operation

**Г. А. Черепашук**, кандидат технических наук, профессор кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, e-mail: cherepaschuk@bigmir.net

**Е. Е. Калашников**, кандидат технических наук, доцент кафедры, e-mail: y.kalashnikov@khai.edu

**А. П. Потыльчак**, кандидат технических наук, доцент кафедры, e-mail: a.potylchak@khai.edu  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»  
г. Харьков, Украина

**G. A. Cherepashchuk**, candidate of technical sciences, professor of the department of intelligent measurement systems and quality engineering, e-mail: cherepaschuk@bigmir.net

**E. E. Kalashnikov**, candidate of technical sciences, associate professor of the department, e-mail: y.kalashnikov@khai.edu

**O. P. Potylchak**, candidate of technical sciences, associate professor of the department, e-mail: o.potylchak@khai.edu  
National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky «Khai»,  
Kharkov, Ukraine

Выполнен обзор современных весоизмерительных устройств. Определены факторы, влияющие на точность проведения взвешивания с помощью различных весоизмерительных устройств. Оценена степень влияния каждого влияющего фактора на результат измерения и оценена суммарная погрешность от одновременного воздействия всех влияющих факторов. Предложены способы повышения точности проведения взвешивания, позволяющие уменьшить погрешность, путем уменьшения степени воздействия факторов, влияющих на точность проведения взвешивания.

Выполненный обзор современных весоизмерительных устройств показал, что в промышленности наибольшее распространение получили весоизмерительные устройства прямого преобразования, которые осуществляют преобразование веса в физическую величину (угловое перемещение, линейное перемещение, деформация, частота и др.), удобную для кодирования и кодирования. В качестве измерительных преобразователей применяют резистатные, емкостные, индуктивные, пьезоэлектрические, а также тензорезистивные преобразователи, получившие наибольшее распространение. Определены факторы, являющиеся причиной возникновения дополнительных и динамических погрешностей весоизмерительных устройств: климатические факторы (температура и влажность окружающей среды), механические воздействия на весоизмерительное устройство (перегрузка, вибрация, боковые удары, раскачивание груза, существенные динамические нагрузки, низкочастотные динамичес-

кие помехи и др.), электромагнитные помехи. Тяжелые условия эксплуатации зачастую заключаются в сочетании различных факторов: повышенной загазованности и запыленности, высокой влажности, резких перепадов температур, механических воздействий и др. Оценена степень влияния каждого влияющего фактора на результат измерения и оценена суммарная погрешность от одновременного воздействия всех влияющих факторов. Проведенный анализ принципа действия весоизмерительных устройств позволил перейти к оценке факторов, влияющих на надежность их функционирования и точность взвешивания. Рассмотрены существующие и предложены способы повышения точности проведения взвешивания, позволяющие уменьшить погрешность, путем уменьшения степени воздействия факторов, влияющих на точность проведения взвешивания. Приведены примеры разработанных и серийно выпускаемых весоизмерительных устройств, в которых применяются предложенные методы.

Виконано огляд сучасних ваговимірювальних пристроїв, який показав, що в промисловості найбільшого поширення набули ваговимірювальні пристрої прямого перетворення, які здійснюють перетворення ваги в фізичну величину (кутове переміщення, лінійне переміщення, деформація, частота то ін.), зручну для кодирования та кодирования. Як вимірювальні перетворювачі застосовують резистатні, емкисні, індуктивні, п'єзоелектричні, а також тензорезистивні перетворювачі, які отримали найбільшого поширення. Проведений аналіз принципу



Г. А. Черепашук



Е. Е. Калашников



А. П. Потыльчак



дві ваговимірювальних пристроїв дозволяв перейти до оцінки факторів, що впливають на надійність їх функціонування і точність заважування. Визначено чинники, що спричиняють виникнення додаткових та динамічних похибок ваговимірювальних пристроїв: кліматичні чинники (температура та вологість навколишнього середовища), механічні впливи на ваговимірювальний пристрій (перевантаження, вібрація, бокові удари, розгойдування вантажу, істотні динамічні навантаження, низькочастотні динамічні завади й ін.), електромагнітні завади. Важкі умови експлуатації часто поєднують у поєднанні різних факторів: підвищеної загазованості та запиленості, високої вологості, різких перепадів температур, механічних впливів та ін. Оцінено ступінь впливу кожного чинника на результат вимірювання та оцінено сумарна похибка від одночасного впливу всіх факторів, що впливають. Розглянуто наявні та запропоновані способи підвищення точності проведення заважування, що дозволяють зменшити похибку, шляхом зменшення ступеня впливу факторів, що впливають на точність проведення заважування. Наведено приклади розроблених та серійно виготовлюваних ваговимірювальних пристроїв, у яких застосовуються запропоновані методи.

**Ключевые слова:** взвешивание, весы, погрешность, влияющие факторы.

**Ключові слова:** заважування, ваги, похибка, впливні фактори.

**Keywords:** weighing, scales, error, influencing factors.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье рассмотрены задачи взвешивания различных грузов с помощью весоизмерительных устройств на основе тензометрических преобразователей в условиях эксплуатации, отличных от нормальных. Предложены варианты весоизмерительных устройств, которые позволяют проводить взвешивание грузов в тяжелых условиях эксплуатации (повышенная температура, влажность, вибрация, электромагнитные поля и др.).

## 2. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одной из наиболее важных задач весоизмерительных устройств является обеспечение взвешивания груза с погрешностью, не превышающей допустимую погрешность в эксплуатации. Это становится возможным лишь за счет уменьшения влияния факторов, воздействующих на процесс взвешивания. Таким образом, актуальным представляется проведение исследования воздействующих факторов, влияющих на процесс взвешивания. Кроме того, существуют области использования весоизмерительных устройств, в частности, химическая промышленность, в которых предъявляются повышенные требования к их взрывобезопасности.

Цель исследования — уменьшение погрешностей взвешивания грузов различными весоизмерительными устройствами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

A review of modern weight measuring devices has been carried out, which showed that weight measuring devices of direct transformation, which convert weight into physical value (angular displacement, linear displacement, deformation, frequency, etc.) convenient for quantization and coding, have become most common in the industry. The measuring transducers used are rheostatic, capacitive, inductive, piezoelectric and strain-resistance converters, which are most common. The factors that cause additional and dynamic errors of the weight measuring devices are determined: climatic factors (temperature and humidity), mechanical effects on the weight measuring device (overload, vibration, side impacts, load swinging, significant dynamic loads, low-frequency dynamic noise, etc.) electromagnetic interference. Severe operating conditions often consist of a combination of various factors: increased gas contamination and dustiness, high humidity, sudden changes in temperature, mechanical stress, etc. The degree of influence of each influencing factor on the measurement result is estimated and the total error from simultaneous influence of all influencing factors is estimated. The analysis of the principle of operation of weight measuring devices allowed moving to the assessment of factors affecting their reliability and accuracy of weighing. Methods of increasing accuracy of weighing are considered and proposed to reduce error by reducing degree of influence of factors affecting accuracy of weighing. Examples of developed and commercially available weight measuring devices in which the proposed methods are used are given.

1. Определить факторы, влияющие на точность проведения взвешивания грузов различными весоизмерительными устройствами.

2. Оценить погрешность взвешивания грузов весоизмерительными устройствами в зависимости от различных влияющих факторов.

3. Найти способы повышения точности взвешивания грузов различными весоизмерительными устройствами, позволяющие минимизировать погрешность.

## 3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время измерение и контроль весовых величин получило широкое распространение во многих производственных процессах различных отраслей промышленности для учета и контроля сырья или готовой продукции. При этом существует многообразие цифровых весоизмерительных устройств, предназначенных для механизации и автоматизации технологических процессов.

В промышленности наибольшее распространение получили весоизмерительные устройства прямого преобразования, которые осуществляют преобразование веса в физическую величину (угловое перемещение, линейное перемещение, деформацию, частоту и др.), удобную для квантования и кодирования. В качестве измерительных преобразователей применяют реостатные, емкостные, индуктивные, пьезоэлектрические, а также тензорезистивные преобразователи, получившие наибольшее распространение.



Проведений аналіз принципу дійства весоизмерительных устройств позволяет перейти к оценке факторов, влияющих на надежность их функционирования и точность взвешивания.

Наибольшее значение относительной погрешности весоизмерительного устройства в реальных условиях эксплуатации может быть определено по формуле:

$$\delta_{\text{СПТ}} = \delta_{\text{оп}} + \sum_{j=1}^n \delta_{\text{д(в)н}} + \delta_{\text{д(в)н.т}}$$

где  $\delta_{\text{оп}}$  — предел допускаемой основной погрешности;

$\sum_{j=1}^n \delta_{\text{д(в)н}}$  — сумма наибольших дополнительных погрешностей, вызванных действием влияющих факторов;

$\delta_{\text{д(в)н.т}}$  — наибольшая динамическая погрешность.

Среди факторов, являющихся причиной возникновения дополнительных и динамических погрешностей весоизмерительных устройств, можно выделить:

- климатические факторы (температура и влажность окружающей среды);
- механические воздействия на весоизмерительное устройство (перегрузка, вибрация, боковые удары, раскачивание груза, существенные динамические нагрузки, низкочастотные динамические помехи и др.);
- электромагнитные помехи.

Кроме того, существует ряд факторов, не приводящих к возникновению дополнительной погрешности, но способных стать причиной выхода весоизмерительного устройства из строя или возникновения опасности для обслуживающего персонала:

- состав окружающей среды (пыль, взрывоопасные газы, водяной пар, агрессивные вещества и др.);
- предусмотренная требованиями технологического процесса очистка оборудования напором воды;
- тяжелые условия эксплуатации, которые зачастую заключаются в сочетании различных факторов: повышенной загазованности и запыленности, высокой влажности, резких перепадов температур, механических воздействий и др.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ

Для решения проблемы снижения влияния перечисленных выше факторов на результат взвешивания существует два подхода. Первый подход заключается в предотвращении возникновения по-

грешностей, вызванных воздействием внешних факторов. На нём базируются также методы повышения точности, как конструктивно-технологические и защитно-предохранительные.

Конструктивно-технологические методы повышения точности предполагают создание измерительных устройств из точных элементов, в связи с чем требуют затрат большого количества квалифицированного труда и других дорогостоящих ресурсов, поэтому их возможности ограничены [1, 2].

Защитно-предохранительные методы заключаются в уменьшении диапазона изменения влияющих факторов в локализованном пространстве (термостатирование, экранирование, стабилизация, демпфирование и т. д.) [3].

Второй подход к повышению точности весоизмерительных устройств заключается во введении структурной, временной или структурно-временной избыточности, позволяющей осуществлять дополнительные преобразования измерительной информации. Методы повышения точности, базирующиеся на этом подходе, реализуются на основе принципа инвариантности [4] и называются структурными или структурно-алгоритмическими [5].

Далее будут детально рассмотрены основные факторы, влияющие на погрешность весоизмерительных устройств, а также существующие и предложенные авторами методы уменьшения степени влияния воздействующих факторов.

#### 5. ДЕТАЛЬНЫЙ ОБЗОР ФАКТОРОВ И МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ

##### Изменение температуры окружающей среды.

Температура окружающей среды оказывает влияние как на параметры мостовой схемы, так и на упругие свойства чувствительного элемента. Наиболее популярными способами снижения этого влияния являются схемная компенсация и введение поправки. Способ схемной компенсации основан на применении компенсационных тензорезисторов, находящихся в одинаковых температурных условиях с активными. Данный способ позволяет свести к минимуму влияние температуры окружающей среды на параметры мостовой схемы. Способ введения поправки в результат измерения позволяет компенсировать также и влияние температуры на упругие свойства чувствительного элемента. Способ предполагает измерение температуры тензодатчика с помощью дополнительного измерительного канала. По предварительно определенной зависимости температурной погрешности от значения выходного сигнала канала измерения температуры вводится поправка



в измеренное значение. Применение в современных весоизмерительных устройствах микроконтроллеров позволяет автоматизировать процесс введения поправки и реализовать достаточно сложные алгоритмы компенсации температурной погрешности.

Использование данного способа дает хорошие результаты в случае медленного изменения температуры окружающей среды. При быстром изменении температуры окружающей среды во времени, например, при взвешивании с помощью бункерной весоизмерительной системы высокотемпературных жидкостей в химической промышленности, при работе крановых весов в литейном цехе и т. д., возникает динамическая составляющая температурной погрешности, обусловленная неравенством тепловой инерционности тензодатчика и датчика температуры. Тепловая инерционность датчика температуры обусловлена невозможностью мгновенного изменения теплового состояния датчика и является причиной динамической погрешности измерения температуры. Тензодатчик, как правило, имеет тепловую инерционность в несколько раз большую, чем датчик температуры. Это приводит к тому, что значение температуры, измеренное датчиком температуры, в случае быстрого изменения во времени температуры окружающей среды не будет соответствовать температуре тензодатчика. Таким образом, температурная компенсация в этом случае будет работать некорректно. Экспериментальные исследования показали, что в результате скачкообразного изменения температуры окружающей среды на 40 °С, максимальное значение относительной погрешности, вызванной некорректной работой температурной компенсации, достигает 2,4 %.

Авторами предложен способ компенсации данной погрешности, подробно описанный в [6—9]. Способ основан на расчете установившихся значений температуры окружающей среды и измеряемой величины с использованием предварительно определенных показателей тепловой инерционности датчика температуры и тензодатчика. При относительных погрешностях определения показателей тепловой инерционности, равных 5 %, максимальное значение остаточной температурной погрешности для случая скачкообразного изменения температуры окружающей среды на 40 °С, составляет 0,13 %.

**Повышенная влажность окружающей среды** приводит к изменению таких электрических параметров измерительных преобразователей как емкость, проводимость и др. [10]. При этом сочетание повышенной влажности с пылью может привести

к снижению эффективности работы и даже к выходу из строя весоизмерительных устройств:

- уменьшается поверхностное сопротивление печатной платы, приводящее к ухудшению электрических характеристик ее элементов;
- возможно деламинирование и деформация печатных плат;
- возникают деформация и уменьшение прочности волокнистых материалов;
- возможно возникновение электролитической коррозии из-за влаги с примесями, образующими электролит;
- ухудшается электрический контакт в разъемах и возрастает электрическое сопротивление из-за коррозии.

Кроме того, пониженная влажность окружающей среды также может привести к выходу весоизмерительных устройств из строя: при уменьшении влагосодержания гигроскопичные материалы деформируются.

Традиционно для защиты весоизмерительных устройств от повышенной влажности окружающей среды используются конструктивно-технологические методы, которые позволяют достичь требуемого класса пыле- и влагозащиты по международной системе обозначений *IP*.

**Электромагнитные помехи.** Весоизмерительные устройства зачастую функционируют на производствах, где много источников электромагнитных помех. Источниками электромагнитных помех являются: линии электропередач, трансформаторные подстанции, технологические установки, оборудование с СВЧ-излучением или магнитными полями и др.

Электромагнитные помехи вызывают нарушения в работе электронных компонентов, микросхем, каналах передачи информации и тензометрических преобразователей, проявляющиеся в виде плавающего уровня выходного сигнала и др. К основным возможным результатам влияния на весоизмерительную технику электромагнитных помех можно отнести:

- ▶ искажение сигналов во внешних цепях/каналах связи;
- ▶ попадание помех на входы питания элементов весоизмерительной техники;
- ▶ возникновение токов помех по металлическим корпусам весов и экранам кабелей.

Для защиты весоизмерительной техники от электромагнитных помех, как правило, принимаются такие меры, как экранирование, использование развязывающих и фильтрующих конденсаторов, гальвани-



ческая развязка и изоляция, устройства подавления импульсных перенапряжений и др.

**Механические воздействия на весоизмерительное устройство (низкочастотные динамические помехи).** При работе весоизмерительных устройств в динамических условиях возникает задача компенсации влияния низкочастотных динамических помех при измерении постоянных величин. Применение для решения данной задачи существующих методов, в частности цифровой фильтрации, позволяет достичь относительной погрешности измерения 0,5 %. При частоте помехи, меньшей 2 Гц, цифровая фильтрация неэффективна, ввиду большого времени установления показаний.

Одним из наиболее распространенных случаев влияния низкочастотных динамических помех является раскачивание груза при взвешивании с помощью крановых весов. Нестабильность показаний, вызванная раскачиванием груза, приводит к значительному увеличению времени измерения, что снижает эффективность использования весов. Авторами предложен способ компенсации влияния раскачивания груза, основанный на использовании значений трех составляющих инерционного ускорения системы «весы-груз» [11, 12]. Составляющие инерционного ускорения измеряются с помощью установленных в весах микромеханических акселерометров. Выражение для вычисления скорректированного значения массы груза имеет вид:

$$m = m' \frac{g}{a_x k + \sqrt{g^2 - (a_x^2 + a_y^2) k^2}}$$

где  $a_x$ ,  $a_y$  и  $a_z$  — значения составляющих инерционного ускорения по трем осям связанной с весами системы координат;

$k$  — коэффициент, характеризующий геометрическую конфигурацию системы «весы-груз»;

$m'$  — нескорректированный результат измерения массы груза.

Экспериментальные исследования данного способа показали, что он позволяет снизить время установления показаний до  $1,25T$ , где  $T$  — период свободных колебаний системы «весы — груз», что в 1,6 раза меньше, чем при использовании цифровой фильтрации. Также следует отметить целесообразность применения предложенного способа и для других случаев взвешивания при действии низкочастотных динамических помех, например, на борту судна в условиях неспокойного моря.

**Наличие в окружающей атмосфере взрывоопасных газов.** При эксплуатации весоизмерительных устройств на предприятиях химической промышленности к ним могут предъявляться повышенные требования по взрывобезопасности. Для обе-

спечения требуемой взрывобезопасности весоизмерительных устройств традиционно применяют методы взрывозащиты, которые можно условно разделить на четыре группы [13]:

▲ методы, направленные на снижение вероятности возникновения электрической искры;

▲ методы, направленные на изоляцию электрических цепей от взрывоопасных смесей (заливка специальным компаундом, масляное заполнение оболочки, заполнение оболочки кварцевым песком, заполнение или продувка оболочки взрывобезопасным газом под избыточным давлением);

▲ методы, направленные на сдерживание взрыва (взрывозащищенная оболочка);

▲ ограничение мощности искры (искробезопасная цепь).

## 6. ПРИМЕРЫ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В ООО «Инженерное бюро Авиационного института» при участии авторов разработаны и серийно выпускаются весоизмерительные устройства для тяжелых условий эксплуатации, в которых применяются описанные выше методы снижения воздействия внешних факторов.

### Изменение температуры окружающей среды.

Весы тензометрические термозащищенные крановые ВКР-20Т (рис. 1) предназначены для статического взвешивания шихтовых материалов и расплавленного жидкого металла. Их конструктивной особенностью является наличие измерительного блока



Рис. 1. Весы тензометрические термозащищенные крановые ВКР-20Т

Fig. 1. Scales tensometric thermoprotected crane ВКР-20Т



с термозащитным стальным кожухом и термозащитным трёхслойным экраном из стали и базальтового картона. Применение предложенного авторами способа температурной компенсации позволяет работать при быстроизменяющейся температуре окружающего воздуха в диапазоне от  $-20$  до  $+85$  °С.

**Повышенная влажность окружающей среды.** Для исключения некорректной работы весов в тяжелых условиях рекомендуется применять корпуса и уплотнения с высокой пыле- и влагозащищенностью. Так в автомобильных платформенных весах ВАПТ-60, разработанных и серийно выпускаемых ООО «Инженерное бюро Авиационного института», грузоприемное устройство имеет исполнение, защищенное от пыли и дождя. Степень защиты по ГОСТ 15150-69: для весового терминала и блоков искрозащиты — IP-54, для грузоприемного устройства — IP-68.

**Электромагнитные помехи.** В крановых весах ВКР-10, разработанных и серийно выпускаемых ООО «Инженерное бюро Авиационного института», применяются описанные выше средства борьбы с электромагнитными помехами. В частности, использовано экранирование наиболее чувствительных к помехам функциональных узлов и соединительных кабелей, а также увеличение емкости развязывающих и фильтрующих конденсаторов.

Весы ВКР-10 успешно прошли испытания на электромагнитную совместимость (рис. 2):

- соответствуют нормам электромагнитных излучаемых возмущений, установленных в ДСТУ IEC 61000-6-4:2009, ДСТУ CISPR 11:2007 для оборудования класса А, группы 1;

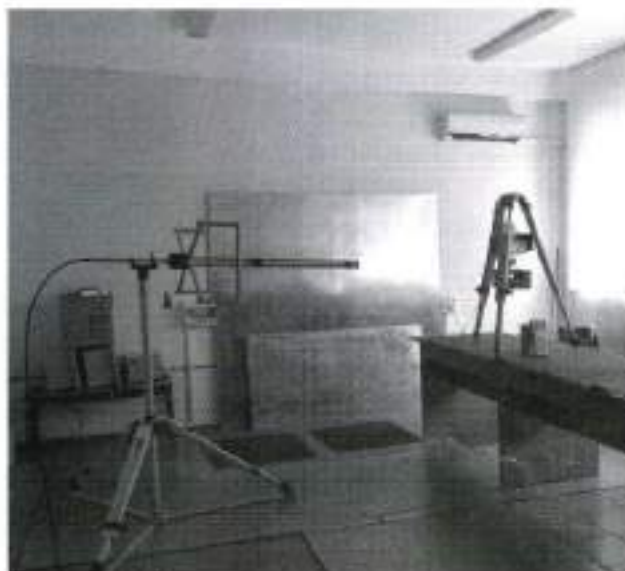


Рис. 2. Испытания крановых весов ВКР-10 на электромагнитную совместимость

Fig. 2. WRC-10 crane balance tests for electromagnetic compatibility

- невосприимчивость к электростатическим разрядам соответствует ДСТУ IEC 61000-6-2:2008, ДСТУ IEC 61000-4-2:2008 на порт корпуса (степень жесткости испытаний 3);

- невосприимчивость к радиочастотным электромагнитным полям излучения соответствует ДСТУ IEC 61000-6-2:2008, ДСТУ IEC 61000-4-3:2007 на порт корпуса;

- невосприимчивость к магнитным полям частоты сети соответствует ДСТУ IEC 61000-6-2:2008, ДСТУ EN 61000-4-8:2012 на порт корпуса (степень жесткости испытаний 4).

**Наличие в окружающей атмосфере взрывоопасных газов.** В ООО «Инженерное бюро Авиационного института» разработаны тензометрические платформенные весы типа ВЭПТ, которые выпускаются в противоударном и взрывобезопасном исполнении. Весы являются взрывозащищенным изделием с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь» по ГОСТ 22782.5-78, что позволяет использовать их для тензометрических измерений на открытом пространстве и в помещениях со взрывоопасными смесями категорий II А, II В, II С по ГОСТ 12.2.020-76. Конструктивно весы состоят из весовой платформы с блоком нормирующего преобразователя (БНП) и дублирующего табло (ДТ), которые находятся во взрывоопасной зоне, а также весового терминала (ВТ) и блока искрозащиты (БИЗ), расположенных в безопасной зоне. БИЗ формирует искробезопасное питание для БНП, ДТ и канала интерфейса RS-485, обеспечивающего передачу цифровой информации с БНП на ВТ и из него обратно на ДТ. Искробезопасные цепи гальванически развязаны с помощью DC-DC преобразователя и транзисторных оптопар. Платы БНП и ДТ покрыты защитным лаком, зоны плат, обеспечивающие искрозащиту, покрыты кремнийорганическим компаундом.

## 7. ВЫВОДЫ

1. Определены факторы, влияющие на точность проведения взвешивания грузов с помощью весоизмерительных устройств: климатические условия, механические воздействия на весоизмерительное устройство, электромагнитные помехи, состав окружающей среды и др.

2. Предложены методы снижения влияния внешних факторов, которые позволяют повысить точность, надежность, быстродействие, а также безопасность весоизмерительных устройств.

3. Приведены примеры разработанных и серийно выпускаемых весоизмерительных устройств, в которых применяются предложенные методы.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. (1978) Тестовые методы повышения точности измерений. Москва (Bromberg E.M., Kulikovskiy K.L. (1978) Test methods to improve measurement accuracy. Moscow). 176 с/р.
2. Земельман М.А. (1972) Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. Москва (Zemelman M.A. (1972) Automatic correction of errors of measuring devices. Moscow). 199 с/р.
3. Орнатский П.П. (1983) Теоретические основы информационно-измерительной техники: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев (Ornatskiy P. P. (1983) Theoretical foundations of information and measuring technology: textbook for universities. The 2nd prod., revised and supplemented. Kiev). 455 с/р.
4. Принцип инвариантности в измерительной технике / Петров В.Н. и др. Москва (The principle of invariance in measuring technique / Petrov V.N. etc. Moscow), 1976. 244 с/р.
5. Кондрашов С.І. (2004) Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах: монографія. Харків (Kondrashov S.I. (2004) Methods for the accuracy of test systems for testing the electric measuring transducers in working conditions: monograph. Kharkiv). 224 с/р.
6. Потыльчак А.П., Черепашук Г.А. Компенсация воздействия на средства измерительной техники изменяющихся внешних влияний // МНТК «Метрологія в електроніці — 2004»: праці конференції. Харків (Potylchak A.P., Cherepashchuk G.A. Compensation of the impact on measuring instruments of changing external influences // ISTC «Metrology in Electronics — 2004»: conference papers. Kharkiv). — 2004. Т. 1. С/Р. 140—142.
7. Потыльчак А.П., Черепашук Г.А. (2006) Компенсация температурной погрешности тензорезисторных СИТ в условиях нестационарных тепловых полей // Український метрологічний журнал (Potylchak A.P., Cherepashchuk G.A. (2006) Compensation of temperature error of strain gauge measuring instruments in the conditions of unsteady thermal fields // Ukrainian metrological journal). — №1. С/Р. 11—16.
8. Пат. № 18203 України на корисну модель, МКВ G01L 5/04 G01B13/00. Спосіб температурної компенсації тензометричних пристроїв / Потыльчак О.П., Черепашук Г.О. № 20040907201; заявл. 1.09.2004; опубл. 15.11.2006. Бюл. № 11. 7 с/р. (Pat. № 18203 Ukrainian model, МКВ G01L 5/04 G01B13/00. Method of temperature compensation of strain gauges / Potylchak O.P., Cherepashchuk G.A. No. 20040907201; stated 1.09.2004; published 15.11.2006, Bul. No. 11. 7 pages).
9. Потыльчак А.П. (2014) Особенности компенсации температурной погрешности тензорезисторных средств измерительной техники при изменении температуры окружающей среды // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка (Potylchak A.P. (2014) Features of compensation of a temperature error of strain gauge measuring instruments at temperature change of the environment // Collection of scientific papers of the Military Institute of Kyiv National University named after T.G. Shevchenko). — № 47. С/Р. 66—70.
10. Взвешивание в специальных условиях [Электронный ресурс] (Weighing under special conditions [Electronic resource]) URL: <https://kilogramus.ru/vzveshivanie-v-specialnykh-usloviyax>
11. Потыльчак А.П., Черепашук Г.А. (2005) Устранение неустойчивости показаний крановых весов, вызванной раскачиванием системы «весы — груз» // Український метрологічний журнал (Potylchak A.P., Cherepashchuk G.A. (2005) Elimination of instability of crane scales readings caused by rocking of «scales-cargo» system // Ukrainian metrological journal). — №2. С/Р. 28—31.
12. Пат. № 18201 України на корисну модель, МКВ G01G 9/00. Пристрій для зважування на кранах у динамічних умовах / Потыльчак О.П., Черепашук Г.О. № 20040604887; заявл. 21.06.2004; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. 6 с/р. (Pat. № 18201 Ukrainian model, МКВ G01G 9/00. Device for weighing on cranes in dynamic conditions / Potylchak O.P., Cherepashchuk G.A. No. 20040604887; stated 21.06.2004; published 15.11.2006, Bul. No. 11. 6 pages)
13. Классификация взрывоопасных зон и маркировка взрывозащищенного оборудования [Электронный ресурс] (Classification of explosive zones and marking of explosion-proof equipment [Electronic resource]) URL: <http://exd.ru/index.php?id=2618>

Отримано / received: 28.05.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І.П. Захаровим (Україна).  
Prof. I.P. Zakharov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020-45-49

УДК 532.135.56.012

# МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕАКТОРА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ З КОЛИВАЛЬНО ІМПУЛЬСНИМ ТРЕНДОМ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ

**Mathematical Models of the Reactor  
of Ammonia Selectra with Oscillatory  
Impulsed Trend of Measuring Parameters**

**К. А. Літвінов**, кандидат технічних наук,  
доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих  
систем управління,  
Східноукраїнський національний університет  
ім. В. Дала, м. Сєвєродонецьк, Україна,  
e-mail: konstantinlitvinovua@gmail.com

**K. A. Litvinov**, candidate of technical sciences,  
docent of the department of computer integrated  
management systems,  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,  
Severodonetsk, Ukraine,  
e-mail: konstantinlitvinovua@gmail.com

У результаті аналізу реальних трендів технологічних параметрів у виробництві аміачної селітри встановлено, що вони є сумою вихідних сигналів багатьох коливальних систем з різною амплітудою та частотою. Коливальні системи розділяються на зовнішні та внутрішні. Зовнішні коливання зумовлені роботою системи регулятор-регульований орган, котрий викликає коливальну зміну матеріального потоку, компресорних установок та іншими. Внутрішні коливання можуть виникати внаслідок коливальної зміни тиску, температури, рівня рідин, кипіння, хімічними реакціями тощо. Як зовнішні, так і внутрішні коливання підсумовуються в технологічному об'єкті управління (ТОУ) та викликають коливальну зміну вихідних координат, котрі постійно вимірюються та реєструються у формі трендів на діаграмі або на екрані монітора реального часу комп'ютерної системи автоматизації. За характером коливань встановлено, що джерела коливань являють собою динамічні консервативні ланки, котрі можуть мати паралельний, послідовний та паралельно-послідовний характер фізичного з'єднання. У цій роботі наведено результати досліджень трендів зміни рівня реакційної маси в реакторі аміачної селітри другого порядку аперіодичної дії з консервативними ланками, з'єднаними паралельно.

As a result of the analysis of real trends of technological parameters in the production of ammonium nitrate it is established that they are the sum output signals of many oscillating systems with different amplitude and frequency. Oscillatory systems are divided into external and internal. External oscillations are caused by the opera-

tion of the system regulator-regulatory body, which causes oscillating change of material flow, compressor units and others. Internal oscillations can occur due to oscillations changes in pressure, temperature, liquid level, boiling, chemical reactions, etc. Also external and internal fluctuations are summed in the technological control object (TCO) and cause an oscillating change in its original coordinates, which include the concentration of the product, the temperature of the conversion process, the level for liquids and the pressure for gases, which are constantly measured and recorded in the form of trends on a diagram or on the screen of a real-time monitor of a computer automation system. By the nature of the oscillations, it is established that the sources of oscillations are dynamic conservative units, which can be parallel, sequential and parallel-sequential in order. This paper presents the results of studies of trends in the level of reaction mass in the reactor of ammonium nitrate second-order aperiodic action with conservative links connected in parallel. It is shown that conservative units when connected in parallel, they behave as independent of the main TCO, do not affect the technological process, and change the output signal of the measuring parameter due to the physical overlay of its signal on the main signals TCO. The structural scheme of TCO with parallel conservative links and its mathematical models with one and two conservative links. It is shown that the shape of the trends of the initial parameter depends on the amplitude, and the oscillation frequency of conservative units. For TCO with oscillating pulsed character of the trend, the actual value of the measuring parameter is determined by the arithmetic mean value of the change of the maximum and minimum amplitude of trend fluctuations.

**Ключові слова:** тренд, параметр, коливання, технологія, аміачна селітра, консервативна ланка, математична модель, вимірювання.

**Keywords:** trend, parameter, oscillation, technology, ammonium nitrate, conservative link, mathematical model, measurement.

**В**ихідні параметри багатьох технологічних об'єктів управління (ТОУ), серед котрих є реактори, кожухотрубні теплообмінники, печі, абсорбери та багато інших підлягають неперервному вимірюванню за допомогою систем автоматичного контролю (САК) та стабілізації за допомогою систем автоматичного регулювання (САР). У сучасних інтелектуальних системах автоматизації задачі опрацювання вимірювальної інформації виконуються за відповідними програмними алгоритмами





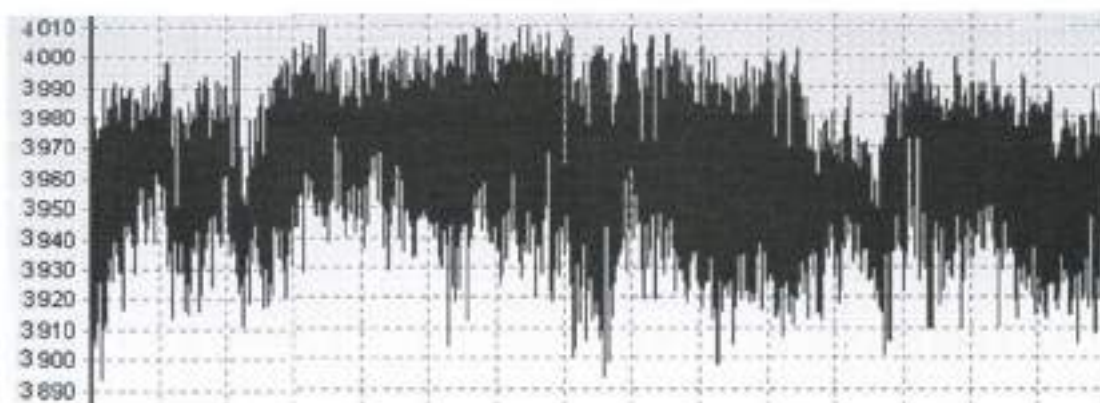


Рис. 1. Вид реального тренду зміни рівня реакційної маси в реакторі нейтралізації НАК ГПА за 8 годин  
 Fig. 1. View of the real trend of changes in the level of the reaction mass in the neutralization reactor NAC GPA for 8 hours

і видають результат такого опрацювання на екран монітора реального часу у виді числового значення, а також трендів. Внаслідок впливу на ТОУ різних зовнішніх і внутрішніх факторів тренди мають коливально імпульсну форму. На рис. 1 показано реальний тренд зміни рівня реакційної маси в реакторі нейтралізації неконцентрованої азотної кислоти (НАК) газоподібним аміаком (ГПА) у виробництві аміачної селітри.

Із аналізу наведеного тренду можна зробити такі висновки. По-перше, тренд складається з коливальних сигналів різної амплітуди та частоти. По-друге, імпульси зі значною амплітудою створюються двома та більше джерелами незагасаючих коливань, амплітуди та частоти котрих складаються. Такий характер тренду може говорити стосовно того, що кожна частота з відповідною амплітудою є неперервною та створюється відповідним джерелом (генератором) коливань. Оскільки ці джерела впливають не тільки на характер тренду вихідного параметра реактора, але й на зміщення середнього його значення від дійсної нормованої величини [1], то можна припустити, що ці джерела відносно до основного апа-

рата (реактора) можуть мати паралельне, послідовне, а також змішане фізичне з'єднання. Як показано в [2], для розглядуваного реактора аміачної селітри характерною є робота САР, які стабілізують технологічний режим роботи. Концентрація розчину аміачної селітри у реакторі регулюється зміною НАК, температура реакції — внаслідок подавання охолодженого конденсату сокової пари, а кількість ГПА, яка подається у реакторі, — САР витрати. У першому наближенні можна вважати, що зміна об'ємних витрат матеріальних потоків здійснюються за коливальним принципом з різними частотами та амплітудами. Для реактора аміачної селітри вихідними параметрами є концентрація  $Q_{sc}$  аміачної селітри у розчині, температура  $T_p$  реакції та рівень  $L_{sc}$  реакційної маси. Оскільки для реактора вихідні параметри є взаємопов'язаними, то кожний із них описується диференціальним рівнянням третього порядку [3], і за різних збурень можуть змінюватися як за аперіодичним, так і за коливальним законами. Припустимо, що технологічний процес у реакторі протікає за аперіодичним законом другого порядку. Приймемо, що САР разом з регулюючим органом і трубопроводами створюють своєрідні джерела незагасаючих коливань, які працюють за законом, близьким до синусоїдального. Структурно такий технологічний процес можна подати у виді динамічних ланок, з'єднаних паралельно, як показано на рис. 2.

На рис. 2 показані: відносні вхідні параметри  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (для  $TOU1, TOU2, \dots, TOUn$  відповідно), відносні вихідні параметри  $y_1, y_2, \dots, y_n$ ; сумарний вихідний сигнал  $y$ , за яким формується відповідний тренд.

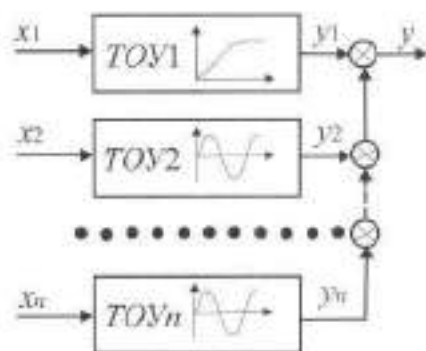


Рис. 2. Структурна схема ТОУ з паралельними джерелами незагасаючих коливань:  $TOU1$  — реактор;  $TOU2$  і  $TOU3$  — джерела коливань

Fig. 2. Block diagram of TOU with parallel sources of undamped oscillations:  $TOU1$  — reactor;  $TOU2$  and  $TOU3$  are sources of oscillations

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕАКТОРА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ**

Матеріальні потоки НАК і ГПА надходять у реактор через барботери, які містяться в реакторі один



над іншим. У результаті зустрічного руху потоків потоки НАК і ГПА перемішуються, створюючи своєрідний коливальний ефект з достатньо високою частотою з однієї сторони. Одночасно починається реакційний процес між НАК і ГПА, який закінчується за час перебування цих речовин у реакторі. У результаті реакції, яка відбувається з великим виділення тепла, реакційна маса нагрівається до температури (155—160) °С, що призводить до кипіння води, яка надходить у реактор разом з НАК. У результаті цього в реакційній масі створюється велика кількість бульбашок водяної пари, яка з шумом (відповідною частотою) виводиться із реактора. Кипіння розчину аміачної селітри, по-перше, сприяє перемішуванню реакційної маси в реакторі, а, по-друге, призводить до коливання поверхні розчину та зміни його рівня за коливальним законом. Такий процес створює внутрішнє джерело коливань з основною та додатковими частотами. Процес перемішування двох матеріальних потоків (рідинного та газоподібного) формально створює внутрішню консервативну динамічну ланку. Оскільки у ТОУ1 має місце процес перенесення маси речовин та їх перетворення внаслідок хімічної реакції, то він може бути описаний таким нелінійним диференціальним рівнянням [4]:

$$F_1 \frac{\partial^2 y_1(x, \theta)}{\partial x^2} + \frac{\partial y_1(x, \theta)}{\partial \theta} = k \left( \tau_{22}^2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \tau_{12} \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \frac{dy_2(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

де  $y_1(x, \theta)$  — відносне значення вхідного параметра, яке розподіляється за просторовою координатою  $x$  та часом перебування  $\theta$ ;  $F_1$  — об'ємна витрата вхідного матеріального потоку;  $k$  — коефіцієнт перетворення;  $y_2(t)$  — відносне значення вихідного параметра, яке змінюється за часом  $t$ ;  $\tau_{12}$  і  $\tau_{22}$  — сталі часу створення аміачної селітри.

Рівняння (1) описує баланс швидкостей вхідних та вихідних потоків, згідно з яким швидкість вхідного потоку (описується лівою частиною цього рівняння) дорівнює швидкості вихідного потоку (описується правою частиною рівняння), і є ядром інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака. Згідно з методом нульового градієнта [5] таке диференціальне рівняння може бути розділене на систему таких взаємопов'язаних простих рівнянь:

$$F_1 \frac{\partial^2 y_1(x, \theta)}{\partial x^2} + \frac{\partial y_1(x, \theta)}{\partial \theta} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \tau_{12} \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \frac{dy_2(t)}{dt} = 0. \quad (3)$$

Просторова координата  $x$  є відстанню від місця введення вхідних потоків у реактор до місця припинення реакції, фактично до місця виходу розчину аміачної селітри із реактора (рівень  $\Gamma$ ). Якщо швидкість розчину аміачної селітри від барботерів до його виходу із реактора  $v_p = x/\theta$ , то  $x = v_p \theta$  або  $\partial \theta = \partial x/v_p$ . Тоді підставивши це рівняння в (2), отримуємо:

$$S_p \frac{\partial^2 y_1(x)}{\partial x^2} + \frac{\partial y_1(x)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

де  $S_p = F_1/v_p$  — поперечний перетин реактора.

Після інтегрування рівняння (4) за нульових початкових умов маємо:

$$S_p \frac{\partial^2 y_1(x)}{\partial x^2} + y_1(x) = k_1 y_{10}, \quad (5)$$

де  $k_1$  — коефіцієнт перетворення;  $y_{10}$  — початкове значення вхідного параметра.

Після інтегрування рівняння (3) за нульових початкових умов маємо:

$$\tau_{22}^2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \tau_{12} \frac{dy_2(t)}{dt} + y_2(t) = k_2 y_{20}, \quad (6)$$

де  $k_2$  — коефіцієнт перетворення;  $y_{20}$  — номінальне значення вихідного параметра.

Оскільки  $x = v_p \theta$ , то  $\partial x^2 = v_p^2 \partial \theta^2$ . Після підстановки цього рівняння у (5) та його інтегрування за нульових початкових умов отримуємо [5]:

$$y_1(\theta) = A \sin(\omega \theta), \quad (7)$$

де  $A = k_1 y_{10}$  — амплітуда коливань;  $\omega = \sqrt{S_p/v_p^2}$  — кругова частота коливань консервативної ланки.

Якщо ТОУ1 є аперіодичною ланкою другого порядку, то відношення сталих часу  $\tau_{12}/\tau_{22} > 2$ . Тоді інтегруючи рівняння (6) за нульових граничних умов, отримуємо:

$$y_2(t) = k_2 y_{20} \left( \frac{1 - \frac{P_2}{P_2 - P_1} \exp(P_1 t)}{P_2 - P_1} + \frac{P_1}{P_2 - P_1} \exp(P_2 t) \right), \quad (8)$$

де  $P_{1,2} = -\frac{\tau_{12}}{2\tau_{22}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{12}}{2\tau_{22}^2}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{22}^2}}$  — корені характеристичного рівняння.

Згідно зі структурною схемою, наведеною на рис. 2, для двох паралельно з'єднаних динамічних ланок вихідний сигнал:

$$y = y_1(\theta) + y_2(t) = A \sin(\omega \theta) + k_2 y_{20} \left( \frac{1 - \frac{P_2}{P_2 - P_1} \exp(P_1 t)}{P_2 - P_1} + \frac{P_1}{P_2 - P_1} \exp(P_2 t) \right). \quad (9)$$



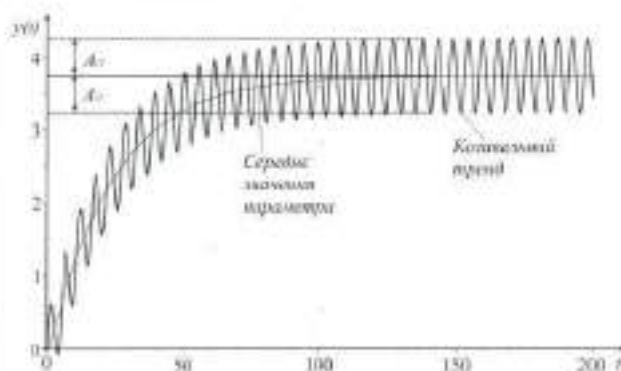


Рис. 3. Тренд вихідного параметра TOU1 з однією консервативною ланкою

Fig. 3. Trend of the output parameter TOU1 with one conservative link

Тоді, приймаючи, що час перебування  $\theta$  дорівнює часу виходу цільового продукту  $t$ , математична модель аперіодичного об'єкта управління з однією паралельною консервативною динамічною ланкою набуває такого виду:

$$y(t) = A \sin(\omega_1 t) + k_2 y_{10} \left( 1 - \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(p_1 t) + \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(p_2 t) \right). \quad (10)$$

Тренд TOU1 з однією паралельною консервативною ланкою наведено на рис. 3. Оскільки на вихідний параметр реактора чинить вплив одна консервативна ланка, то амплітуда коливань та їх частота будуть однаковими протягом тривалого часу  $t$ .

Оскільки в усталеному режимі роботи амплітуди  $A_{11} = A_{12}$ , то розраховане середнє значення вихідного параметра дорівнюватиме нормованому дійсному його значенню. Розглянемо характер тренду вихідного параметра реактора за дії на нього двох паралельних джерел коливань. Припустимо, що перше джерело коливань описується таким рівнянням консервативної динамічної ланки:

$$y_1(\theta) = A_1 \sin(\omega_1 \theta), \quad (11)$$

а друге —

$$y_2(\theta) = A_2 \sin(\omega_2 \theta). \quad (12)$$

де  $A_1, A_2$  — амплітуди першого та другого джерела коливань відповідно;  $\omega_1, \omega_2$  — кутові частоти коливань.

За умови що  $\theta = t$ , математична модель реактора з паралельно з'єднаними двома консервативними ланками має вид:

$$y(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + k_2 y_{10} \left( 1 - \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(p_1 t) + \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(p_2 t) \right). \quad (13)$$

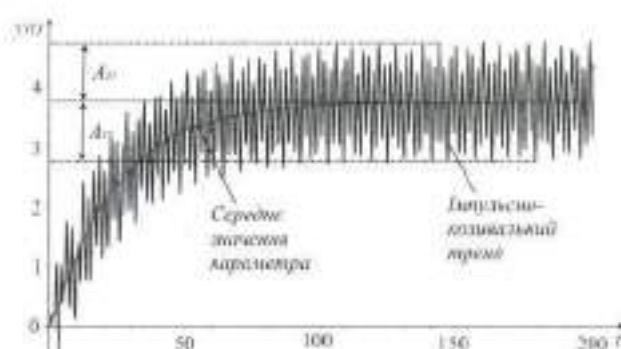


Рис. 4. Тренд вихідного параметра TOU1 з двома паралельними консервативними ланками

Fig. 4. Trend of the output parameter TOU1 with two parallel conservative links

Тренд TOU1 з двома паралельними консервативними ланками подано на рис. 4. Порівнюючи тренди рис. 3 і рис. 4, можна відзначити таке. За збільшення кількості консервативних ланок, з'єднаних паралельно, збільшується амплітуда коливань.

Характер тренду залежить як від зміни амплітуди, так і частоти коливань консервативних ланок, що ускладнює визначення дійсного значення вимірювальних параметрів, особливо, коли ними оцінюються якості вироблюваної продукції або ефективність роботи TOU.

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано структурну схему формування коливально імпульсного тренду вихідного параметра технологічного об'єкта управління, яка полягає в тому, що консервативні динамічні ланки, якими є відповідні джерела коливань, мають паралельне фізичне з'єднання з основним технологічним апаратом, а тренд вимірювального параметра є алгебраїчною сумою вихідних сигналів усіх паралельно з'єднаних динамічних ланок.

2. Наведено математичні моделі технологічного об'єкта управління аперіодичного типу другого порядку з одним та двома паралельними консервативними ланками, вихідні сигнали яких мають різну амплітуду та частоту коливань, і наведено тренди вихідного вимірювального параметра.

3. Показано, що характер тренду вимірювального параметра технологічного об'єкта управління залежить від співвідношення амплітуд і від частот коливань консервативних динамічних ланок.

4. Дійсне значення вимірювального параметра технологічного об'єкта управління з паралельно з'єднаними джерелами незагасаючих коливань дорівнює середньому значенню, визначеному за трендом як половина суми максимального та мінімального розмаху показань тренду.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Володарский Е., Кошева Л., Добролюбова М. (2007) Оценивание качества многопараметрического технологического процесса при коррекции его показателей [Текст] / Е. Володарский, Л. Кошева, М. Добролюбова. Метрологія та прилади (Volodarskiy E., Kosheva L., Dobrolyubova M. (2007) Ocenivanie kachestva mnogo-parametricheskogo tekhnologicheskogo processa pri korektsii ego pokazatelej [Tekst] / E. Volodarskiy, L. Kosheva, M. Dobrolyubova. Metrologiya ta pry'lyady), #5(67). — с/р. 20—24.
2. Стенцель Й.І., Літвінов К.А. (2020) Математичні моделі консервативних об'єктів контролю [Текст] / Й.І. Стенцель, К.А. Літвінов. — Метрологія та прилади (Stencel' J.I., Litvinov K.A. (2020) Matematychni modeli konservatyvny'x obyektiv kontrolyu [Tekst] / J.I. Stencel', K.A. Litvinov. — Metrologiya ta pry'lyady), № 1(81). — С/Р. 30—36.
3. Стенцель Й.І. (1993) Математичне моделювання технологічних об'єктів керування. Навч. посібник [Текст] / Й.І. Стенцель. — К.: ІСДО (Stencel' J.I. (1993) Matematychnе modelyuvannya tekhnologichny'x ob'yektiv keruvannya. Navch. posibnyk [Tekst] / J.I. Stencel'. — К.: ІСДО). — 328 с/р.
4. Стенцель Й.І. (1992) Фотокolorиметричні газоаналізатори: Монографія [Текст] / Й.І. Стенцель. — К.: НМК ВО (Stencel' J.I. (1992) Fotokolory'metrychni gazoanalizatory: Monografiya [Tekst] / J.I. Stencel'. — К.:НМК ВО). — 120 с/р.
5. Стенцель Й.І. (2007) Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів [Текст] / Й.І. Стенцель. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, № 5(111). Ч2. — Луганськ (Stencel' J.I. (2007) Matematychnе modelyuvannya хіміchny'x procesiv na osnovi teorii' reologichny'x perekhodiv [Tekst] / J.I. Stencel'. Visnyk Sхidnoukrayins'kogo nacional'nogo universytetu im. V. Dallya, # 5(111), Ch2. — Lugans'k). — С/Р. 91—97.
6. Теория автоматического управления. Ч1. [Текст] / Под ред. А.А. Воронова. — М.: Высш. шк (Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. CH1. [Tekst] / Pod red. A. A. Voronova. — М.: Vyssh. shk.). 1986. — 367 с/р. [2]

Отримано / received: 29.05.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А.І. Куріном (Україна).  
Prof. A.I. Kurin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

## ПОВІДОМЛЕННЯ

Після опублікування у журналі «Метрологія та прилади» №2 за 2020 рік статті «Розрахунок і оцінка невизначеності викидів забруднювальних речовин у навколишнє середовище», авторами якої є В.У. Ігнаткія, Ю.Л. Забулонов, Ю.М. Туз,

О.В. Фаррахов, за результатами її аналізу були виявлені порушення наукової етики та доброчесності. У зв'язку з цим згідно з нормами Публічної етики, задекларованими журналом, цю опубліковану статтю вилучено із зазначеного випуску журналу.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.50-55

УДК 681.2.08:53.088; УДК 620.179.14

# АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЇ ЗА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННІ ГУБНОЇ ПОМАДИ

**Analysis of Correlation in the Evaluation  
of the Uncertainty of the Results of Temperature  
Measurement in the Process of Manufacturing Lipstick**

**І. В. Григоренко**, кандидат технічних наук,  
професор кафедри інформаційно-вимірювальних  
технологій і систем,

e-mail: grigmaestro@gmail.com

**С. М. Григоренко**, кандидат технічних наук,  
доцент кафедри,

e-mail: sngloba@gmail.com

**М. М. Боженко**, магістр кафедри,

e-mail: fish0849@gmail.com

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
Україна

**I. V. Hryhorenko**, candidate of technical sciences,  
professor of the department of information and  
measurement technologies and systems,

e-mail: grigmaestro@gmail.com

**S. M. Hryhorenko**, candidate of technical sciences,  
associate professor of the department,

e-mail: sngloba@gmail.com

**M. M. Bozhenko**, master of the department,

e-mail: fish0849@gmail.com

National technical university  
«Kharkiv Polytechnic Institute»,  
Ukraine

Розглянуто вирішення науково-практичної задачі визначення кореляції між результатами вимірювання температур, що отримані за допомогою двох датчиків TMP36 та DS18B20, мікроконтролерної плати Arduino Uno, а також програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW. Наведено схеми підключення датчиків до плати Arduino Uno та блок-діаграму повірки датчика температури, що сконструйована за допомогою програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW. Виконано обчислення коефіцієнту кореляції. Зроблено перевірку значимості коефіцієнту кореляції, що обчислений за обмеженою кількістю спостережень. Проведено розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних. Зроблено висновок стосовно того, що ігнорування кореляції в цьому випадку призвело б до збільшення значення сумарної стандартної невизначеності. Розрахунок розширеної невизначеності для корельованих даних надав можливість зробити висновок, що ігнорування кореляції призвело б до невиправданого збільшення розширеної невизначеності.

The paper considers the solution of the scientific and practical problem of determining the correlation between the results of temperature measurements obtained using TMP36 and DS18B20, the Arduino Uno microcontroller board, as well as the software for system design — LabVIEW. The diagrams of connecting the sensors to the Arduino Uno

board and the flowchart of the temperature sensor calibration, designed with the help of system design software — LabVIEW. The correlation coefficient is calculated. A check was made of the significance of the correlation coefficient calculated from a limited number of observations. The calculation of the total standard uncertainty for the correlated data is carried out. It is concluded that ignoring the correlation in this case would lead to an increase in the value of the total standard uncertainty. The calculation of the expanded uncertainty for the correlated data made it possible to conclude that ignoring the correlation would lead to an unjustified increase in the expanded uncertainty.

Correlation analysis made it possible to measure the degree of influence of factor traits on the outcome, to establish a single measure of the closeness of connection and the role of the studied factor in the overall change of the trait. The correlation method allowed to obtain quantitative characteristics of the degree of connection between the two traits, gave a broader idea of the relationship between them. The links between the factors are quite diverse. The meaning of correlation analysis to control the parameters of the technological process of manufacturing lipstick is to determine the quantitative measure of the similarity of different signals.

The process of making lipstick involves a complex algorithm of sequential and parallel actions that must be very clearly regulated and under constant control.



І. В. Григоренко



С. М. Григоренко



М. М. Боженко

**Ключові слова:** невизначеність вимірювань, кореляція, температура, вимірювач, датчик, помилка, губна помада.

**Keywords:** measurement uncertainty, correlation, temperature, meter, sensor, error, lipstick.



## ВСТУП

Кореляційний аналіз дає можливість виміряти ступінь впливу факторних ознак на результати, встановити єдину міру тісноти зв'язку та роль досліджуваного фактора (факторів) у загальній зміні результативної ознаки. Кореляційний метод дозволяє отримати кількісні характеристики ступеня зв'язку між двома і більшим числом ознак, дає більш широке уявлення стосовно зв'язку між ними. Зв'язки між факторами достатньо різноманітні. При цьому одні ознаки виступають у ролі факторів, що діють на інші, зумовлюючи їх зміну, другі — в ролі дії цих факторів. Сенс кореляційного аналізу щодо контролю параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади полягає у визначенні кількісної міри схожості різних сигналів. Взаємна кореляційна функція різних сигналів описує як ступінь подібності форми двох сигналів, так й їх взаємне розташування відносно одного до одного за координатою (незалежної змінної) [1].

Процес виготовлення губної помади включає складний алгоритм послідовних та перебувати дій, які мають бути дуже чітко врегульовані та знаходитись під постійним контролем. Необхідність дослідження пов'язана з тим, що своєчасний контроль параметрів технологічного процесу на кожному етапі дозволяє підвищити якість виготовлення губної помади, своєчасно прогнозувати відмову датчиків та призначати ймовірні інтервали для первинних вимірювальних перетворювачів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ  
ІНФОРМАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Основні етапи виробництва губної помади та обладнання, необхідного для її виробництва, представлено у [2]. У роботі [3] обґрунтовано необхідність створення структурної схеми мікроконтролерного вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади. У роботі [4] розглянуто структурну схему мікроконтролерного вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади, а також зазначено основні його характеристики. У роботі [5] доведено необхідність визначення взаємної кореляції параметрів технологічного процесу під час виготовлення губної помади для того, щоби мати можливість впливати на якість готової продукції. Однак залишається невирішеним питання визначення кореляції за оцінювання невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовлення губної помади.

## ОСНОВНИЙ ТЕКСТ

Кореляція між величинами  $a$  та  $b$ , що належать двом процесам, називається лінійною, якщо обидві функції регресії лінійні. У такому випадку лінії регресії перетворюються у прямі регресії, кутові коефіцієнти яких виражаються через коефіцієнт кореляції. Цей коефіцієнт виступає мірою лінійної залежності між величинами [5].

Позначимо коефіцієнт кореляції через  $k$ . Тоді коефіцієнтом кореляції між двома випадковими величинами  $a$  і  $b$  називається математичне очікування добутку їх нормованих відхилень

$$k = M \left[ \frac{a-c}{\sigma_a} \cdot \frac{b-d}{\sigma_b} \right], \quad (1)$$

де  $c = M[a]$  та  $d = M[b]$  — центри розподілу величин  $a$  та  $b$ ;

$\sigma_a$  та  $\sigma_b$  — дисперсії величин  $a$  і  $b$ .

Коефіцієнт кореляції  $k$  може бути записаний за однією із таких форм:

$$k = \frac{1}{\sigma_a \sigma_b} \cdot M[(a-c) \cdot (b-d)], \quad (2)$$

або

$$k = \frac{M[ab] - M[a]M[b]}{\sigma_a \sigma_b}. \quad (3)$$

Величину  $M[(a-c) \cdot (b-d)]$  називають кореляційним моментом.

Коефіцієнт кореляції  $k$  є безрозмірною величиною, абсолютне значення якої не перевищує одиниці:  $|k| \leq 1$ . Для незалежних величин  $a$  і  $b$  коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, але й для залежних величин коефіцієнт кореляції може бути рівним нулю. У такому випадку величини  $a$  і  $b$  називають некорельованими [5].

Коефіцієнт кореляції  $k$  характеризує міру лінійної залежності між величинами  $a$  і  $b$ . Це означає, якщо  $Aa+B$  є лінійною функцією найкращого середньоквадратичного наближення до величини  $b$ , тобто функцією, для якої математичне очікування  $M[b - (Aa+B)]^2$  досягає найменшого значення, то математичне очікування випадкової величини  $z = b - (Aa+B)$ , що є похибкою наближення, дорівнює нулю. Відношення дисперсії  $\sigma_z^2$  до дисперсії величини  $b$  визначається лише величиною коефіцієнта кореляції за формулою:

$$\frac{\sigma_z^2}{\sigma_b^2} = 1 - k^2. \quad (4)$$

Аналогічно, якщо  $Cb+D$  є лінійною функцією найкращого середньоквадратичного наближення до величини  $a$  і  $f = a - (Cb+D)$ , що є похибкою цього наближення, то



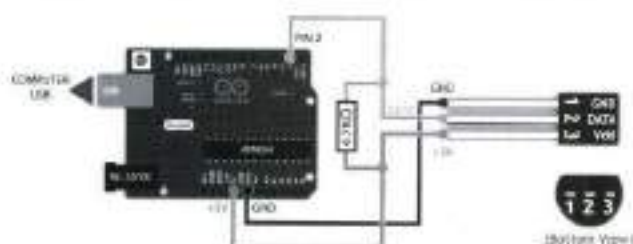


Рис. 1. Типове підключення датчика DS18B20  
Fig. 1. Connect DS18B20 sensors to the Arduino Uno



Рис. 2. Типове підключення датчика TMP36  
Fig. 2. Connect TMP36 sensors to the Arduino Uno

$$\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} = 1 - k^2, \quad (5)$$

Якщо коефіцієнт кореляції  $k$  дорівнює нулю, то немає лінійної кореляції, але це не виключає наявності нелінійної кореляції.

Чим ближче  $|k|$  до одиниці, тим тісніша лінійна залежність між величинами, тобто тим менша середня квадратична похибка визначення кожної з величин за допомогою лінійної функції іншої величини. Рівняння  $|k| = 1$  означає наявність лінійної функціональної залежності між величинами  $x$  і  $b$  (кожному значенню однієї з величин відповідає точно одне значення іншої величини) [6].

Для перевірки якості функціонування датчика температури TMP36 обираємо більш точний за метрологічними характеристиками датчик температури DS18B20. Отримання результатів вимірювання температури виконуємо за допомогою мікроконтролерної плати Arduino Uno [8], а також програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW. Датчики було встановлено на столі в зоні «вистрілювання» олівців губної помади у пенал.

Для використання TMP36 достатньо підключити лівий конектор датчика ( $V_{cc}$ ) до джерела живлення (2,7–5,5 В), а правий — до землі. З середнього конектора знімають аналогове значення напруги, яке прямо пропорційне (лінійна залежність) температурі. Значення аналогової напруги не залежить від джерела живлення.

Схеми типового підключення датчиків DS18B20 та TMP36 до плати Arduino Uno представлено

на рис. 1. та рис. 2 відповідно [8].

Для проведення досліджень було зібрано схему, представлену на рис. 3.

Блок-діаграму повірки датчика температури сконструйовано за допомогою програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW і представлено на рис. 4.

Порівняльний аналіз здійснюється за 30 контрольними точками. Дані, отримані за допомогою датчика температури TMP36, представлено у вигляді діаграми на рис. 5. Дані, отримані від датчика температури DS18B20, представлено на рис. 6.

Похибка досліджуваного пристрою визначається за різницею показань еталонного та досліджуваного приладу (6) із застосуванням статистичного опрацювання результатів. Похибка не повинна перевищувати клас точності термометру за нормативно-технічною документацією (НТД):

$$\delta_i = \frac{t_{\text{ДАТЧ}} - t_{\text{ЕТАЛ}}}{t_{\text{ЕТАЛ}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $t_{\text{ДАТЧ}}$  — температура, отримана за допомогою датчика TMP36;

$t_{\text{ЕТАЛ}}$  — температура, отримана за допомогою еталонного датчика DS18B20.

Результати вимірювань температури наведено у табл. 1. За калібрування датчика було проведено

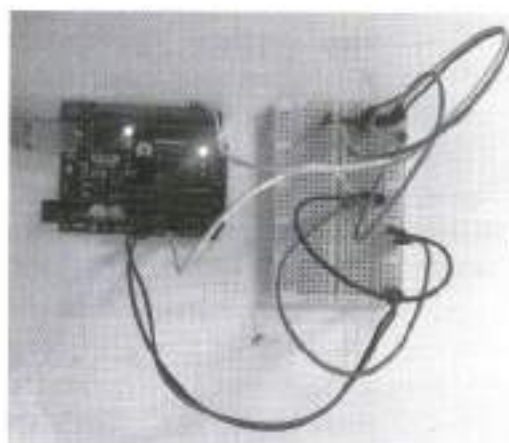


Рис. 3. Схема вимірювального приладу  
Fig. 3. Scheme of the measuring device.

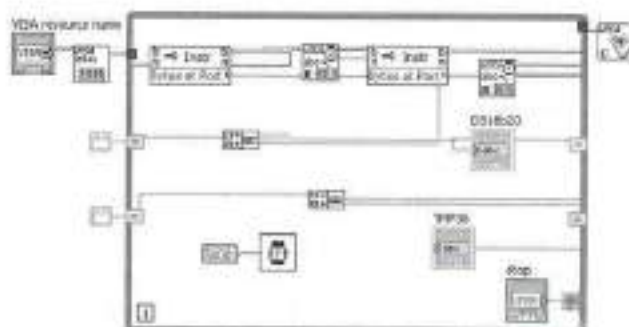


Рис. 4. Блок-діаграма контролю роботи датчиків температури

Fig. 4. Flowchart of temperature sensors control



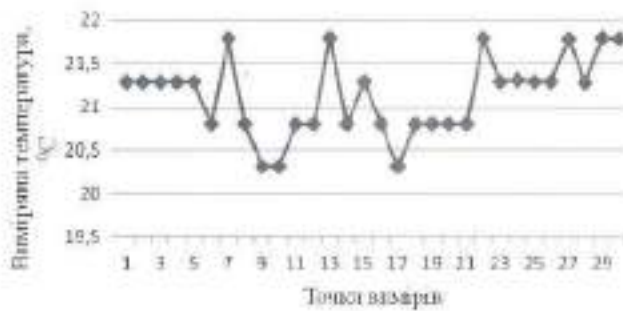


Рис. 5. Результати спостережень за зміною температури столу в зоні «вистрілювання» олівців у пенал за допомогою датчика температури TMP36

Fig. 5. The results of observations of changing the temperature of the table in the area of «shooting» pencils in the pencil case using the temperature sensor TMP36

одночасні дев'ятикратні вимірювання температури еталонним ( $t_{\text{ЕТАЛОН}}$ ) DS18B20 і датчиком температури ( $t_{\text{ДАТЧ}}$ ) TMP36, що калібрується.

Із табл. 1 видно, що максимальна похибка дорівнює 1,52 і не перевищує максимально допустимої похибки датчика TMP36, наведеної в НТД.

Наведені результати вимірювань повинні бути корельовані, оскільки загальним джерелом, що впливає на результати вимірювань температур, є нестабільність температури датчика.

#### ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРЕЛЯЦІЇ

За наявності узгоджених пар вимірювань  $t_{\text{ЕТАЛОН}}$  та  $t_{\text{ДАТЧ}}$ ,  $q = 1, 2, \dots, n$ , коефіцієнт кореляції обчислюється за типом А за формулою [9]:

$$k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} = \frac{\sum_{q=1}^n (t_{\text{ЕТАЛОН}q} - \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})(t_{\text{ДАТЧ}q} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}})}{\sqrt{\sum_{q=1}^n (t_{\text{ЕТАЛОН}q} - \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})^2 \sum_{q=1}^n (t_{\text{ДАТЧ}q} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}})^2}} = (7)$$

$$= \frac{1}{n(n-1)} \frac{\sum_{q=1}^n (t_{\text{ЕТАЛОН}q} - \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})(t_{\text{ДАТЧ}q} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}})}{u_A(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})u_A(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}})}$$

Таблиця 1. Результати вимірювань температури еталонним ( $t_{\text{ЕТАЛОН}}$ ) DS18B20 і датчиком температури ( $t_{\text{ДАТЧ}}$ ) TMP36, що калібрується

Table 1. The results of temperature measurements with the reference ( $t_{\text{ЕТАЛОН}}$ ) DS18B20 and temperature sensor ( $t_{\text{ДАТЧ}}$ ) TMP36, calibrated

$t_i$ , °C	21,1	21,2	21,3	21,4	21,5	21,6	21,7	21,8	21,9
$t_{\text{ЕТАЛОН}}$ DS18B20	21,12	21,19	21,31	21,4	21,5	21,62	21,75	21,81	21,94
$t_{\text{ДАТЧ}}$ TMP36	20,8	21,28	21,29	21,29	21,31	21,31	21,78	21,78	21,8
$\delta$ , %	1,52	-0,43	0,09	0,51	0,88	1,44	-0,14	0,14	0,64

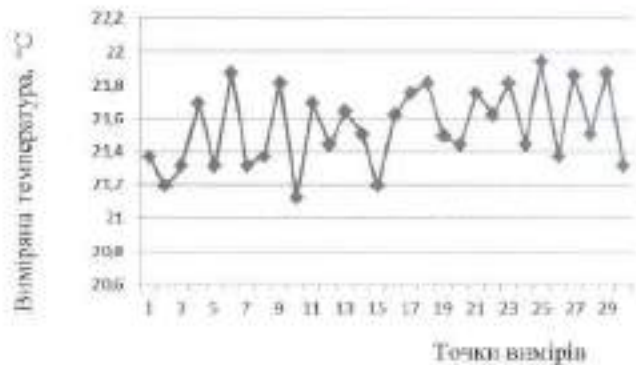


Рис. 6. Результати спостережень за зміною температури столу в зоні «вистрілювання» олівців у пенал за допомогою датчика температури DS18B20

Fig. 6. The results of observations of changing the temperature of the table in the area of «shooting» pencils in the pencil case using the temperature sensor DS18B20

Опрацювання даних табл. 1 дало такі результати:

- середні значення показань:

$$\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}} = 21,515 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\bar{t}_{\text{ДАТЧ}} = 21,404 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- стандартні невизначеності типу А вимірювання температур:

$$u_A(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) = \delta_{\text{ЕТАЛОН}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0,095 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8)$$

$$u_A(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}) = \delta_{\text{ДАТЧ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- коефіцієнт кореляції між результатами вимірювання температур

$$k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} = 0,899.$$

#### ПЕРЕВІРКА ЗНАЧИМОСТІ КОЕФІЦІЄНТА КОРЕЛЯЦІЇ, ОБЧИСЛЕНОГО ЗА ОБМЕЖЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

За обмеженого числа спостережень розраховані значення коефіцієнта кореляції може відрізнятися від нуля навіть тоді, коли кореляція повинна бути відсутня із загально фізичних міркувань [9]. Перевірити значимість коефіцієнта кореляції для



його подальшого обліку (або ігнорування) дозволяє застосування критерію Стьюдента:

$$\frac{|k|}{\sqrt{1-k^2}} \sqrt{n-2} \geq t_p(n-2), \quad (9)$$

де  $t_p(n-2)$  — коефіцієнт Стьюдента для числа ступенів свободи  $(n-2)$ .

За виконання нерівності (9) коефіцієнт кореляції є значимим і повинен враховуватися під час обчислення невизначеності вимірювань.

Оцінимо значимість коефіцієнта кореляції за калібрування датчика температури:

$$\frac{|0,899|}{\sqrt{1-0,899^2}} \sqrt{9-2} > t_{0,95}(7) \\ 5,444 > 2,364.$$

Отже, коефіцієнт кореляції між показаннями двох термометрів є значимим і повинен враховуватися за розрахунку невизначеності вимірювань.

#### РОЗРАХУНОК СУМАРНОЇ СТАНДАРТНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ДЛЯ КОРЕЛЬОВАНИХ ДАНИХ

Якщо у модельному рівнянні  $y = f(t_1, t_2, \dots, t_n)$  присутні дві взідні величини (наприклад,  $t_{\text{ЕТАЛОН}}$ ,  $t_{\text{ДАТЧ}}$ ), результати багаторазових вимірювань яких виконані одночасно і корелюють між собою з коефіцієнтом кореляції  $k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}$ , то вираз для сумарної стандартної невизначеності матиме такий вид [9]

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 u^2(t_i) + 2 \cdot k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \times \\ \times C_{\text{ЕТАЛОН}} \cdot C_{\text{ДАТЧ}} \cdot u(t_{\text{ЕТАЛОН}}) \cdot u(t_{\text{ДАТЧ}})} = \\ = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y) + 2 \cdot k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \times \\ \times u_{\text{ЕТАЛОН}}(y) \cdot u_{\text{ДАТЧ}}(y)} \quad (10)$$

У процесі калібрування термометра оцінюють різницю  $\Delta$  між результатом вимірювання  $t_{\text{ЕТАЛОН}}$  еталонного термометри і значенням  $t_{\text{ДАТЧ}}$  каліброваного термометра в точці калібрування, тим самим визначають систематичну похибку каліброваного приладу  $\Delta = (t_{\text{ЕТАЛОН}} + \Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) - (t_{\text{ДАТЧ}} + \Delta_{\text{ДАТЧ}}) + \Delta_r$ , (11) де  $\Delta_{\text{ДАТЧ}}$  — поправка на калібрування еталонного термометра;

$\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}$  — поправка на похибка відліку показань каліброваного термометра;

$\Delta_r$  — поправка на нерівномірність розподілу температури в термостаті [9].

Оскільки систематичні складові похибки  $\Delta_{\text{ДАТЧ}}$ ,  $\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}$ ,  $\Delta_r$  за умовами експерименту вважаються відсутніми, то вимірне значення дорівнюватиме

$$\Delta = \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}} = 0,111 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Дискретність за шкалою каліброваного термометра становить  $q = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$  (взято із НТД), тому, за припущення рівномірного розподілу всередині діапазону, стандартна невизначеність відліку каліброваного термометра визначатиметься за формулою:

$$u(\Delta_{\text{ДАТЧ}}) = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{3,4641} = 0,0029 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Стандартна невизначеність еталонного термометра обчислюватиметься через розширену невизначеність  $U_S = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$ , яка взята зі сертифіката про калібрування, за формулою:

$$u(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) = \frac{U_S}{k_{\text{кр}}}, \quad (12)$$

де  $U_S$  — розширена невизначеність еталонного термометра;

$k_{\text{кр}}$  — коефіцієнт охоплення;

$$u(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) = \frac{0,005}{2} = 0,0025 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Стандартна невизначеність нерівномірності температури термостата визначається через діапазон нерівномірності температури, взятої з нормативної документації на термостат, за формулою

$$u(\Delta_r) = \frac{\theta}{\sqrt{3}} = \frac{0,004}{\sqrt{3}} = 0,0023 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Сумарна стандартна невизначеність дорівнюватиме:  $u(\Delta) = (u_A^2(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) + u^2(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) + u_A^2(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_r) - 2 \cdot k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \cdot u_A(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) \times u_A(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}))^{0,5} = 0,044 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Отже, ігнорування кореляції в цьому випадку призвело б до збільшення значення сумарної стандартної невизначеності, а саме

$$u(\Delta) = (u_A^2(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) + u^2(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) + u_A^2(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_r))^{0,5} = 0,145 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

#### РОЗРАХУНОК РОЗШИРЕНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ДЛЯ КОРЕЛЬОВАНИХ ДАНИХ

При розрахунку розширеної невизначеності для корельованих даних використовуємо формулу [9]

$$U(\Delta) = k_{\text{кр}} \cdot u(\Delta). \quad (13)$$

Оскільки у сумарній стандартній невизначеності  $u(\Delta)$  є внески невизначеності, розраховані за типом A, то коефіцієнт охоплення  $k_{\text{кр}}$  повинен визначатися як

$$k_{\text{кр}} = t_{0,95}(v_{\text{eff}}), \quad (14)$$

де ефективне число ступенів свободи  $v_{\text{eff}}$  дорівнюватиме

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \frac{u^4(\Delta)}{u_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}^4(\Delta)}, \quad (15)$$

де  $u_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}$  — сумарна стандартна невизначеність типу A загального внеску корельованих взідних



величин, що розраховується у такий спосіб:

$$u_{\text{станд. датч}}(\Delta) = (u_{\text{етажерна}}^2(\Delta) + u_{\text{датч}}^2(\Delta) + 2 \times k_{\text{етажерна датч}} \cdot u_{\text{етажерна}}(\Delta) \cdot u_{\text{датч}}(\Delta))^{0,5} \quad (16)$$

За калібрування термостата для наявних вхідних даних отримуємо сумарну стандартну невизначеність типу A згідно з (16) у такий спосіб:

$$u_{\text{станд. датч}}(\Delta) = 0,048 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ефективне число ступенів свободи згідно з (15) розраховується як

$$v_{\text{eff}} = (9-1) \cdot \left[ \frac{0,044}{0,048} \right]^4 = 5,6,$$

для якого коефіцієнт охоплення  $k_{0,95}$  згідно з (14) визначається [7] як

$$k_{0,95} = t_{0,95}(6) = 2,447.$$

Отже, розширена невизначеність вимірювання згідно з (13) дорівнюватиме

$$U(\Delta) = 0,044 \cdot 2,447 = 0,11 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ігнорування кореляції призвело б до таких оцінок сумарної стандартної невизначеності

$$u_{\text{станд. датч}}(\Delta) = 0,145 \text{ } ^\circ\text{C},$$

ефективного числа ступенів свободи

$$v_{\text{eff}} = (9-1) \cdot \left[ \frac{0,145}{0,145} \right]^4 = 8,$$

для якого

$$k = t_{0,95}(8) = 2,306,$$

і розширеної невизначеності

$$U(\Delta) = 2,306 \cdot 0,145 = 0,334 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Із отриманих результатів стає очевидним, що ігнорування кореляції призвело б до невідровданого збільшення розширеної невизначеності у 3 рази.

## ВИСНОВКИ

У роботі проведено визначення кореляції між результатами вимірювань температури за датчиками, встановленими на столі у зоні «вистрілювання» олівців губної помади у пенал. Експериментальні дані отримано за допомогою мікроконтролерної плати *Arduino Uno*, а також із використанням програмного забезпечення для системного проектування — *LabVIEW*. Виконано обчислення коефіцієнта кореляції. Зроблено перевірку значимості коефіцієнта кореляції, розрахованого за обмеженою кількістю спостережень. Проведено розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних. Доведено, що ігнорування кореляції в цьому випадку привело б до збільшення значення сумарної стандартної невизначеності у 3,3 рази. Розрахунок розширеної невизначеності для корельованих даних засвідчив, що ігнорування кореляції призвело б до невідровданого збільшення розширеної невизначеності у 3 рази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Цифровая обработка сигналов (Tsifrovaya obrabotka signalov) — [www. http:// books.ifmo.ru / file / pdf / 1075.pdf](http://books.ifmo.ru/file/pdf/1075.pdf).
2. Как делают помады и блески для губ (Kak delaiut pomady u blesky dlia hub) — [// http:// www.the-village.ru / village / business / process / 227475-pomady](http://www.the-village.ru/village/business/process/227475-pomady).
3. Григоренко І.В. Блок контролю параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади / І.В. Григоренко, М.М. Боженко // XXVI Міжнар. наук. — практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. — Харків (Hryhorenko I.V. Blok kontroliu parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia hubnoi pomady / I.V. Hryhorenko, M.M. Bozhenko // XXVI Mizhnar. nauk. — prakt. konf.: Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia, tom 2. — Kharkiv), 2018. — С 8.
4. Григоренко І.В. Цифровий вимірвач основних параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади / І.В. Григоренко, М.М. Боженко // II Міжнародна науково-технічна конференція: Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування України. — Харків (Hryhorenko I.V. Tsifrovii vymiruvach osnovnykh parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia hubnoi pomady / I.V. Hryhorenko, M.M. Bozhenko // II Mizhnarodna naukovo-tekhnicna konferentsiia: Aktualni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannia Ukrainy. — Kharkiv), 2018. — С 161, 162.
5. Григоренко І.В. Визначення взаємної кореляції параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади / І.В. Григоренко, М.М. Боженко // XXVII Міжнар. наук. — практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. — Харків (Hryhorenko I.V. Vyznachennia vzajemnoi koreliatsii parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia hubnoi pomady / I.V. Hryhorenko, M.M. Bozhenko // XXVII Mizhnar. nauk. — prakt. konf.: Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia, tom 2. — Kharkiv), 2019. — С 8.
6. Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшиский. — Москва: Наука. ФИЗМАТЛИТ (Rumshyskiy L.Z. Matematycheskaia obrabotka rezul'tatov eksperymenta / L.Z. Rumshyskiy. — Moskva: Nauka. FIZMATLYT), 1971. — 192 с.
7. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірвальної техніки / В.М. Чинков. — Харків: НТУ «ХПІ» (Chynkov V.M. Osnovy metrolii ta vymiruvalnoi tekhniki / V.M. Chynkov. — Kharkiv : NTU «KHP»), 2005. — 524 с.
8. *Arduino Uno* — [// https:// uk.wikipedia.org/wiki/ Arduino\\_Uno](https://uk.wikipedia.org/wiki/Arduino_Uno) //
9. Захаров І.П. Неопределённость измерений для чайников и начальников: учеб. Пособие / И.П. Захаров. — Харьков (Zakharov I.P. Neopredelyonnost' izmerenij dlia chajnikov i nachal'nikov: ucheb. Pособie / I.P. Zakharov. — Kharkiv), 2015 — 52 с. 

Отримано / received: 28.04.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.І. Чумаковим (Україна).  
Prof. V.I. Chumakov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.56-60

УДК 53.089.6:543.271.08

# МЕТОДИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ДАТЧИКІВ ГАЗУ

## Methods of Thermostabilization of Gas Sensors

**В. Р. Козубовський**, доктор технічних наук,  
професор кафедри програмного забезпечення систем,  
e-mail: kozubvr@gmail.com

**І. П. Алякшев**, інженер,  
e-mail: ivanals83@gmail.com

Ужгородський національний університет, Україна

**V. R. Kozubovsky**, doctor of technical sciences,  
professor of the department of systems software,  
e-mail: kozubvr@gmail.com

**I. P. Aljakshev**, engineer,  
e-mail: ivanals83@gmail.com

Uzhhorod national university, Ukraine

Прилади газового аналізу є засобами виміральної техніки, і тому для них дуже важливою є точність. Різні похибки вимірів знижують їх точність. Особливо суттєвою є температурна похибка (похибка від температури на накопичення середовища). Вона, як правило, у багато разів перевищує всі інші. Особливо чутливими до зміни температури є напівпровідникові газочутливі елементи. Тому для термостабілізації цих приладів використовують різні методи термостабілізації газових датчиків. Залежно від принципу дії приладу це можуть бути фотодіоди, адсорбційні чутливі елементи та інші. Наприклад, фоторезистори PbSe: їх вольт/ватна чутливість змінюється приблизно на порядок за зміни температури від 20 до 60 °C. Крім того, що теж важливо, максимум їх спектральної чутливості значно зміщується в довгохвильову область спектра. Із цієї причини точність термостабілізації чутливого шару має бути дуже високою. В адсорбційних приладах внаслідок адсорбції газочутливим шаром аналізованого компонента змінюється його опір. Газочутливий шар підігрівається до певної температури (залежно від вимірюваного газу) за допомогою нагрівника, на якому і нанесений цей шар. Для підтримки стабільної температури газочутливого шару і використовуються, як правило, різні методи термостабілізації. У статті пропонуються різні методи термостабілізації фазочутливих елементів, які значно покращують точність газоаналітичних приладів. Особливо розглядаються методи стабілізації температурних впливів для багатоканального оптичного газоаналізатора і адсорбційного газоаналізатора.

Gas analysis devices are means of measuring equipment and therefore accuracy is very important for them. Various measurement errors reduce their accuracy. Especially significant is the temperature error (error from the ambient temperature). It is usually many times larger than all the others. Semiconductor gas-sensitive elements are especially sensitive to temperature changes. Therefore, for thermal stabilization of these devices use different methods of thermal stabilization of gas sensors. Depending on the principle of operation of the device it can be photoresistors, adsorption sensitive elements and others. For example, PbSe photoresistors — their volt / watt sensitivity changes by about an order of magnitude when the temperature changes from 20 to 60 °C. In addition, which is also important, the maximum of its spectral sensitivity is significantly shifted to the long-wavelength region of the spectrum. For this reason, the accuracy of thermal stabilization of the sensitive layer must be very high. In adsorption devices due to adsorption of the gas-sensitive layer of the analyzed component changes its resistance. The gas-sensitive layer is heated to a certain temperature (depending on the measured gas) by means of a heater on which this layer is put. To maintain a stable temperature of the gas-sensitive layer and usually uses different methods of thermal stabilization. The article proposes various methods of thermal stabilization of phase-sensitive elements, which significantly improve the accuracy of gas analytical instruments. Methods of stabilization of temperature influences for the multichannel optical gas analyzer and the adsorption gas analyzer are considered separately.

**Ключові слова:** датчики газу, термостабілізація, точність, методи, похибки, напівпровідникові газочутливі елементи, газочутливий шар.

**Keywords:** gas sensors, thermal stabilization, accuracy, methods, errors, semiconductor gas elements, gas-sensitive layer.

У приладах газового аналізу дуже часто використовуються напівпровідникова елементна база. Це можуть бути інтерференційні світлофільтри, фотоопри як приймачі оптичних сигналів у ІЧ приладах, напівпровідникові газочутливі



В. Р. Козубовський



І. П. Алякшев



елементи в адсорбційних приладах. Відомо, що ці елементи, їх параметри залежать від температури робочого середовища. Із цієї причини для досягнення хороших метрологічних параметрів приладів здійснюється термостабілізація газовимірювальних блоків (оптичного блоку ІЧ газоаналізатора, вимірювальної мостової схеми в адсорбційних аналізаторах) або самих напівпровідникових елементів.

Вплив температури на елементи газоаналізатора мають різний порядок величини. Тому немає необхідності у термостабілізації всіх елементів, а спочатку треба вивчити функцію впливу температури на ці елементи.

Найбільшого впливу температури на покази газоаналізатора зазнають параметри фотоопорів (у нашому випадку  $PbSe$ ), адсорбційних елементів (наприклад, метал-оксидних), інтерференційних світлофільтрів [1].

1. Розглянемо спочатку випадок ІЧ газоаналізатора, в якому суттєвого впливу температури зазнають терморезистори та інтерференційні світлофільтри.

Зміна спектрального положення максимуму полоси пропускання інтерференційного світлофільтра, його ширини полоси вивчалася у роботі [2]. Було зроблено висновок, що параметри фільтрів стають більш стабільними після їх обробки температурами (100—120) °С. Однак і після термообробки коефіцієнт зміни  $\lambda_{max}$  складає:

$$K = (5 \pm 1,5) \times 10^{-2} \text{град}^{-1}.$$

Окрім того, достаньмо суттєвого впливу зазнає і ширина і пропускання світлофільтра. Однак всі ці впливи незначні, й вони викликають похибку виміру не більшу за (10—15) % у всьому температурному робочому діапазоні. Тому, якщо і потрібен термостабілізація світлофільтрів, то з невеликою точністю, що не представляє проблем.

Що стосується, наприклад, фоторезисторів  $PbSe$ , то їх вольт/ватна чутливість змінюється приблизно на порядок за зміни температури від 20 до 60 °С. Окрім того, що теж важливо, максимум їх спектральної чутливості значно зміщується в довгохвильову область спектра. Із цієї причини точність термостабілізації чутливого шару повинна бути 0,1 °С. Така точність викликає певні труднощі, оскільки датчик температури міститься на деякій відстані від фоточару й існує градієнт температури між ними.

Автором і співробітниками було запропоновано здійснювати термостабілізацію фоторезистора, використовуючи як датчик температури опір його фоточутливого шару [3].

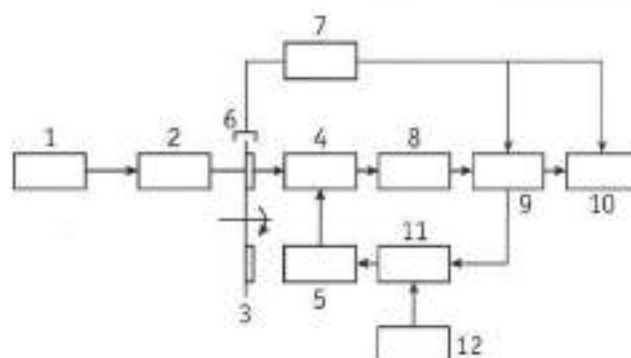


Рис. 1.  
Fig. 1.

Структурну схему газоаналізатора, де використовується така термостабілізація, наведено на рис. 1. Вона складається з джерела випромінювання 1, кювети 2 з аналізованою речовиною, модулятора 3, на якому встановлено світлофільтри робочого і опорного каналів, приймача випромінювання 4 з мікроохолоджувачем, блоку живлення 5, датчика положення модулятора 6, блоку управління 7, підсилювача 8, пристрою вибору і зберігання 9, системи опрацювання інформації 10, диференційного підсилювача 11, джерела опорної напруги 12.

За наявності у світловому потоці інтерференційних світлофільтрів робочих і опорного каналів модулятора 3, а також у моменти темнових пауз, приймачем 4 реєструються певні рівні світлових потоків. Ці сигнали підсилюються у 8 і запам'ятовуються у відповідних каналах пристрою 9. Канали пристрою 9 комутуються блоком 7. Імпульси управління на блок 7 надходять з датчика 6. У такий спосіб у пристрої 9 протягом одного оберту модулятора 3 зберігаються імпульси напруги, що відповідають світловим і темновим паузам періоду модуляції. Ці напруги можуть бути використані у мережі зворотного зв'язку для регулювання температури приймача 4 за допомогою його мікроохолоджувача. Отже температура фоточутливого шару приймача 4 визначається величиною опорної напруги джерела 12 і коефіцієнтом підсилення блоку 8. За постійного їх значення температура приймача 4 залишається стабільною, що виключає вплив на метрологічні параметри газоаналізатора приймача випромінювання внаслідок коливань температури навколишнього середовища.

Необхідно відзначити, що за використання як керуючого сигналу мережі зворотного зв'язку напруги пристрою 9, що відповідає світловій паузі опорного каналу, температура приймача 4 залежатиме від величини світлового потоку опорного каналу. Світловий потік зменшується з часом внаслідок старіння джерела випромінювання 1, забруднення віконців



ковети 2. Тому температура приймача 4 зменшується з часом, підтримуючи постійною величину сигналу опорного каналу. Тобто, у цьому випадку мережа зворотного зв'язку виконує ще одну функцію — регулювання коефіцієнта передавання корисного сигналу. В багатьох схемних рішеннях газоаналізаторів таке регулювання необхідне. Із цієї точки зору як сигнал похибок у мережі зворотного зв'язку регулювання температури можуть застосовуватися також різні комбінації сигналів, що знімаються з різних каналів пристрою 9 вибірки та зберігання. Наприклад, сигнал різниці сигналу опорного каналу і темної паузи, сумарний сигнал опорного і робочого каналів і т.п.

Критики цього варіанту використання мережі регулювання температури приймача випромінювання можуть заперечити, що це призведе до зміни його спектральних характеристик, що суттєво для багатоканальних приладів. Однак, за деградації фоточутливого шару, його спектральні характеристики також змінюються, причому в зворотну сторону порівнянно зі змінами, які спостерігаються за незначного зменшення температури приймача.

## ЕКСПЕРИМЕНТ

Метою експерименту було визначення функції впливу температури на покази газоаналізатора ПЛ1122 за вилученої й вимкненої системи терморегулювання фотоприймального пристрою ФУ0 614-5 (PbSe). Виміри проводилися за періодичного пропускання через газоаналізатор повітряної газової суміші  $C_2H_6$  в азоті концентрацією 0,5% об. Додаткова похибка вимірів визначалася за формулою:

$$\Delta = (C_t - C_{nt}) / C_{nt} \times 100\% \times 10^\circ C / |t - t_n|,$$

де  $C_{nt}$  — покази газоаналізатора за температури  $t_n = (20 \pm 2)^\circ C$ ;  $C_t$  — покази газоаналізатора за підвищених  $(35 \pm 3)^\circ C$  і низьких  $(10 \pm 3)^\circ C$  температур. У досліджуваних 3-х приладах додаткова похибка не перевищувала 4,2%.

У випадку відключення системи термостабілізації фотоприймача, але за його постійного охолодження, покази газоаналізатора виходили за межі шкали протягом (1—2) годин. Тобто зміни показів газоаналізатора за нормальних умов через незначний час склали 100% внаслідок зміни температури фоточутливого шару приймача випромінювання внаслідок прогрівання приладу.

2. Розглянемо тепер термостабілізацію адсорбційного чутливого елемента.

Внаслідок адсорбції газочутливим шаром аналізованого компонента змінюється його опір. Газочутливий шар підігрівається до певної темпе-

ратури (залежно від вимірюваного газу) за допомогою нагрівника, на якому і нанесений цей шар. Для підтримання стабільної температури газочутливого шару використовується, як правило, термокомпенсація нагрівника. Нагрівник і чутливий до температури опір (терморезистор), влючені у мостову схему, яка живиться певною постійною напругою. Внаслідок зміни опору резистора за зміни температури і здійснюється термокомпенсація. Однак характеристику терморезистора важко підібрати, щоб термокомпенсація відбувалася у широкому діапазоні температур.

У роботі [4] запропоновано контроль температури нагрівника здійснювати внаслідок виміру розбалансу резисторного мосту, в який влючений сам нагрівник, а живлення мосту здійснюється широтно-імпульсним сигналом, частота якого змінюється залежно від сигналу, що знімається з моста, й у такий спосіб змінюється потужність (а значить і температура), яка підводиться до нагрівника.

У роботі [5] пропонується вимірювання температури нагрівника здійснювати у період між імпульсами струму підігрівання за допомогою генератора імпульсів вимірювання опору, а значення опору порівнювати з еталонним значенням, записаним у пам'яті мікроконтролера. Залежно від величини сигналу різниці, блок керування задає параметри генератора імпульсів підігрівання, що змінює шпаруватість імпульсів, які надходять до ключа, який керує потужністю, що підводиться до нагрівача.

При цьому, у випадку, коли значення потужності, що підводиться до нагрівача, суттєво більше необхідного за стандартних умов, блок керування зменшує ширину імпульсів генератора імпульсів до нульового значення і видає сигнал тривоги.

При цьому, у випадку, коли опір газочутливого шару стає суттєво меншим від допустимого значення,

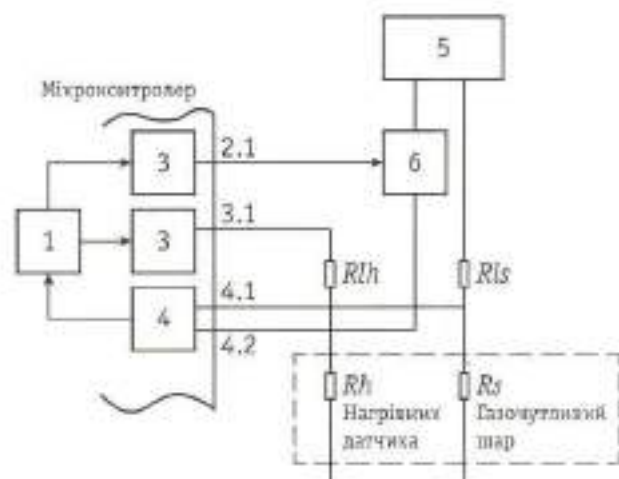


Рис. 2.  
Fig. 2.



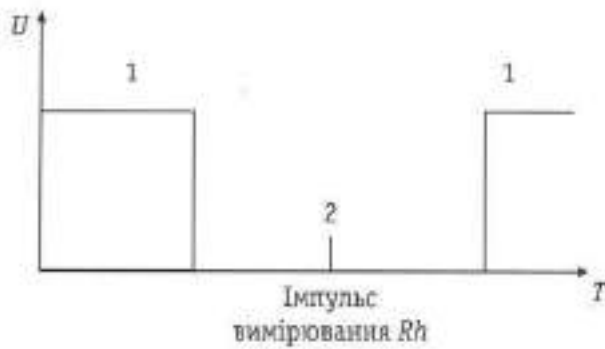


Рис. 3.  
Fig. 3.

блок керування зменшує ширину імпульсів підігрівання генератора імпульсів до нульового значення і видає сигнал тривоги.

Суть пропозиції пояснюється рисунками. На рис. 2 зображено структурну схему пристрою для стабілізації температури нагрівника чутливого шару; на рис. 3 — діаграму напруги на нагрівнику; на рис. 4 — алгоритм виміру опору; на рис. 5 — алгоритм стабілізації та захисту від руйнування датчика внаслідок перегрівання газочутливого шару.

Пристрій для стабілізації температури датчика газу містить мікроконтролер, який включає блок керування (БК) 1, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) 4, перший генератор імпульсів підігрівання зі змінною шпаруватістю (П1) 2, другий генератор імпульсів вимірювання опору (П2) 3, а також ключ (К) 6, виконаний на міросхемі, нагрівник датчика  $R_0$ , вимірювальний опір  $R_s$ , газочутливий шар  $R_g$ , блок живлення (БЖ) 5.

Пристрій працює у такий спосіб. Генератор імпульсів П1 у мікроконтролері генерує сигнал зі шпаруватістю, що задається з блоку БК програмно (вивід 2.1) залежно від необхідної потужності нагрівника. П2 генерує імпульси виміру опору (вивід 3.1), що задається з блоку БК програмно у моменти відсутності імпульсу напруги на виводі 2.1. АЦП реє-



Рис. 4.  
Fig. 4.

струє цифрове значення на виводі 4.1 і порівнює його значення зі значенням, записаним у пам'яті БК. Якщо значення опору менше встановленого, ширина імпульсу на виводі 2.1 збільшується на задану

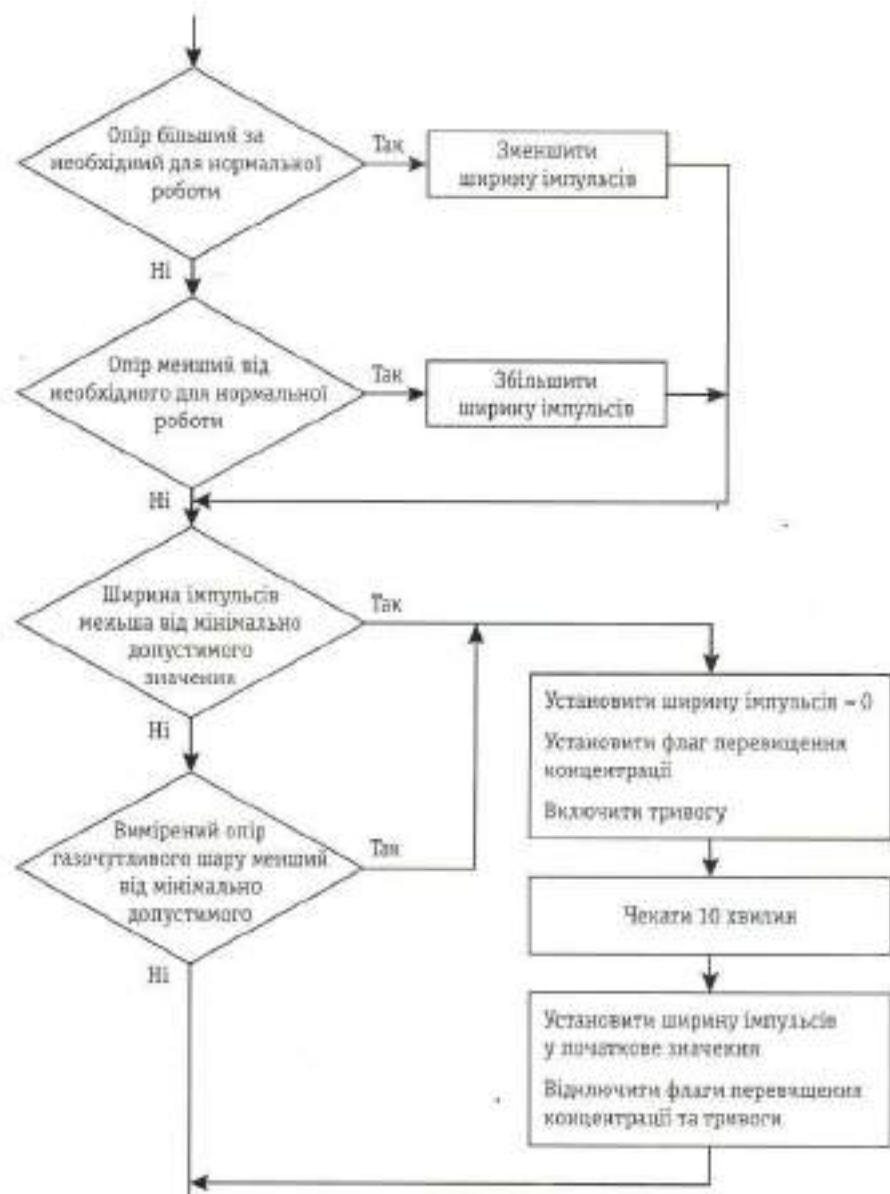


Рис. 5.  
Fig. 5.



величину, якщо менше — зменшується. Відтак підтримується задана стабільна температура нагрівника, а значить і чутливого шару датчика. Падіння напруги на чутливому шарі також реєструється АЦП (сигнал з дільника  $R_{1s}$ ,  $R_s$ ) у моменти, які задаються програмно блоком БК.

На рис. 3 зображено діаграму імпульсної напруги на нагрівнику  $R_A$ . Як бачимо, ПІ2 мікроконтролера генерує імпульси виміру у проміжку відсутності напруги 1 на виводі 2.1.

На рис. 4 представлено алгоритм виміру температури нагрівника. У процесі опрацювання сигналу виміру встановлюється 1 на виводі 3.1, потім встановлюється період очікування в декілька мс для стабілізації напруги. Далі проводиться вимір напруги на виводі 4.2, значення якої пропорційне опорі нагрівника, встановлюється вихідний високоомний стан — 0 на виводі 3.1.

На рис.5 представлено алгоритм стабілізації температури датчика та його захисту від перегрівання. В основному циклі програми проводиться порівняння опору, що вимірюється, з необхідним значенням для нормальної роботи, корекція значення ширини імпульсу на виводі 2.1 — за необхідності. У випадку, коли необхідне значення потужності, що підводиться до нагрівника, суттєво менше від звичайного, відключається нагрівник (ширина імпульсів підігрівання зменшується до нульового рівня) та видається сигнал три-

воги — перегрівання датчика. Така ситуація можлива або у випадку надто високої температури навколишнього середовища, виходу з ладу стабілізованого джерела живлення (блоку БЖ), або за термодаталітичної реакції аналізованого газу на каталізаторі чутливого шару за значного підвищення його концентрації. Оскільки за такого режиму датчик може вийти з ладу, живлення датчика відключається і видається сигнал тривоги. Якщо ситуація нормалізується через 10 хвилин, датчик повертається до нормального режиму роботи. Якщо аварійна ситуація не зникла, через декілька циклів знову спрацьовує захист.

У випадку перегрівання датчика у декілька разів зменшується також опір газочутливого шару. Тому для дублювання функції захисту датчика від перегрівання проводиться контроль величини опору газочутливого шару на виводі 4.1. Якщо величина цього опору стає меншою від допустимого значення, ширина імпульсу підігрівання зменшується до нульового значення і видається сигнал тривоги.

Отже, введення у пролонований спосіб стабілізації температури датчика газу системи термостабілізації нагрівника чутливого шару та його захисту від перегрівання суттєво покращує метрологічні та експлуатаційні параметри датчика газу. Звичайно, залежно від фінансування проекту, вибирається той або інший спосіб стабілізації температури і відповідні сервісні можливості.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. А.Г. Шкаев (2002) Повышение термостабильности оптико-электронных приборов фотометрического и бесконтактного теплового контроля. Диссертация на соискание кандидата технических наук по специальности 05.11.13. — Омск (A.G. Shkaev (2002) Increasing the thermal stability of optoelectronic devices for photometric and non-contact thermal control. The dissertation for the candidate of technical sciences, specialty 05.11.13 — Omsk). С/Р. 155.
2. Roche R., Bertrand L., Felletier E. (1978) Influence of Temperature on the Optical Properties of Narrow-band Interference Filters. // *Optica Acta*. — V. 23, N 6. — P. 433—444.
3. А.с. 1353099 СССР, МКИ G01N 21/61. Однолучевой многоканальный газоанализатор. / В.Р.Козубовский, Т.И.Повхан, Г.Е.Розенбаум — №3969907/24-25; Заявлено 23.10.85; ДСП — 4 с. (A.s. 1353099 USSR, MKI G01N 21/61, Single-beam multi-channel gas analyzer. / V.R. Kozubovsky, T.I. Povhan, G.E. Rosenbaum — №3969907 / 24—25; Claimed 23.10.85; Particleboard — 4 s.).
4. А.С.1405036 СССР МКИ G05D23/24 Устройство для регулирования температуры. 1988. (A.S.1405036 USSR MKI G05D23 / 24 Device for temperature control. 1988).
5. Патент 91652 UA МПК G05D23/19 Спосіб стабілізації температури датчика газу./І.П.Алякшев, В.Р.Козубовский. Опуб. 10.08.2010. Бюл. №15. 2010 р. (Patent 91652 UA IPC G05D23 / 19 A method of stabilizing the temperature of the gas sensor. / I.P. Alyakshiev, V.R. Kozubovsky. Pub. 10.08.2010 Bull. №15. 2010).

Отримано / received: 14.05.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.м.н., проф. В.А. Кельманом (Україна).  
Prof. V.A. Kelman, D. Sc. (Phys-Mat.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.61-66

УДК 621.81:621.253.2

# УЗАГАЛЬНЕНА ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЕТАЛОННИМИ СИГНАЛАМИ ЧАСУ І ЧАСТОТИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЗБРОЙНИХ СИЛАХ УКРАЇНИ: АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ

**Generalized Information Model of System of the Metrological Control and Management of Reference Signals of Time and Frequency Which are Used in Armed Forces of Ukraine: Pressing Questions of Optimization of System**

**В. М. Бойко**, начальник науково-дослідного відділу, Метрологічний центр військових еталонів ЗС України, Харків, Україна, e-mail: vicboy@ukr.net

**V. M. Bojko**, head of scientific-research department, Metrological centre of military standards of Armed Forces of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vicboy@ukr.net

Визначено й обґрунтовано пропозиції щодо оптимізації одного із важливих пріоритетів розвитку військового сегмента служби єдиного часу та еталонних частот України — системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в Збройних Силах України й інших військових формуваннях. Розроблено узагальнену інформаційну модель системи контролю та управління сигналами. Визначено й обґрунтовано інформаційні модулі (бази даних) системи: інформаційний модуль бази вихідних даних оптимізації системи метрологічного контролю; інформаційний модуль автономної системи контролю й управління сигналами часу і частоти (без використання ГНСС); інформаційний модуль системи контролю частотно-часового поля ГНСС; інформаційний модуль технічної, організаційної й нормативної основ системи метрологічного контролю й управління еталонними сигналами. Розроблено і реалізовано спеціалізоване програмне забезпечення функціонування військового еталона часу і частоти Збройних Сил України. Проведено його тестування та впровадження. Формування шкал часу військового еталона Збройних Сил України здійснювалося апаратно-програмними засобами Державного еталона часу і частоти України. Розроблено, обґрунтовано і реалізовано структуру вторинного еталона одиниць часу і частоти. Обґрунтовано і реалізовано передавання еталонних сигналів часу, синхронізацію шкал кінцевих абонентів за протоколами PTP (стандарт IEEE 1588-2008). Для забезпечення коректної роботи протоколу визначено принципи припущення і реалізації. Розроблено пропозиції щодо удосконалення організаційної й нормативної основ системи метрологічного контролю й управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в Збройних Силах України та інших військових формуваннях.

*In article offers on optimization of one of the important priorities of development of a military segment of service of uniform time and reference frequencies of Ukraine — systems of the metrological control and management of reference signals of time and frequency which are used in Armed forces of Ukraine and other military formations are defined and proved.*

*Potential possibilities of the monitoring system and management of transfer of reference signals and rational use of an existing resource that allows improving quality indicators of system of time-and-frequency maintenance at creation of a uniform information field of Armed forces of Ukraine are defined. Features of the moni-*

*toring system and management as object of modeling are defined; model creation is based on the information on real object, in the course of model realization the information on the given object — system of the metrological control and management of reference signals of time and frequency is received.*

*The generalized information model of the monitoring system and management of signals is developed. Information modules (databases) of system are defined and proved; the information module of base of initial data of optimization of system of the metrological control; the information module of the independent monitoring system and management of time and frequency signals (without use of global navigating satellite systems); the information module of the monitoring system of the time-and-frequency field of global navigating satellite systems; information modules of technical, organizational and standard bases of system of the metrological control and management of reference signals.*

*Offers on structure of hardware equipment of a technical basis of system of the metrological control and management of reference signals are proved. Conditions for maintenance of round-the-clock work of system in real conditions are defined.*

*The specialized software of functioning of the military standard of time and frequency of Armed forces of Ukraine is developed and realized. It's testing and introduction is performed. Formation of time scales of the military standard of Armed forces of Ukraine was carried out by hardware-software means of the state standard of time and frequency of Ukraine. The structure of the secondary standard of time units and frequency is developed, proved and realized.*

*Transfer of reference signals of time is proved and realized; synchronization of scales of final subscribers is carried out under PTP reports (standard IEEE 1588-2008). For maintenance of correct work of the report basic assumptions and realizations are defined. Offers on improvement of organizational and standard bases of system of the metrological control and management of reference signals of time and frequency which are used in Armed forces of Ukraine and other military formations are developed.*

*Offers necessarily workings out and definitions of the prime standard document for regulation of the further functioning of the monitoring system and management of transfer of reference signals of time and frequency which are used in Armed forces of Ukraine and other military formations are proved.*



**Ключові слова:** еталонні сигнали часу і частоти, система контролю й управління, апаратно-програмне забезпечення.

**Keywords:** reference signals of time and frequency; monitoring system and management; firmware.



## ВСТУП

Рішення проблем національної безпеки України [1] насамперед пов'язано з оснащенням Збройних Сил (ЗС) України сучасним озброєнням і військовою спеціальною технікою.

За сучасних умов пріоритетним напрямом є створення єдиної автоматизованої системи управління Збройних Сил та інтеграція до неї автоматизованих систем управління всіх видів та спеціальних військ, що потребує переходу до мереж зв'язку нового покоління з побудовою інформаційного простору — побудови сучасної телекомунікаційної мережі, в якій спільно працюють цифрові системи передавання і комутації, важливу роль виконує система мережевої синхронізації, яка дозволяє внаслідок узгодження шкал часу (частоти) опорних генераторів усіх пристроїв мережі уникнути втрати інформації.

За умов оснащення ЗС України новою технікою зростає потреба споживачів у отриманні інформації [2] стосовно еталонного часу, що потребує створення в межах функціонування військового сегмента Служби єдиного часу і еталонних частот [3] єдиної системи метрологічного контролю та управління передаванням еталонних сигналів (СКУПЕС). Складна організація мереж зумовлює необхідність розроблення достатньо потужних автоматизованих підсистем управління. Функціонування автоматизованих систем управління (АСУ) складними організаційно-технічними об'єктами спеціального призначення припускає застосування відомих структурних рішень з керування складними системами [4], телекомунікаційних й інформаційних протоколів, у тому числі й стандартних протоколів забезпечення єдиним часом [5, 6].

Для передавання еталонних сигналів від вихідного еталона ЗС України одиниць часу і частоти до споживачів ЗС України, які забезпечують функціонування складових АСУ різного рівня, рекомендовано найпоширеніший метод доставки сигналів синхронізації галузевих систем синхронізації часу — їх передавання пакетними мережами за допомогою протоколу RTP IEEE 1588v2 [7].

Основними проблемами у процесі вирішення забезпечення контролю та передавання еталонних сигналів від вихідного еталона ЗС України часу і частоти до споживачів є:

- відсутність (прийнятості на озброєння) технічної системи;
- відсутність сучасної системи контролю навігаційно-часового поля глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), апаратури споживачів, які використовуються як зразками і комплекс-

ми озброєння і військової техніки (ОВТ), так і в інших сферах діяльності ЗС України.

Контроль за точністю передавання еталонних сигналів часу і частоти сучасною системою має базуватися на високоточних частотно-часових вимірюваннях з урахуванням специфіки військових потреб як автономних систем передавання та розповсюдження еталонних сигналів, так і закордонних ГНСС на випадок їх збою в роботі.

Це зумовлює надзвичайно актуальним рішення проблем створення розподіленої по території держави системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України із використанням потенціалу регіональних військових метрологічних військових частин.

*Мета статті* — визначення й обґрунтування пропозицій щодо оптимізації системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в Збройних Силах України.

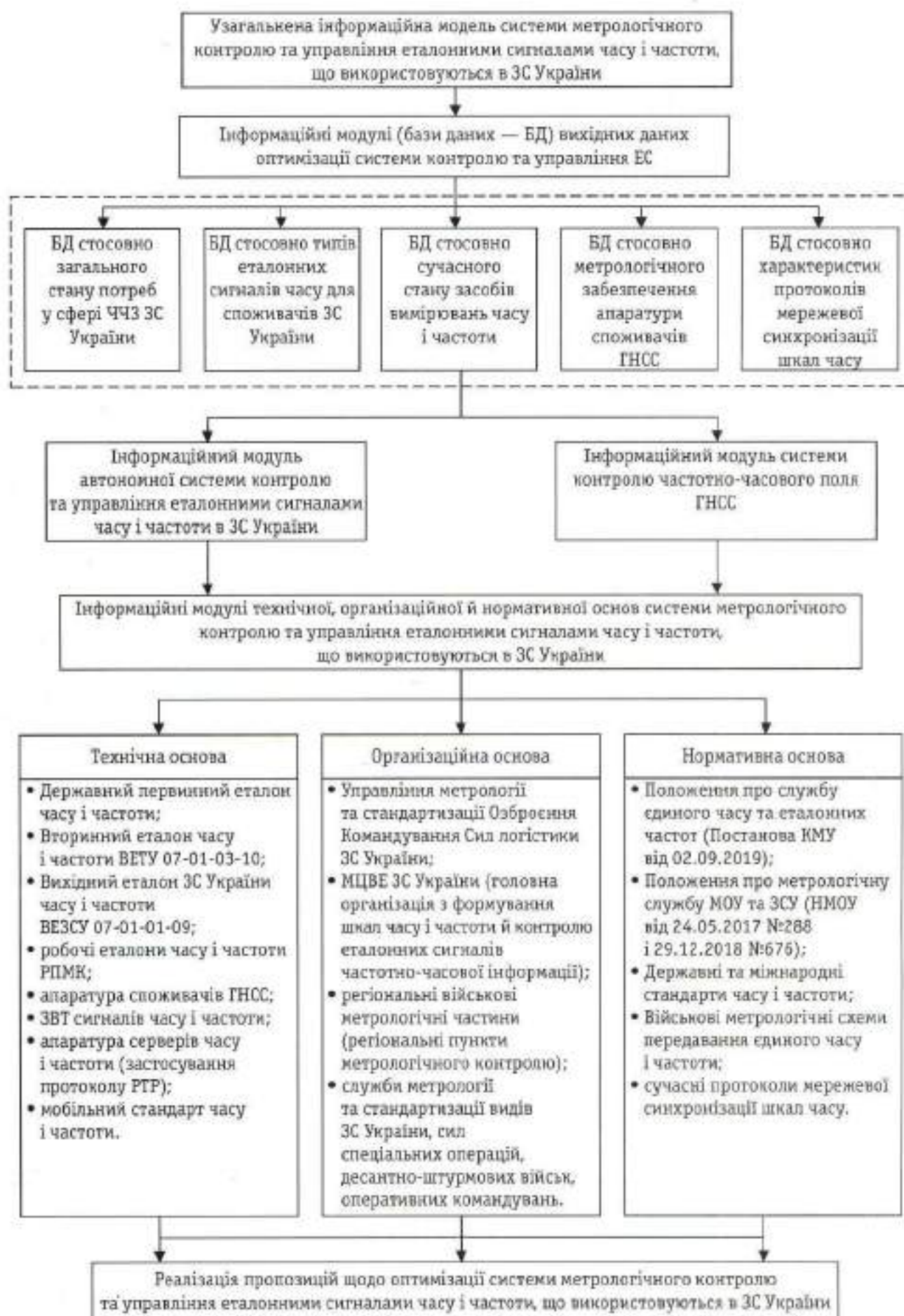
## ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У період сучасного розвитку інформаційних і телекомунікаційних технологій строго виділяються структури, призначені для повного і своєчасного задоволення потреб користувачів різного рівня в санкціонованих інформаційних і телекомунікаційних послугах та забезпечення високого рівня функціонування цих структур за складних умов. Як такі структури обґрунтовано створюються сучасні інфокомунікаційні системи та мережі на базі сучасних технологічних і організаційних рішень [5]. Надзвичайно складна організація мереж зумовлює необхідність розроблення достатньо потужних автоматизованих підсистем управління, які припускають застосування відомих стандартних рішень з керування складними системами телекомунікаційних й інформаційних протоколів [7], у тому числі й стандартних протоколів забезпечення єдиним часом.

Як об'єкт моделювання, в системі метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти в основі моделювання використовуються інформаційні процеси, а саме створення моделі ґрунтується на інформації стосовно реального об'єкта. В процесі реалізації моделі отримуються інформація стосовно певного об'єкта.

З метою використання методології системного підходу до визначення пропозицій щодо оптимізації системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти (СКУЕСЧЧ) розроблено узагальнену інформаційну модель, представлену на рисунку.







В узагальненій інформаційній моделі (бази даних) СКУЕСЧЧ визначені:

- інформаційний модуль (база даних — (БД)) вихідних даних для оптимізації системи;
- інформаційний модуль (БД) СКУЕСЧЧ у ЗС України (без використання закордонних ГНСС);
- інформаційний модуль (БД) системи контролю частотно-часового поля ГНСС (апаратурне оснащення споживачів сигналів);
- інформаційні модулі (БД) технічної, організаційної й методичної основ системи (зміст складових системи).

Інформаційний модуль автономної СКУЕСЧЧ (без використання закордонних ГНСС) повинен містити інформацію стосовно принципових особливостей системи як складної організаційно-технічної системи з підсистемою автоматизованого управління. Функціонування такої системи припускає застосування відомих стандартних рішень з керування складними системами телекомунікаційних та інформаційних протоколів, у тому числі й стандартних протоколів забезпечення єдиного часу з безумовним урахуванням вимог безпеки. Створення спеціальної підсистеми АСУ з передавання еталонних сигналів часу дозволяє забезпечити необхідну точність синхронізації для АСУ (пункти управління АСУ, мережеве обладнання АСУ). Система контролю та управління передаванням еталонних сигналів часу та частоти має базуватися на високоточних частотно-часових вимірюваннях та враховувати специфіку потреб як в автономних системах передавання еталонних сигналів, так і при використанні ГНСС. Це має вирішуватися за рахунок створення розподіленої по території держави системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України із використанням потенціалу як державних метрологічних центрів, так і регіональних метрологічних військових частин [9].

Для визначення і створення спеціальної підсистеми АСУ та оцінки точності системи передавання, контролю та управління передаванням еталонних сигналів від вихідного еталона ЗС України одиниць часу та частоти сумісно з фахівцями Національного наукового центру «Інститут метрології» та Держлідприємства «Укрметртестстандарт» проведені відповідні експериментальні дослідження [8].

Метод доставки сигналів синхронізації галузевих систем синхронізації часу — передавання пакетними мережами за допомогою протоколу RTP IEEE 1588v2. Для реалізації підсистеми АСУ створено виділену оптоволоконну мережу між Метрологічним центром вихідних еталонів (МЦВЕ) ЗС України

і Держлідприємством «Укрметртестстандарт» (маршрут Київ — Харків).

Схема передавання сигналів синхронізації містила: Державний еталон точного часу, RTP сервер часу, транспортну мережу, RTP клієнта. Результати вимірювання відхилення шкал часу вихідного еталона ЗС України відносно державного еталона — значення середньоквадратичного відхилення (СКВ) складало 0,2 мкс.

Отже, створення спеціальної підсистеми АСУ з передавання еталонних сигналів часу дозволяє забезпечити необхідну точність синхронізації для АСУ (оперативна служба, пункти управління АСУ, мережеве обладнання АСУ, інші системи автоматизації).

Інформаційний модуль (база даних) системи контролю частотно-часового поля ГНСС повинен включати комплекс апаратури, який забезпечує вирішення таких завдань:

- отримання розміру одиниць часу і частоти від Національного еталона, збирання та відтворення розміру одиниць часу та частоти, а також передавання їх розміру робочим еталонам регіональних метрологічних військових частин (РМВЧ);
- здійснення в зоні відповідальності РМВЧ безперервного моніторингу сигналів ГНСС з контролем параметрів радіосигналів супутників;
- передавання інформаційних повідомлень за результатами опрацювання у режимі реального часу;
- контроль та управління передаванням еталонних сигналів споживачам по оптоволоконним мережам за RTP протоколом за стандартом IEEE 1588v2 часу із СКВ параметрів часу не більше 10 мкс.

Апаратура повинна працювати в безперервному режимі роботи.

Комплекс апаратури повинен включати: вторинний еталон часу і частоти ВЕТУ 07-01-03-10, стандарти часу і частоти, вимірювальний автоматизований пристрій (підсилювач, компаратор, вимірювач часових інтервалів, комутатор), мобільний стандарт частоти, сервер часу для забезпечення передавання еталонних сигналів для технічних засобів АСУ та зв'язку в ЗС України.

За результатами досліджень інформаційних модулів автономної системи контролю та управління еталонних сигналів часу і частоти та системи контролю частотно-часового поля ГНСС розроблено структурну схему системи передавання еталонних сигналів часу і частоти до споживачів від вторинного еталону одиниць часу і частоти. Система включає: Національний еталон часу і частоти, апаратуру частотно-часової синхронізації ГНСС, вторинний еталон часу і частоти, пристрої синхронізації.



Така розподілена система контролю та управління еталонними сигналами забезпечує моніторинг мережних елементів, що використовують функції джерел синхронізації у цифрових мережах зв'язку ЗС України. Управління функціонуванням шкал часу вторинного еталона здійснюється програмно-апаратними засобами Національного еталона часу і частоти. Сигнали корекції надходять по каналах зв'язку загального користування до вторинного еталона. Пристрої синхронізації сигналів синхронізуються за допомогою апаратного протоколу PTP.

Заключними модулями узагальненої інформаційної моделі (МКУЕСЧЧ) є модулі технічної, організаційної та інформативної основ системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти.

Технічна основа реалізована на використанні сучасної еталонної бази, серверів часу і частоти, засобів виміральної техніки сигналів часу і частоти (рисунок).

Згідно [2], головною організацією у сфері частотно-часового забезпечення ЗС України та інших військових формувань є Метрологічний центр військових еталонів ЗС України. На Центр метрологічного контролю МЦВЕ ЗС України покладено завдання здійснення оперативного контролю еталонних сигналів часу і частоти, забезпечення єдності вимірювань часу і частоти, формування шкал часу і частоти у взаємодії зі структурними підрозділами Служби єдиного часу та еталонних частот.

Для вирішення зазначених завдань необхідно оперативне створення у МЦВЕ ЗС України та РМВЧ штатних структурних підрозділів. Необхідно також забезпечити організацію підготовки підвищення кваліфікації та атестації військових фахівців у сфері частотно-часового забезпечення ЗС України.

За сучасних умов база даних — інформаційний модуль нормативної основи СМКУЕСЧЧ свідчить стосовно того, що існують нормативні документи вищого рівня, які визначають, в основному, завдання, пов'язані зі системою метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в ЗС України [9, 10].

Для контролю виконання завдань потребують розроблення та затвердження документи нижнього рівня, такі як:

► Положення про функціонування СМКУЕСЧЧ у ЗС України;

► Положення про взаємодію МЦВЕ ЗС України та Національного наукового центру «Інститут метрології»;

► Положення про метрологічне забезпечення серверного обладнання системи передавання (приймання) еталонних сигналів у ЗС України.

Реалізація визначених та систематизованих пропозицій щодо оптимізації сучасної СМКУЕСЧЧ дозволяє забезпечити сучасні вимоги до розвитку військового сегмента Служби єдиного часу та еталонних частот.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено узагальнену інформаційну модель системи метрологічного контролю сигналів часу і частоти, що використовуються в ЗС України та інших військових формуваннях.


2. Розроблено і реалізовано модуль автономної і модуль розподіленої системи контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти.

3. Розроблено пропозиції щодо удосконалення технічної, організаційної і нормативної складових системи метрологічного контролю та управління.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Концепція розвитку сектора безпеки і оборони України. Введено в дію Указом Президента України від 14.03.2016 р. №92/2016 (The concept of development of sector of safety and defense of Ukraine. It is installed by the Decree of the President of Ukraine from 14.03.2016 №92/2016).
2. Положення про метрологічну службу Міністерства оборони України та Збройних Сил України. Затверджено Наказом Міністра оборони України від 24.05.2017 р. №288. Зміни до Положення №288. Наказ Міністра оборони України від 29.12.2018 р. №576 (Positions about metrological service of the Ministry of Defense of Ukraine and Armed Forces of Ukraine. It is confirmed by the Order of the Ministry of Defense of Ukraine from 24.05.2017 №288. Changes to Position №288. The order of the Minister of Defense of Ukraine from 29.12.2018 №576).
3. Положення про Службу єдиного часу і еталонних частот. Затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 02.09.2015 р. №604 (Position about Service of uniform time of reference frequencies. It is confirmed by the Decision of the Cabinet of Ukraine from 02.09.2015 №604).
4. Легков К.Е. (2015) Организация процессов управления информационными системами специального назначения / К.Е. Легков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт (Legkov K.E. (2015) Organization of managerial processes by information-communication systems of special designation / K.E. Legkov // T-Comm: Telecommunications and transport).



- systems of a special purpose / K.E. Legkov // T-Comm: Telecommunications and transport) — №2. — С/Р. 20—29.
5. Буренин А.Н. (2018) Организация подсистемы обеспечения единым временем решающих элементов автоматизированной системы управления сложными организационно-техническими объектами специального назначения / А.Н. Буренин, В.Е. Голубев, К.Е. Легков // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт (Burenin A.N. (2018) Organization of a subsystem of maintenance with uniform time of solving elements of the automated control system of difficult organizational-technical objects of a special purpose / A.N. Burenin, V.E. Golubev, K.E. Legkov // T-Comm: Telecommunications and transport) — Том 12. — №2. — С/Р. 27—34.
  6. Федорова Н.В. (2014) Сеть синхронизации и протокол прецизионного времени / Н.В. Федорова // Системы управления, навигации та зв'язку (Fedorova N.V. (2014) Networks of synchronization and the report of precision time / N.V. Fedorova // Control systems, navigation and communication) — Випуск 4(32). — С/Р. 186—189.
  7. Гаврилов А.В. (2019) Проблемы та шляхи вирішення завдань з контролю та управління передаванням еталонних сигналів часу та частоти в Збройних Силах України / Е. Корецький, С. Шевкун, М. Головня, О. Мещеряк, В. Бойко, А. Гаврилов, М. Світенко, М. Троцько // «Метрологія та прилади» (Gavrilov A.V. (2019) Problems and ways of the decision of problems under the control and management of transfer of reference signals of time and frequency in Armed forces of Ukraine / E. Koretsky, S. Shevkun, M. Golovnja, O. Meshcherjak, V. Vojko, A. Gavrilov, M. Svitenco, M. Trotsko // «Metrology and instruments») — №2. — С/Р. 57—62.
  8. Бойко В.М. (2012) Методики удосконалення організаційно-технічної основи забезпечення єдності частотно-часових вимірювань у Збройних Силах України / В.М. Бойко, А.В. Гаврилов, Ю.П. Рондін // «Метрологія та прилади» (Vojko V.M. (2012) Technique of improvement of an organizational-technical basis of maintenance of unity of time-and-frequency measurements in Armed Forces of Ukraine / V.M. Vojko, A.V. Gavrilov, Ju.P. Rondin // «Metrology and instruments») — №42. — С/Р. 5964.
  9. ВМС 07.01-09 Військова метрологічна схема передавання розміру одиниць часу і частоти (VMS 07.01-09 Military metrological scheme of transfer of the size of time units and frequency).
  10. ДСТУ 3215-95 Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення. (DSTU 3215-95 Metrology. Metrological certification of means of measuring techniques. The organization and a carrying out order). 

Отримано / received: 03.06.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.В. Коломіїцевим (Україна).  
Prof. O.V. Kolomyitsev, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.67-72

УДК 616-093

# УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В ЛАБОРАТОРІЇ У РАМКАХ ВИМОГ ДСТУ ISO/IEC 17025:2017

## Laboratory Risk Management Within the Requirements of DSTU ISO/IEC 17025: 2017

**О. А. Никитюк**, доктор сільськогосподарських наук,  
професор, заступник президента,  
Національна академія аграрних наук України,  
м. Київ

**В. М. Новіков**, доктор фізико-математичних наук,  
професор,  
Інститут підвищення кваліфікації фахівців  
у сфері технічного регулювання та споживчої політики  
Одеської державної академії технічного регулювання  
та якості, м. Київ, Україна,  
e-mail: sekretar\_ipk@ukr.net

**O. A. Nykytyuk**, doctor of agricultural sciences,  
professor, deputy president,  
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,  
Kyiv

**V. M. Novikov**, doctor of physical and mathematical  
sciences, professor,  
Institute for Advanced Training of Specialists  
in the Field of Technical Regulation and Consumer  
Policy of the Odessa State Academy  
of Technical Regulation and Quality, Kyiv, Ukraine,  
e-mail: sekretar\_ipk@ukr.net

Робота присвячена вивченню науково доведених методів управління ризиками в лабораторній практиці.

Сьогодні ризик-орієнтований підхід до управління є основою сучасної моделі компетентності лабораторій згідно зі стандартом ДСТУ ISO / IEC 17025: 2017, що зробило необхідним проведення наукових досліджень загальних закономірностей функціонування лабораторій з метою виявлення можливих методів та технологій управління ризиками в лабораторній практиці.

У цій роботі проаналізовано можливість застосування положень міжнародного стандарту ISO 31000: 2018 (який визначає загальні підходи та управління ризиками у будь-якій організації) до лабораторного управління ризиками.

Автори вперше запропонували універсальну модель класифікації можливих ризиків, засновану на окремому аналізі ризиків системи управління, процесів та результатів (тестові звіти).

Також проаналізовано можливість використання таких методів ідентифікації технологічного ризику, як діаграми Ісікави, SWOT-графіки для ідентифікації ризику в лабораторії.

Наведено приклади практичної реалізації діаграми Ісікави для визначення ризиків компетентності та порядку функціонування, а також SWOT-діаграм для виявлення ризиків неупередженості.

Запропонований варіант процедури лабораторного управління ризиками, який складається з етапів ідентифікації, аналізу причин та наслідків, формування планів дій щодо управління ризиками та моніторингу виконання запланованих дій щодо управління ризиками.

The work is dedicated to the study of scientifically proved methods of risk management in laboratory practice.

Today, the risk-oriented approach to management is the basis of the modern model of competence of laboratories according to the standard DSTU ISO / IEC 17025: 2017, which has made it necessary to carry out scientific studies of the general laws of functioning of laboratories in order to identify possible methods and technologies for risk management in laboratory practice.

This paper analyzes the possibility of applying the clauses of international standard ISO 31000: 2018 (which defines common approaches and risk management in any organization) to laboratory risk management.

For the first time, the authors have proposed a universal model for the classification of possible risks, based on a separate analysis of the risks of the management system, processes, and results (test reports).

Possibilities of using such technological risk identification techniques as Ishikawa charts, SWOT charts for risk identification in the laboratory are also analyzed.

Examples of the practical implementation of the Ishikawa diagram to identify competency risks and order of functioning, also SWOT diagrams to identify impartiality risks are given.

A variant of the laboratory risk management procedure is proposed which consists of steps of identification, analysis of causes and consequences, formation of action plans for risk management and monitoring of implementation of planned actions for risk management.



О. А. Никитюк



В. М. Новіков

**Ключові слова:** ідентифікація, управління ризиками, компетентність, неупередженість.  
**Keywords:** identify, risk management, competence, impartiality.



**Р**обота з підготовки асесорів (аудиторів з акредитації) НААУ (Національного агентства України з акредитації) та фахівців лабораторій за вимогами ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 [1], дозволяє визначити основні найбільш проблемні з методичної точки зору напрями вдосконалення лабораторної діяльності.

Одним із таких напрямів є запровадження ризик-орієнтованого підходу в практику роботи випробувальних і калібрувальних лабораторій.

У роботі в узагальненому виді методичних рекомендацій представлені результати досліджень застосування принципів управління ризиками ДСТУ ISO 31000:2018 [2] до лабораторії, яка впроваджує сучасні вимоги до компетентності [1].

Публікація нової версії стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 [1] (далі — Стандарт) зумовила необхідність для лабораторій переглянути наявні досі підходи до управління і зосередити свою увагу на управлінні ризиками, як головному елементу сучасної лабораторної системи менеджменту.

Потрібно зазначити, що і в минулій версії Стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 [3] містилися вимоги щодо необхідності впровадження запобіжних дій, метою яких є зменшення ризиків виникнення невідповідностей, але загальний, всеохоплюючий підхід до лабораторної діяльності з точки зору ідентифікації й подальшого управління ризиками достовірності результату вперше був сформований саме в [1].

У свою чергу постала необхідність вивчення питань, пов'язаних із можливістю застосування загальних настанов з управління ризиками Стандарту ISO 31000:2018 [2] та настанов з проведення ризик-орієнтованого аудиту стандарту ISO 19011:2018 [4] саме в практику роботи лабораторії, що бажають підтримувати свою компетентність на сучасному рівні вимог [1].

Тож метою цієї роботи є розроблення загальних методичних рекомендацій з організації ризик-орієнтованого менеджменту в лабораторіях на основі результатів аналізування положень міжнародних стандартів [1], [2] та [4].

Під ризиком, згідно з [2], треба розуміти вплив невизначеності на досягнення поставленої мети.

Ризик — це вплив невизначеності на реалізацію запланованої діяльності, мету, результат роботи. Скоординовану діяльність для управління ризиками зазвичай називають ризик-менеджментом.

Очевидно невизначеності, які часом впливають на результати і діяльність лабораторій, можуть формуватися як зовні (зовнішнім оточенням, зовнішніми факторами, наприклад, наявністю інфраструктури, підпорядкованістю, ринковою ситуацією, тощо),

так і самою лабораторією (персоналом, обладнанням, режимом роботи тощо).

Ризики можуть бути не тільки негативними (негативно впливати на результат), але й позитивними, такі ризики у стандарті ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 називаються можливостями (можливостями для вдосконалення діяльності чи поліпшення результату).

**Внутрішні та зовнішні фактори, що можуть впливати на ризики, називають внутрішнім та зовнішнім контекстом лабораторії. Ризик завжди можна характеризувати вірогідністю виникнення та тяжкістю наслідків, що в комбінації визначають рівень ризику (кількісно чи якісно).**

Перевищення отриманого рівня ризику над установленим критерієм (прийнятними допустимими значеннями) формує ступінь ризику.

Перш ніж опрацювати ризик (розробити за [1] план дій з управління ризиком), треба провести його оцінку, тобто ідентифікувати (виявити), проаналізувати (причини, наслідки, вірогідність) та визначити ступінь (прийняти рішення щодо необхідності й можливих дій з опрацювання).

Метою ризик-менеджменту є захист цінності (вартості) будь-якої організації (зниження витрат, удосконалення лабораторії).

Однією із принципових вимог, визначених в Стандарті, є вимога до неупередженості діяльності.

Більше того, якщо раніше стандарт визначав виключно вимоги до компетентності, то зараз під час акредитації вимагається доведення компетентності та неупередженості, тобто **неупередженість сьогодні — невід'ємна складова компетентності.**

Фактично неупередженість потрібно розуміти як неможливість будь-якого внутрішнього чи зовнішнього впливу на достовірність результатів (ніхто ніяк не може вплинути на оператора, що формує результат випробування, калібрування).

У частині управління ризиками вимоги стандарту до компетентності й неупередженості різні.

**Якщо стосовно компетентності вимагається «приймати до уваги» ризики і можливості (р. 8.5.1.) [1], то ризики неупередженості лабораторія повинна виявляти «на постійній основі» (р. 4.1.4.), а в процесі визначення таких — демонструвати в який спосіб вони усуваються чи мінімізуються (р. 4.1.5.) [1].**

Отже, якщо ви не виявили хоча би одного із наявних у лабораторії ризиків неупередженості й не зробили необхідних дій з його мінімізації до прийнятного рівня або усунення, то аудитор органу акредитації (наприклад, НААУ) може виписати протокол невідповідності з цього приводу і буде





Рис. 1. Схема функціонування лабораторії з урахуванням виконання вимог [1].

Fig. 1. The scheme of operation of the laboratory, taking into account the requirements [1].

цілком правий. І для підтвердження компетентності вашої лабораторії вам знадобиться усунути всі невідповідності в установлені НААУ терміни.

Якщо ж ви не виявили деяких наявних ризиків компетентності та порядку діяльності лабораторії чи не впровадили дій з їх опрацювання, але виявили, на ваш погляд, на сьогодні суттєві інші ризики компетентності й розробили, як вимагає стандарт, дії з опрацювання, то аудитор НААУ не може виписати протоколу невідповідності з приводу ризиків компетентності. Ви виконали вимоги Стандарту в частині управління ризиками компетентності, а саме, прийняли до уваги ті ризики, які вважаєте за потрібне і на опрацювання яких у вас сьогодні є необхідні ресурси.

Діяльність будь-якої організації, в т.ч. і лабораторії, завжди направлена на досягнення запланованих цілей (результату).

Виходячи із загальних міркувань, діяльність лабораторії, як й іншої організації, можна представити з таких складових, як управління діяльністю, технічне забезпечення діяльності, самих методик випробувань (калібрувань), що функціонуючи, призводять до отримання звіту стосовно випробування (сертифіката калібрувань), як показано на рис. 1.

У Стандарті всі ризики лабораторії умовно класифіковані на дві категорії (ризики неупередженості та ризики компетентності), вимоги до управління якими різні. Виходячи із загальної схеми функціонування лабораторії можна зробити важливий висновок стосовно того, що ризики існують, як за функціонування кожного елемента системи управління, так і кожного процесу і навіть за оформлення звітів (див. рис. 2).

Зображена нами схема класифікації ризиків у лабораторії має всеохоплюючий характер, бо отримана із загальної схеми функціонування лабораторії.

Отже, у найбільш загальному випадку ризики діяльності будь-якої лабораторії можна класифікувати на ризики системи менеджменту, ризики процесів та ризики результату досягнення поставлених організацією цілей.

Для лабораторії, у найбільш загальному випадку, ризики класифікуються як ризики

системи управління, ризики методик випробувань чи калібрувань та ризики правильності звітування.

Оскільки основними елементами системи управління за Стандартом в лабораторіях є неупередженість, конфіденційність та компетентність і саме порядок функціонування (вимоги до СМ прописані в р. 8), то результат класифікації ризиків для лабораторій, що бажає працювати в рамках вимог Стандарту буде таким:

- ризики неупередженості й конфіденційності;
- ризики щодо компетентності (в т.ч. технічних процесів);
- ризики виконання кожної з методик сфери акредитації (тобто процесів виробництва);
- ризики правильності звітування;
- ризики функціонування системи менеджменту.

Наведена нами загальна і повна класифікація можливих ризиків, пов'язаних з лабораторною практикою, дозволяє зрозуміти, що вимоги Стандарту щодо управління ризиками охоплюють виявлені нами ризики тільки частково (вимагається управління ризиками неупередженості та компетентності й порядку функціонування). У Стандарті, що визначає вимоги до компетентності медичних лабораторій [5],



Рис. 2. Загальна схема ідентифікації ризиків у лабораторії

Fig. 2. General scheme of risk identification in the laboratory



підхід до управління ризиками інший. У [5] вимагається встановлювати параметри якості виконання кожної лабораторної процедури (процесу) і відслідковувати у такий спосіб із ідентифікованої нами вище загальної сукупності ще й ризики процесів управління, технічних процесів та методик.

Як бачимо, підхід до управління ризиками у [5] більш повний і, в основному, відповідає визначеній нами класифікації.

В [1] управляти ризиками процесів не вимагається, немає вимог також і щодо управління ризиками методик та ризиками правильності звітування.

Загальні рекомендації до процесу ризик-менеджменту описані в міжнародному стандарті [2].

Послідовність етапів процесу управління ризиками в лабораторії детально проаналізована нами у [6] і в загальному виді складається із кроків:

- визначити і затвердити політику ризик-менеджменту лабораторії, виходячи із вимог [1];
- встановити і погодити цілі ризик-менеджменту;
- встановити відповідальності, повноваження, ресурси для реалізації визначених політик та цілей;
- створити загальну структуру (концепцію) системи ризик-менеджменту;
- описати процес (розробити процедуру, процедури) ризик-менеджменту в лабораторії;
- визначити необхідні інші сучасні документи, щодо впровадження процесу ризик-менеджменту, зокрема і ті, що вимагаються Стандартом (наприклад, план чи програму з опрацювання ризиків та можливостей, індикатори виконання процесів, міроприємств, тощо);
- затвердити розроблену для функціонування системи ризик-менеджменту документацію в рамках документації системи менеджменту лабораторії;

- упровадити документацію, періодично проводити аудити ступеня виконання вимог [1] стосовно управління ризиками;

- періодично вдосконалювати систему ризик-менеджменту в лабораторії.

Хоча Стандартом і не вимагається створення окремої процедури управління ризиками в лабораторії, але практика роботи з лабораторіями вказує на те, що наявність такої процедури надає більші можливості доведення під час акредитації чи нагляду виконання вимог [1] стосовно ризиків; тож ми рекомендуємо розробити процедуру управління ризиками.

До речі, Європейська асоціація з акредитації (EA) також рекомендує для медичних лабораторій «включити в документацію СМ процедуру «Управління ризиками в лабораторії» (див. EA 4/20G:2014 [7]). Пропонуємо варіант основної частини такої процедури, зображений на рис. 3.

Очевидно, що будь-які подальші дії з управління ризиками можливі тільки після ідентифікації (виявлення) ризику, тож крок процесу «ідентифікація ризиків» напевно є найважливішим і таким, що викликає запитання у фахівців стосовно наявності сучасних науково-обґрунтованих технологій ідентифікації ризиків.

У Стандарті [2] рекомендовано складати вичерпний список ризиків (ризик, не включений у список, не буде в подальшому опрацьовуватися, включати в роботу з ідентифікації ризиків максимальної кількості персоналу організації (інформаційне забезпечення вкрай важливе), застосовувати інструментів і техніки ідентифікації.

Але у [2] не вказані самі інструменти і технології ідентифікації.

відповідальний	крок	документація
Вище керівництво (ВК)	Наказ ВК стосовно створення робочої групи з установаження контексту та ідентифікації ризиків	Наказ
Голова робочої групи	Робоча група у встановленні наказом терини ідентифікує ризики	Протокол ідентифікації ризиків
Голова робочої групи	Аналізування ризиків, оцінка ступеня ризиків та визначення ризиків для подальшого опрацювання	Протокол ідентифікації ризиків
Відповідальний за виконання планів дій	Формування «Планів дій» з опрацювання ризиків	План дій з опрацювання ризиків
Вище керівництво	Затвердження «Планів дій»	План дій з опрацювання ризиків
Відповідальний за виконання планів дій	Виконання «Планів дій»	План дій з опрацювання ризиків
Вище керівництво	Моніторинг та оцінка результативності «Планів дій»	План дій з опрацювання ризиків
	Рекомендації до програм аудитів	

Рис. 3. Узагальнений вид основної частини процедури управління ризиками лабораторії

Fig. 3. Generalized view of the main part of the laboratory risk management procedure



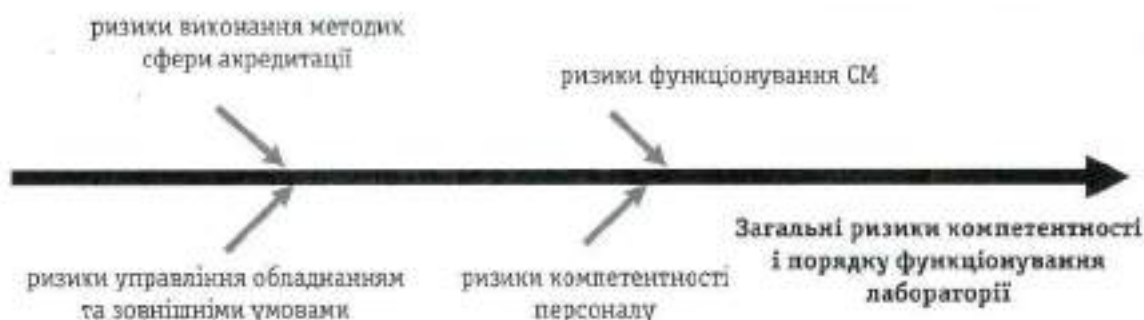


Рис. 4. Варіант діаграми Ісікави для ідентифікації ризиків компетентності та порядку функціонування лабораторії

Fig. 4. A variant of the Isikawa diagram to identify risks of competence and the order of operation of laboratories

Тож ми проаналізували можливі, на наш погляд, підходи для ідентифікації ризиків в організації. За результатами такого аналізування, з урахуванням специфіки лабораторної практики, були сформовані рекомендації саме для лабораторій стосовно вибору технологічних прийомів ідентифікації ризиків.

На наш погляд, можливі такі підходи до ідентифікації ризиків:

- аналізуючи елементи системи менеджменту організації і визначаючи ризики пра-

вильного функціонування кожного елемента;

- аналізуючи процеси в організації й встановлюючи індикатори виконання кожного процесу та ризики дотримання вимог індикаторів процесу;

- аналізуючи кроки «життєвого циклу» виробництва продукту (послуги) і ризики за кожним кроком життєвого циклу;

- хаотичний підхід чи метод «мозкового штурму»;

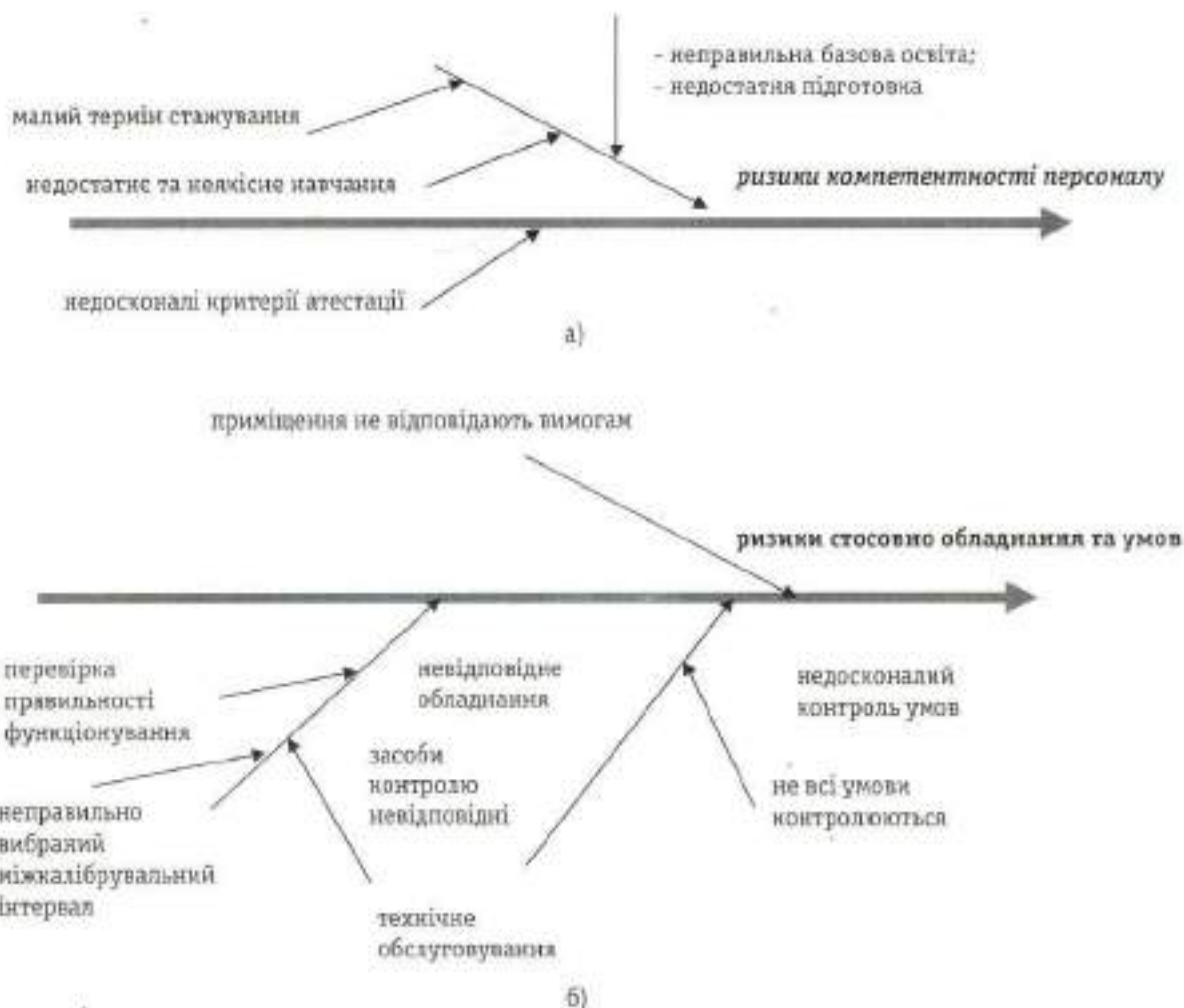


Рис. 5. Можливі складові ризиків компетентності персоналу (а) та управління обладнанням і зовнішніми умовами (б).

Fig. 5. Possible components of risks of personnel competence (a) and management of equipment and external conditions (b).



зацікавлені сторони	інтереси зацікавлених сторін (цілі)	ризик та можливості досягнення	аналізування ризиків	дії щодо опрацювання ризиків	моніторинг виконання
споживачі (групи, підгрупи) 1.1. 1.2.					
персонал (структурованість) 2.1. 2.2.					
власники 3.1.					

Рис. 6. Приклад SWOT діаграми, націленої на задоволення зацікавлених сторін  
Fig. 6. Example of a SWOT chart aimed at satisfying stakeholders

• використання діаграми Ісікави (як було показано нами раніше у [6] «Організація ризик-орієнтованого менеджменту за ДСТУ ISO/IEC 17025:2017» (див. журнал «Лабораторна справа» № 2, 2019 р.);

• аналізуючи інтереси зацікавлених сторін і ризики, пов'язані з їх задоволенням (SWOT — діаграма).

На закінчення роботи наведемо розроблені авторами приклади впровадження на наш погляд найбільш цікавих підходів SWOT: діаграми та діаграми Ісікави в лабораторну практику для ідентифікації ризиків компетентності і неупередженості.

Діаграму Ісікави ризиків компетентності та порядку функціонування представлено на рис. 4.

Суть запропонованого підходу — в послідовному виявленні можливих складових ризиків. На рис. 5 наведено приклад складових ризиків компетентності персоналу та ризиків управління обладнанням та зовнішніми умовами.

Як правильно зазначено у Стандарті, ризики неупередженості, в основному, зумовлені зв'язками

(зовнішніми і внутрішніми), тобто пов'язані із зацікавленими сторонами, отже ідентифікацію ризиків неупередженості доречно проводити за технологією SWOT — діаграми, хоча можливо і будь-яким іншим із зазначених вище методів.

Приклад такого підходу запропоновано на рис. 6.

Підходи до управління процесами на основі ризиків списано авторами у [6].

## ВИСНОВКИ

Виходячи із загальних закономірностей функціонування лабораторії, запропоновано універсальний варіант класифікації ризиків, який може бути застосовано до будь-якої лабораторії.

Проектно аналізовано можливі на сьогодні варіанти ідентифікації вірусів.

Технологічні прийоми ідентифікації ризиків за діаграмою Ісікави та SWOT — діаграмою реалізовано на прикладах ідентифікації складових ризиків компетентності та неупередженості лабораторії у відповідності до вимог [1].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій» (ISO/IEC 17025:2017 IDT «General requirements for the competence of testing and calibration laboratories»);
2. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (DSTU ISO 31000: 2018 Risk management. Principles and guidelines);
3. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій» (DSTU ISO / IEC 17025: 2006 «General requirements for the competence of testing and calibration laboratories»);
4. ISO 19011:2018 Guidelines for auditing management systems;
5. ДСТУ EN ISO 15189:2015 Медичні лабораторії. Вимоги до якості та компетентності (DSTU EN ISO 15189: 2015 Medical laboratories. Requirements for quality and competence);
6. В.М. Новіков, О.А. Нікітюк «Організація ризик-орієнтованого менеджменту за ДСТУ ISO/IEC 17025:2017» (журнал «Лабораторна справа» № 2, 2019 р.) (V.M. Novikov, O.A. Nikityuk «Organization of risk-oriented management according to DSTU ISO/IEC 17025: 2017» (Journal of Laboratory Affairs № 2, 2019));
7. EA 4/20 G:2014 — Assessment of Laboratories against EN ISO 15189 and EN ISO 22870 Point-of-Care Testing (POCT) [8]

Отримано / received: 16.04.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. І.М. Вергуновою (Україна).  
Prof. I.M. Vergunova, D. Sc. (Phys.-mat.), Ukraine, recommended this article to be published.



