

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 4(78), 2019

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 «Укрметртестстандарт»),
ТОВ Виробничо комерційна
фірма (ВКФ) «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску чотирнадцятий
Передплатний індекс 92386

Головний редактор

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.

Редакційна колегія:

Величко О.М., д. т. н., проф.
Захаров І.П., д. т. н., проф.
Коломієц Л.В., д. т. н., проф.
Косач Н.І., д. т. н., проф.
Кошева Л.О., д. т. н., проф.
Кошовий М.Д., д. т. н., проф.
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.
Кухарчук В.В., д. т. н., проф.
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.
Пістун Є.П., д. т. н., проф.
Середюк 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)
Михалченко В.М., к. т. н. (Казахстан)

Експертна рада:

Большаков В.Б., 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.
Рожнов М.С., к. х. н., с. н. с.
Сурду М.М., д. т. н., проф.

Редакційна група:

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

Журнал **рекомендовано до друку**
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №8 від 03.07.2019)

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Куликівська, 11;
Тел.: (057) 703 23 28; (095) 00 68 665
E mail: metrolog prylady@ukr.net
http://www.amu.in.ua/journal1
https://mmi.journal.org/index.php/
journal/issue/view/1

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр. т. Гагаріна, 94 А, кв. 35;
Свідоцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 07.09.2019.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл. вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 39.

© «Метрологія та прилади», 2019

Журнал **zareestrovano**
у Міністерстві юстиції України,
свідоцтво
серія **КВ № 22796 12696ПР**
від **03.07.2017**;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015
Журнал **включено** до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від **08.03.2013**

The Journal is **Registered**
in Ministry of Justice of Ukraine,
Certificate series **KB № 22796 12696PR**
dated **03.07.2017**;
is included in the List of scientific
professional editions of Ukraine,
the order of the Ministry of Education
and Science of Ukraine
No. 747 dated 13.07.2015
The journal is **included** in the
International Scientific Databases **Index**
Copernicus, Letter dated **08.03.2013**

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 fourteenth
Subscription index **92386**.

Chief editor:

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

Editorial board:

Kolomyets L.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosheva L.O., D.Sc. (Eng.), prof.
Koshovyi M.D., D.Sc. (Eng.), prof.
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.
Kukharchuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.
Velychko O.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
Kuzmenko Yu.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
Vynokurov L.I., Scientific Editor,
Executive Secretary
Pronenko M.P., site moderator, designer
Zaitsev Yu.O., maker up designer

The journal is recommended for publication

by the scientific council of KNURE
(protocol number 8 dated 03.07.2019)

Editorial Address:

61002, Kharkiv, st. Kulikovskaya, 11;
tel.: (057) 703 23 28; (095) 00 68 665
e mail: metrolog prylady@ukr.net
https://mmi.journal.org/index.php/journal
https://mmi.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 XK № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 07.09.2019
Format 60 × 84/8. Paper is coated.
Conditional printed sheets 8.43.
Accounting and publishing sheets 7.13.
Offset printing. Circulation 400 copies
Order number 39.

ISSN (print) 2307 2180

ISSN (online) 2663 9564

DOI: 10.33955/2307 2180

© «Metrology and Instruments», 2019

ПРЕЦИЗІЙНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ	PRECISION MEASUREMENT
Гринев Б., Гурджян Н., Зеленская О., Любинский В., Молчанова Н., Мицай Л., Тарасов В. Прецизионность измерения минимальной детектируемой активности радионуклидов пластмассовыми сцинтилляторами для радиационного мониторинга..... 3	Grynyov B., Gurdzhian N., Zelenskaya O., Lyubynskiy V., Molchanova N., Mitsay L., Tarasov V. Precision Measurements of the Minimum Detectable Activity of Radionuclides by Plastic Scintillators for Radiation Monitoring
МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	METROLOGICAL ASSURANCE
Дегтярук В., Ходаковський М., Будник М., Будник В., Мудренко М., Тимошенко Я. Розробка метрологічного забезпечення фотометричних приладів для пульсометрії..... 10	Degtjaruk V., Khodakovskiy M., Budnyk M., Budnyk V., Mudrenko M., Tymoshenko Ya. Development of Metrological Maintenance of Photometric Devices For Pulsometry
ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ	ACCURACY AND RELIABILITY
Костира О., Стороженко В., Науменко В. Компенсація багатопроменевих перешкод у рознесених пасивних системах синхронізації часу та частоти 17	Kostyria O., Storozhenko V., Naumenko V. Compensation of Multipath Interference in a Separated Passive Time and Frequency Synchronization Systems
МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ	METHODS AND PROCEDURES
Володарский Е., Кошечая Л., Потоцкий И. Особенности, возможности и применение контрольных карт накопленных сумм. Часть 1. Метод графической оценки разлаженности технологического процесса 24	Володарский Е., Кошечая Л., Потоцкий И. Features, Opportunities and Application of Control Cards Accumulated Sum. Part 1. Graphic Evaluation Method Dilution Technological Process
ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ	MEASURING INSTRUMENTS AND DEVICES
Оробець І., Шевченко В. Пристрій для формування та вимірювання часових інтервалів 31	Orobets I., Shevchenko V. Device for Generating and Measuring Time Intervals
ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ	PROCESSING OF MEASUREMENT
Квасніков В., Передерко А., Кузьмич Л., Котетунов В. Опрацювання результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами (за умов невизначеності)..... 34	Kvasnikov V., Perederko A., Kuzmich L., Kotetunov V. Processing of Measurement Results for Mechanical Values by Intellectual Equipment Systems (Uncertainty Conditions)
ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ	PARAMETERS AND CHARACTERISTICS
Яцишин С., Мельник Х. Інерційність показів рідинних мікротермометрів 39	Yatsyshyn S., Melnyk Kh. Inertia of liquid microthermometer readings
ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ	MILITARY METROLOGY
Бойко В. Постачання зразків військової техніки іноземного виробництва на озброєння: актуальні питання метрологічного забезпечення..... 44	Bojko V. Delivery of Samples of Military Techniques of Foreign Manufacture to Arms: Pressing Questions of Metrological Maintenance
ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ	QUALITY AND EFFICIENCY
Должанський А., Колот Є. Анализ эффективности и применение усовершенствованного метода оценки качества гетерогенных жидкостей по составляющим импеданса 48	Dolzhanskiy A., Kolot Ye. Efficiency Analysis and Application of Improved Method for Heterogeneous Liquids Quality Assessing by Impedance Components
ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ	APPLICATION AND EXPLOITATION
Льницька Т., Василюха Х. ЗВТ, пов'язані з вимірюванням маси у сфері та поза сферою законодавчо регульованої метрології..... 55	Ilnytska T., Vasylykha Kh. The Means of Measuring Equipment Related to the Measurement of Mass in and Outside the Area of Legally Regulated Metrology
Колесник А. Оптическая система для светодиодного светильника..... 62	Kolesnyk A. Optical System for Led Luminaire
ВАЛІДАЦІЯ МЕТОДІВ	VALIDATION OF THE METHODS
Коробко А. Валідація методу вимірювання кута поперечної стійкості тракторів і сільськогосподарських машин 68	Korobko A. Validation for the Method Measuring Lateral Stability Angle Belonging Tractors and Agricultural Machines

DOI: 10.33955/2307_2180(4)2019.3_9

УДК 53.088.22:539.1.074.6:006.915+621.397.46

ПРЕЦИЗИОННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ ДЕТЕКТИРУЕМОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ ПЛАСТМАССОВЫМИ СЦИНТИЛЛЯТОРАМИ ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Precision Measurements of the Minimum Detectable Activity of Radionuclides by Plastic Scintillators for Radiation Monitoring

(cc) BY-SA

Б. Гринев, академик НАН Украины, директор Института сцинтилляционных материалов НАН Украины, председатель ТК 99,
Н. Гурджян, инженер 1 й категории,
О. Зеленская, ведущий инженер,
В. Любинский, заведующий отделом метрологии, заместитель председателя ТК 99,
Н. Молчанова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Л. Мицай, ведущий инженер,
В. Тарасов, доктор физико-математических наук, заведующий отделом сцинтилляционной радиометрии и радиохимических методов исследования, Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, г. Харьков
 e mail: nana.mneyan@gmail.com

B. 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. Gurdzhian, Engineer of the First Category,
O. Zelenskaya, Leading Engineer,
V. Lyubynskiy, Metrological Department Chief, Deputy Head of TC 99,
N. Molchanova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
L. Mitcay, Leading Engineer,
V. Tarasov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Department Head, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine, Kharkov
 e mail: nana.mneyan@gmail.com

Работа посвящена оцениванию прецизионности измерения минимальной детектируемой активности (МДА) радионуклидов по гамма-излучению ^{137}Cs и ^{60}Co с помощью пластмассовых сцинтилляторов (ПС) для портальных мониторов (ПМ). ПС были изготовлены в Институте сцинтилляционных материалов Национальной Академии наук Украины (ИСМА НАНУ).

Оценивание проводилось, в соответствии с ДСТУ ГОСТ ISO 5725-2:2005 [1], путем статистической обработки экспериментального материала, что позволило учитывать факторы, определяющие рассеяние результатов, без составления модельного уравнения.

Исследовано влияние энергии регистрируемого излучения, размеров ПС и геометрии их облучения на оценку прецизионности измерения МДА.

Работа посвящена оцінюванню прецизійності вимірювання мінімальної детектованої активності (МДА) радіонуклідів за гамма-випромінюванням ^{137}Cs та ^{60}Co за допомогою пластмассових сцинтиляторів (ПС). Сцинтилятори входять до складу детекторів, які є чутливими елементами радіаційних портальних моніторів (ПМ). ПС були виготовлені в Інституті сцинтиляційних матеріалів Національної Академії наук України (ИСМА НАНУ).

Оцінювання проводилося, відповідно до ДСТУ ГОСТ ISO 5725-2: 2005 [1], шляхом статистичного опрацювання експериментального матеріалу. Це дозволило враховувати фактори, що визначають розсіювання результатів, без складання модельного рівняння.

Вивчено вплив розмірів ПС, енергії реєстрованого випромінювання і відстані від ПС до джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ) на величину прецизійності виміру МДА.

Оцінювалися коефіцієнти прецизійності виміру МДА радіонуклідів за зміни розміру ПС від $500 \times 300 \times 50$ мм (7500 см^3) до $500 \times 500 \times 50$ мм (12500 см^3), зміни енергії реєстрованого випромінювання від 662 кеВ (^{137}Cs) до 1332 кеВ (^{60}Co), а також зміни відстані від ПС до ДІВ від 10 до 50 см. Отримані результати представлені на рис. 6—9 та в таблиці.

Показано, що найбільший внесок у збільшення коефіцієнта прецизійності виміру МДА дає зміна геометрії опромінення. Показано, що за збільшення відстані від ПС до ДІВ від 10 до 50 см значення показників прецизійності збільшуються: за реєстрації ^{137}Cs від 3,9 до 7,0 % ($V = 7500 \text{ см}^3$) та від 3,6 до 6,3 % ($V = 12500 \text{ см}^3$); за реєстрації ^{60}Co від 3,1 до 4,3 % ($V = 7500 \text{ см}^3$) та від 3,2 до 3,8 % ($V = 12500 \text{ см}^3$).

Установлено, що отримані результати зумовлені зміною внеску фону в швидкість рахунку ПС-пластини за різних умов вимірювання та впливом цієї зміни на величину коефіцієнта чутливості й, відповідно, на величину МДА та коефіцієнта прецизійності вимірювання МДА.

This work is devoted to the precision evaluation of the minimum detectable activity (MDA) measurement of gamma radiation radionuclides ^{137}Cs and ^{60}Co using plastic scintillators (PS). Scintillators are part of the detectors, which are sensitive elements of radiation portal monitors (PM). PS were produced at the Institute for scintillation materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (ISMA NAS of Ukraine).

The evaluation was generate in accordance with State standard of Ukraine ISO 5725-2:2005 [1] through statistical processing of experimental material. This made it possible to take into account the factors that determine the scattering of results without a model equation.

Influence of PS sizes, energy radiation detected and distance from PS to the source of ionizing radiation (SIR) on the value of MDA precision measurement was studied.

Precision coefficients of radionuclides MDA measurement evaluated when changing PS sizes from 500×300×50 mm (7500 cm³) up to 500×500×50 mm (12500 cm³), changing the energy radiation detected from 662 keV (¹³⁷Cs) until 1332 keV (⁶⁰Co), changing the distance from the PS to SIR from 10 to 50 cm. The results are presented in Fig. 6—9 and Table.

Found, that the greatest contribution to the increase in MDA precision coefficient measurements makes a change in the irradiation geometry. It is shown that when distance from PS to SIR in-

creases from 10 to 50 cm, precision values increase: when registering ¹³⁷Cs, from 3,9 to 7,0 % ($V = 7500 \text{ cm}^3$) and from 3,6 to 6,3 % ($V = 12500 \text{ cm}^3$); when registering ⁶⁰Co, from 3,1 to 4,3 % ($V = 7500 \text{ cm}^3$) and from 3,2 to 3,8 % ($V = 12500 \text{ cm}^3$).

It is established, that the obtained results are due to the change in the contribution of background count rate to PS count rate under different measurements conditions. This contribution affects on the value of sensitivity coefficient and consequently on the value of MDA and precision coefficient.

Ключевые слова: пластмассовый сцинтиллятор, детектор, порталый монитор, гамма-излучение, МДА, повторяемость, прецизионность.

Ключові слова: пластмасовий сцинтилятор, детектор, порталый монітор, гамма-випромінювання, МДА, повторюваність, прецизійність, **Keywords:** PS scintillator, detector, portal monitor, gamma radiation, MDA, repeatability, precision.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль несанкционированного перемещения ядерных и радиоактивных материалов является актуальной задачей.

Такой контроль осуществляется с помощью специальных технических средств — радиационных ПМ, основными рабочими элементами которых являются детекторы гамма излучения на основе ПС.

В Украине ПС больших размеров в виде панелей для детекторов ПМ выпускаются Институтом сцинтилляционных материалов (ИСМА) НАН Украины.

Важной технической характеристикой ПМ и, соответственно, ПС наряду с чувствительностью, является величина предела обнаружения малых количеств радиоактивности на естественном радиоактивном фоне окружающей среды. В качестве критерия оценки этого предела используют минимальную детектируемую активность (МДА).

МДА является одним из показателей качества, с помощью которого можно сравнивать различные системы [2], в частности ПМ [3]. Для достижения сопоставимости характеристик различных систем важна единообразная трактовка понятия МДА, стандартизация аналитического выражения для него и условий измерения. Радиоактивность (радиоактивный распад) является случайным, вероятностным процессом. Понятие МДА также может быть определено в терминах теории вероятностей.

В 1965 г Международной комиссией по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ) было рекомендовано [4] определение МДА, «как такой активности данного нуклида, которая в течение данного времени счета дает увеличение показания прибора на величину, в три раза превосходящую стандартное отклонение фоновых отсчетов, произведенных за это же время».

В настоящее время термин «МДА» трактуется [5] как самое низкое значение активности, которое может быть достигнуто, при измерении образца (окружающей среды) с помощью данной системы обнаружения. Однако в международных и национальных

нормативных документах в области метрологии иоизирующего излучения термин «МДА» в явном виде отсутствует. Вместо этого существует несколько подходов [6] к определению понятия МДА в терминах «пределов обнаружения», которые в 1968 г ввел Currie, используя методы проверки статистических гипотез о законе распределения [7]. Поскольку фон является основным фактором, ограничивающим чувствительность установки, то это ограничение должно вносить ясность в вопрос о том, какие количества активности на ней можно измерять. С этой целью Currie [8] были введены понятия и предложены процедуры (формулы) установления трех характерных пределов обнаружения — статистических критериев, ограничивающих чувствительность измерительной установки.

Выбор конкретного подхода (уровня) зависит от предполагаемой цели измерения, уровня точности процедуры измерения и предполагаемого конечного использования информации.

Данная работа посвящена оценке только одного предела обнаружения — L_D .

Как указано в работе [9], предел обнаружения Currie L_D (Detection Limit) является априорной оценкой наименьшего значения истинного чистого сигнала, который может быть надежно измерен данным инструментом или процедурой. Он оценивается по количеству наблюдений в детекторе и является информативным только в отношении статистической проблемы обнаружения сигналов. MDA (Minimum Detectable Activity) — это значение активности, соответствующее пределу обнаружения L_D , полученное путем применения к пределу калибровочного коэффициента. Традиционно расчет MDA не был связан с систематической неопределенностью, присущей калибровочному коэффициенту.

На основании работы Currie были разработаны немецкий стандарт DIN 25482 (1989 г) [10] и несколько серий международного стандарта ISO 11929, посвященные проблеме определения характерных пределов.

В настоящей работе использовались национальный стандарт ДСТУ ISO 11929 3:2009 [11] и международный стандарт по характеристикам ПМ ANSI N42.38 2006 [12].

Гамма спектрометрия *MDA* зависит от ряда факторов: фона, имеющего статистический характер, чувствительности детектора и времени счета. В свою очередь, на чувствительность детектора к излучению низкой активности в присутствии фона влияют [13] свойства и площадь (объем) детектора, геометрия измерения, время набора информации. Все указанные факторы понижают точность измерения, вызывая рассеяние результатов и увеличивая статистическую (случайную) составляющую точности измерения *MDA*, которую, в соответствии с [1], характеризует прецизионность. Использование стандарта [1] позволяет учитывать факторы, определяющие рассеяние результатов, без составления модельного уравнения [14].

Прецизионность (*precision*) является общим термином для выражения изменчивости повторяющихся измерений, характеризует степень малости рассеяния независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Прецизионность зависит только от случайных ошибок каждого измерения. Мерой прецизионности является показатель прецизионности, который рассчитывается с определенной вероятностью, на основании серии результатов, как СКО единичного измерения.

Цель работы: оценивание зависимости прецизионности измерения *MDA* радионуклидов от различных факторов

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Объекты исследования

Измерялась *MDA* радионуклидов по гамма излучению ^{137}Cs и ^{60}Co , регистрируемому ПС на основе полистирола. ПС были изготовлены в виде пластин (ПС пластины) с размерами $500 \times 300 \times 50$ мм (7500 см^3) и $500 \times 500 \times 50$ мм (12500 см^3). Внешний вид неупакованной пластины представлен на рис. 1.

Перед измерениями, для улучшения светособирания, ПС пластины заворачивались в отражатель *TETRATEX*.

Внешний вид упакованной пластины в светозащитном коробе измерительной установки представлен на рис. 2.

2. Описание эксперимента

Измерения скорости счета n и фона n_b , в имп/с, исследуемых ПС пластин, в интервале энергий от 20 до 2000 кэВ, проводились в соответствии

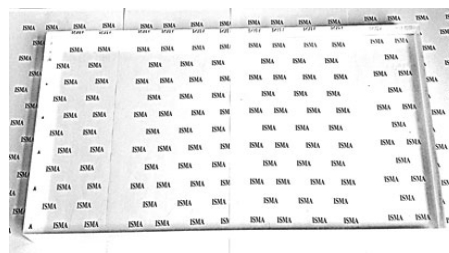


Рис. 1. Внешний вид неупакованной ПС пластины с размерами $500 \times 300 \times 50$ мм

Fig. 1. Appearance of unpacked PS plate with dimensions of $500 \times 300 \times 50$ mm

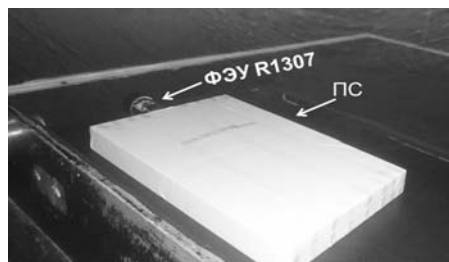


Рис. 2. Внешний вид упакованной ПС пластины с размерами $500 \times 300 \times 50$ мм

Fig. 2. Appearance of packed PS plate with dimensions of $500 \times 300 \times 50$ mm

с национальным стандартом [15], который гармонизирован с международным стандартом [16], на стандартном спектрометрическом устройстве (рис. 3) в условиях естественного радиоактивного фона окружающей среды. В качестве фотоприемника использовался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) R1307 «Hamamatsu». Источники гамма излучения ^{137}Cs и ^{60}Co располагались на расстояниях $h = 10$ см и $h = 50$ см от центра входной поверхности ПС пластины.

Проводилась серия измерений ($N = 9$) в условиях повторяемости, в предположении о нормальном

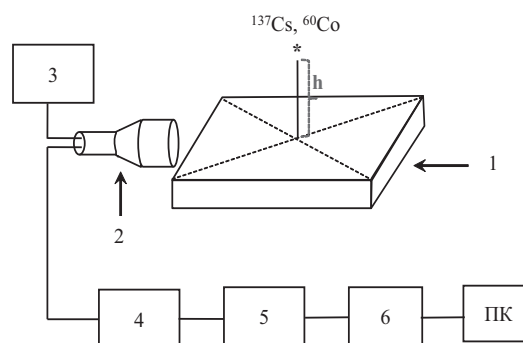


Рис. 3. Схема спектрометрического устройства: 1 — ПС — пластина; 2 — ФЭУ; 3 — высоковольтный источник; 4 — предусилитель; 5 — усилитель; 6 — анализатор; ПК — персональный компьютер

Fig. 3. Scheme of the spectrometric device: 1 — PS — plate; 2 — PMT; 3 — high voltage source; 4 — preamplifier; 5 — amplifier; 6 — analyzer; PC — personal computer

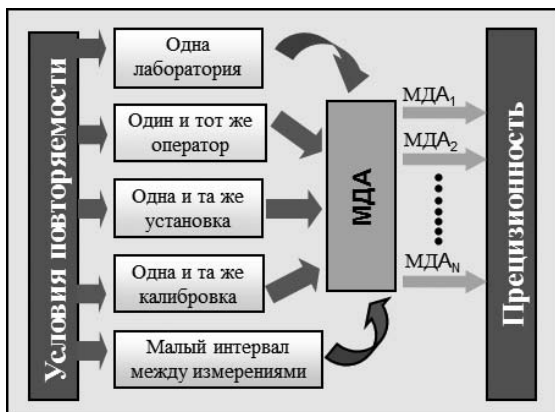


Рис. 4. Факторы, определяющие условия повторяемости измерений MDA

Fig. 4. Factors determining the repeatability conditions for MDA measurements

законе распределения с доверительной вероятностью, равной $P_D = 0,95$. Выбор количества измерений обусловлен выводами работы [17].

Факторы, определяющие условия повторяемости, приведены на рис. 4.

Перед началом измерений шкала многоканального анализатора импульсов калибровалась по энергии.

Набирались амплитудные спектры ПС пластин при различных энергиях и при различной геометрии возбуждения.

Выбор геометрии облучения ПС пластин был обусловлен предназначением пластин: 50 см (середина зоны) — для пешеходного ПМ, с шириной зоны контроля, равной (0,8—1,0) м; 10 см — для регистрации поверхностных загрязнений.

Типичные амплитудные спектры детектора для ПМ на основе ПС пластины изображены на рис. 5.

3. Расчет MDA и показателя прецизионности

В соответствии с [8] величина MDA, в кБк, представлялась в виде отношения:

$$MDA = L_D / \eta, \tag{1}$$

где: L_D — предел обнаружения, в имп/с;

η — коэффициент чувствительности сцинтиллятора, в имп/с · кБк, определяемый, в соответствии с п. 3.4 [18], по формуле:

$$\eta = (n - n_b) / A, \tag{2}$$

где: n и n_b — скорости счета и фона исследуемых ПС пластин, в имп/с; A — активность источника на момент измерения, в кБк.

Значение L_D , в имп/с, рассчитывалось по формуле (16) стандарта [11]:

$$L_D = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{2n_b / t}, \tag{3}$$

где: $k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}$ — квантили стандартного нормального распределения, равные 1,96 при уровне дове

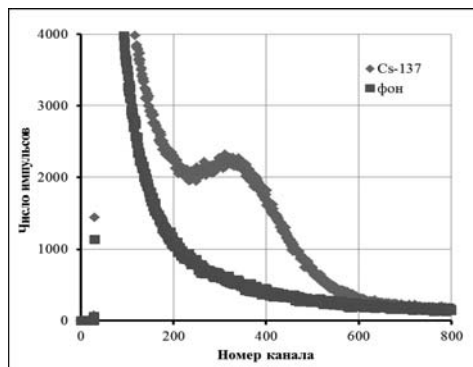


Рис. 5. Типичные амплитудные спектры ПС пластины, используемой в ПМ.

Fig. 5. Typical amplitude spectra PS plate used in PM

рительной вероятности $P_D = 0,95$; a и b — вероятности появления ошибки 1 го или 2 го рода [11], равные 0,025 при $P_D = 0,95$; t — время экспозиции, равное 1 с.

Выбор времени экспозиции обусловлен временем, необходимым для пересечения пешеходом зоны контроля ПМ при скорости движения 1,2 м/с [12].

В соответствии со стандартом [1], статистическую модель оценки точности каждого результата измерений MDA можно представить в виде:

$$MDA_i = \overline{MDA} + B + e, \tag{4}$$

где: MDA_i — i е измеренное значение; \overline{MDA} — среднее значение; B — лабораторная составляющая систематической погрешности в условиях повторяемости; e — случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости. Влиянием составляющей B , как константы для данных условий, можно пренебречь. Также, при данных условиях измерения, предполагалось отсутствие выбросов.

Оценкой изменчивости случайной составляющей погрешности единичного измерения e является показатель прецизионности измерения — стандартное квадратичное отклонение (СКО) результата единичного измерения, $S_r(MDA)$, выполненного в условиях повторяемости.

Численное абсолютное значение $S_r(MDA)$, в кБк, вычислялось, в соответствии с [1], по формуле:

$$S_r(MDA) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (MDA_i - \overline{MDA})^2 / (N - 1)}. \tag{5}$$

Относительное значение показателя прецизионности $\tilde{S}_r(MDA)$, в процентах, определялось по формуле:

$$\tilde{S}_r(MDA) = S_r(MDA) / \overline{MDA} \times 100. \tag{6}$$

4. Результаты и обсуждение

Результаты 9 ти измерений скоростей счета n_i и фона n_{bi} ПС пластин разного объема, при

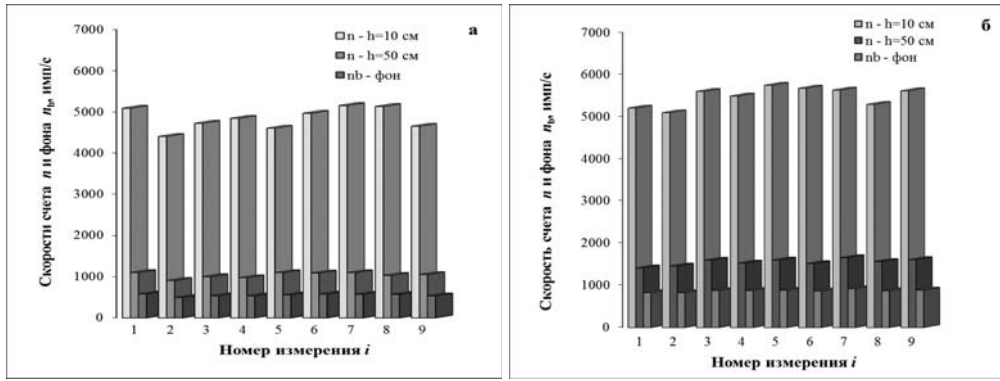


Рис. 6. Скорости счета n_i и фона n_{bi} ПС пластин при различных расстояниях h от ^{137}Cs : а) $V = 7500 \text{ см}^3$; б) $V = 12500 \text{ см}^3$

Fig. 6. Counting rates n_i and background n_{bi} of PS plates at various distances h from ^{137}Cs : а) $V = 7500 \text{ см}^3$; б) $V = 12500 \text{ см}^3$

различной геометрии возбуждения гамма излучением ^{137}Cs , представлены в виде гистограмм на рис. 6.

Из представленных гистограмм видно, что величина вклада фона n_b в скорость счета n (отношение n_b/n) ПС пластин умеренно возрастает при увеличении объема и резко повышается при увеличении расстояния h от 10 до 50 см.

Результаты измерений MDA_i , с указанием границ прецизионности $MDA \pm S_r(MDA)$, для 9 ти измерений, при различных условиях возбуждения гамма излучением ^{137}Cs и ^{60}Co , приведены в виде диаграмм на рис. 7.

Как следует из рис. 7, границы прецизионности измерения MDA , в кБк, расширяются почти в 10 раз при увеличении расстояния h от 10 до 50 см и уменьшаются (3—7) раз при увеличении энергии регистрируемого излучения от 662 до 1332 кэВ.

Средние значения рассчитанных величин отношения n_b/n , чувствительности η , MDA и абсолютных и относительных значений показателя преци-

зионности $S_r(MDA)$ при различных условиях измерения приведены в таблице.

Для наглядности, зависимость величины отношения n_b/n от расстояния h до ИИИ представлена в виде гистограммы на рис. 8. Из рисунка видно, что отношение n_b/n , при данных условиях измерения, слабо (5—10) % зависит от энергии регистрируемого излучения либо от объема ПС пластины. Однако, при увеличении расстояния h от 10 до 50 см, указанное отношение скоростей также возрастает в 5 раз, вызывая увеличение коэффициента прецизионности измерения MDA в (1,8—2,0) раза при регистрации ^{137}Cs и в (1,2—1,4) раза — при регистрации ^{60}Co .

Зависимость величины $S_r(MDA)$ от расстояния h до ИИИ и объема V ПС пластины изображены на рис. 9.

Как видно из графиков, изображенных на рис. 9, при увеличении расстояния h от 10 до 50 см значения показателей прецизионности $S_r(MDA)$ увеличиваются: при регистрации ^{137}Cs , от 3,9 до 7,0 % ($V = 7500 \text{ см}^3$) и от 3,6 до 6,3 % ($V = 12500 \text{ см}^3$);

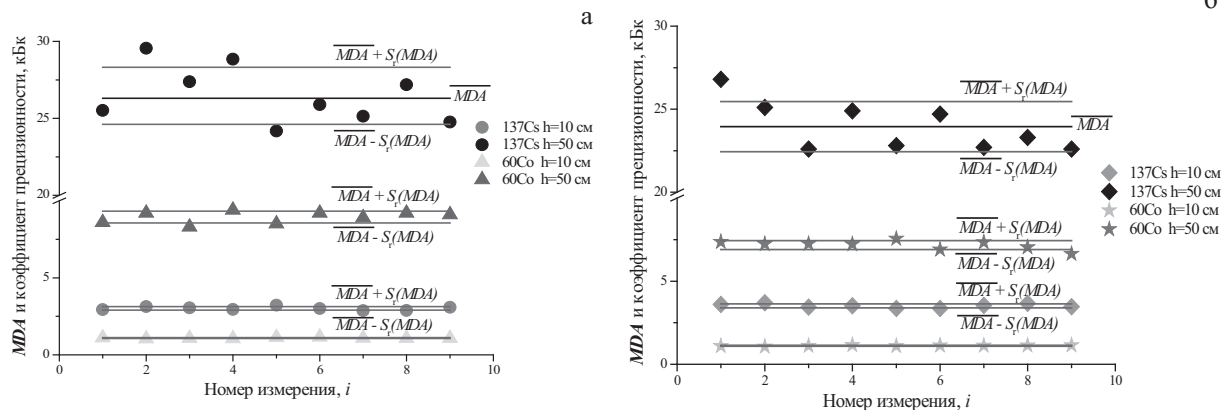


Рис. 7. Прецизионность измерения MDA радионуклидов ПС пластинами при различных условиях измерения: а) $V = 7500 \text{ см}^3$; б) $V = 12500 \text{ см}^3$

Fig. 7. Precision of MDA measurement of radionuclides by PS plates under various measurement conditions: а) $V = 7500 \text{ см}^3$; б) $V = 12500 \text{ см}^3$

MDA и показатели прецизионности измерения MDA для ПС пластин
MDA and precision indicators of MDA measurements for PS plates

Объем, см ³	Нуклид	h = 10 см						h = 50 см				
		A, кБк	n _b /n, %	η, имп/с · кБк	MDA, кБк	S _r (MDA), кБк	S _r (MDA), %	n _b /n, %	η, кБк	MDA, кБк	S _r (MDA), кБк	S _r (MDA), %
7500	¹³⁷ Cs	99	11,4	43,3	3,0	0,12	3,9	52,9	4,9	26,5	1,86	7,0
	⁶⁰ Co	32,3	12,5	119,8	1,1	0,03	3,1	54,0	14,6	8,9	0,39	4,3
12500	¹³⁷ Cs	99	15,7	47,2	3,5	0,13	3,6	56,4	6,9	23,9	1,51	6,3
	⁶⁰ Co	32,3	15,7	145,0	1,1	0,04	3,2	54,2	22,9	7,2	0,27	3,8

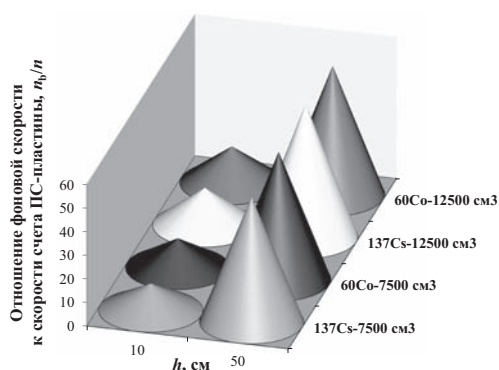


Рис. 8. Зависимость величины отношения n_b/n от расстояния h до ИИИ

Fig. 8. The dependence of the ratio n_b/n on the distance h to the SIR

при регистрации ⁶⁰Co, от 3,1 до 4,3 % (V = 7500 см³) и от 3,2 до 3,8 % (V = 12500 см³).

ВЫВОДЫ

Проведено оценивание прецизионности измерения MDA радионуклидов по гамма излучению ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co ПС пластинами, используемыми в качестве детекторов в порталных мониторах. Изучено влияние различных факторов на величину коэффициента прецизионности

Показано, что прецизионность измерения MDA ухудшается (коэффициент прецизионности увеличивается) при увеличении расстояния до ИИИ и улучшается (коэффициент прецизионности уменьшается) при увеличении энергии регистрируемого излучения и объема ПС пластины.

Установлено, что полученные результаты обусловлены изменением вклада фоновой скорости

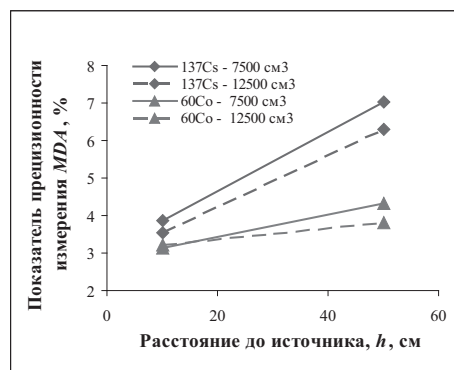


Рис. 9. Залежність показника Sr (MDA) від відстані h до SIR та об'єму V

Fig. 9. Dependence of the Sr (MDA) indicator on the distance h to the SIR and volume V

в скорость счета ПС пластины при различных условиях измерения и влиянием этого изменения на величину коэффициента чувствительности и, соответственно, на величину MDA и S_r(MDA).


Показано, что, при регистрации больших скоростей счета (h = 10 см, 5000 имп/с) и отсутствии у ПС пластины защитного покрытия, вклад фоновой скорости в скорость счета ПС пластины составляет 11—16 процентов для различных условий измерения. При этом коэффициент прецизионности изменяется в пределах 20 процентов, примерно от 3 до 4 процентов.

Установлено, что при уменьшении скоростей счета (h = 50 см, 1000 имп/с) вклад фоновой скорости в скорость счета ПС пластины резко возрастает и составляет 52—56 процентов для различных условий измерения, а коэффициент прецизионности, в зависимости от энергии регистрируемого излучения и объема пластины, изменяется примерно от 7 до 3 процентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ДСТУ ГОСТ ИСО 5725 2:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 2. Основний метод визначення повторюваності і відтворюваності стандартного методу. Київ: Держстандарт 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.).

1. Croft Stephen, Alvarez Eloisa, Curtis Debbie, McElroy Bob D, Wilkins Colin G, Wormald Malcolm R, Young Brian. The Estimation of the Minimum Detectable Activity from Measured Passive Neutron Coincidence Counter Data. Canberra Harwell Ltd., Harwell International Business Centre, Didcot, Oxfordshire, UK. Available at <https://www.researchgate.net/publication/266165180>
2. Keyser Ronald M., Sergent Frank, Twomey Timothy R., Upp Daniel L., Minimum Detectable Activity Estimates for a Germanium Detector Based Spectroscopic Portal Monitor. ORTEC 801 South Illinois Avenue Oak Ridge, TN, 37831 USA.
3. Радиоактивность. Серия технических докладов. МАГАТЭ. Вена (Radioaktivnost'. Serija tehniceskikh dokladov MAGATЭ. [Radioactivity. A series of technical reports IAEA], Vienna), — 1965, N.47, с/р. 62—65 (In Russian).
4. Aurelian Luca. Some considerations about MDA and ISO 11929 3(2000). Horia Hulubei Nat. Inst. of Phys. and Nucl. Eng. (IFIN HH), Bucharest Magurele, Romania. Available at: http://www.nucleide.org/ICRM_GSWG/Workshop_2009/03
5. Исаев А.Г., Бабенко В.В., Казимиров А.С., Гришин С.Н., Иевлев С.М. Минимальная детектируемая активность. Основные понятия и определения. Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля (Isaev A.G., Babenko V.V., Kazimirov A.S., Grishin S.N., Ievlev S.M. Minimum detectable activity. Basic concepts and definitions. Problemy bezpeky atomnykh elektrostancij i Chornobylja — The problem of the safety of nuclear power plants and Chernobyl), — 2010, вып./issue 13, с/р. 103—110 (In Russian).
6. Леман Э. Проверка статистических гипотез. Москва: Наука (Leman E. Proverka statisticheskikh gipotez [Statistical hypothesis testing]. Moscow, Nauka publ.), — 1964, 498 с/р.
7. Currie L.A. Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination. Anal. Chem, 1968, vol. 40, no. 3, pp. 586 — 693.
8. Kirkpatrick J. M., Venkataraman R., Young B.M. Minimum detectable activity, systematic uncertainties, and the ISO 11929 standard. J. Radioanal. Nucl. Chem, 2012, vol. 296(2), pp. 1005–1010.
9. National Standard Germany DIN 25482 1:1989 04. Limit of detection and limit of decision for nuclear radiation measurements; counting measurements neglecting the influence of sample treatment, 1989.
10. ДСТУ ISO 11929 3:2009. Визначення меж виявлення та порогу ухвалення рішення під час вимірювання іонізуючого випромінювання. Частина 3. Теоретичні основи та практичне застосування вимірювання методом лічення імпульсів для гамма спектрометрії високої роздільної здатності без урахування впливу підготування зразка (ISO 11929 3:2000, IDT). Київ: Держстандарт України (State standard of Ukraine 11929 3:2009. Determination of the detection limit and decision threshold for ionizing radiation measurements. Part 3: Fundamentals and application to counting measurements by high resolution gamma spectrometry, without the influence of sample treatment (ISO 11929 3: 2000, IDT). Kyiv, State standards publ.), — 2013, 8 с/р.
11. ANSI N42.38 2006. American National Standard Performance Criteria for Spectroscopy Based Portal Monitors Used for Homeland Security. New York, IEEE Publ., 2007, 40 p.
12. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В., Любинский В.Р., Мицай Л.И., Молчанова Н.И., Тарасов В.А. Детекторы на основе пластмассовых сцинтилляторов для порталных мониторов—оценивание неопределенности чувствительности. Український метрологічний журнал (Grynuov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Mitcay L.I., Molchanova N.I., Tarasov V.A. Detectors on the base of plastic scintillators for portal monitors — an evaluation of sensitivity uncertainty. Ukrainian Metrological Journal), — 2018, N 2, с/р. 46—54 (In Russian).
13. Володарский Е.Т., Кошечая Л.А. Обоснование целесообразности применения экспериментального подхода к оценке неопределенности количественных результатов испытаний. Український метрологічний журнал (Volodarskiy E.T., Kosheva L.A., Justification of the expediency of applying an experimental approach to assessing the uncertainty of quantitative test results. Ukrainskyj metrologichnyj zhurnal — Ukrainian Metrology Journal), — 2009, N 3, с/р. 8—12 (In Russian).
14. 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.), — 2009, с/р. 31—39.
15. IEC 62372:2006 Nuclear instrumentation — Housed scintillators — Measurement methods of light output and intrinsic resolution. Geneva, IEC. 2006, 38 p.
16. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В., Любинский В.Р., Мицай Л.И., Молчанова Н.И., Тарасов В.А. Анализ влияния статистики эксперимента на оценку точности измерения светового выхода сцинтилляторов. Український метрологічний журнал (Grynuov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V., Lyubynskiy V.R., Mitcay L.I., Molchanova N.I., Tarasov V.A. Analysis of the influence of experiment statistics to the accuracy evaluation of the scintillators light output measurement. Ukrainian Metrology Journal), — 2018, N 4, с/р. 35—42 (In Russian).
17. РНПИ 540100.000 РЭ Мониторы радиационные пешеходные «Дозор». Руководство по эксплуатации. С Перербург: НТЦ «ЯФИ» ([RNPI 540100.000 Pedestrian radiation monitors «Dozor». The user manual]. Available at: http://www.yafi.ru/images/Exploatac/DOZOR_Operation%20Manual), 2017. 45 с/р. 

Отримано / received: 05.06.2018.

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

DOI: 10.33955/2307 2180(4)2019.10 16

УДК 681.7, 616 71

РОЗРОБКА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФОТОМЕТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ПУЛЬСОМЕТРІЇ

Development of Metrological Maintenance of Photometric Devices For Pulsometry



В. Дегтярук, науковий співробітник,
e mail: degtjaruk@ukr.net

М. Ходаковський, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
e mail: nhodak@ukr.net

М. Будник, доктор технічних наук,
головний науковий співробітник,
e mail: budnyk@meta.ua

В. Будник, науковий співробітник,
e mail: budnykv@meta.ua

М. Мудренко, провідний інженер,
e mail: mudrenko.m.i.@gmail.com

Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України,
м.Київ, Україна,

Я. Тимошенко, начальник відділу
оптико фізичних вимірювань,
e mail: tymoshenko@ukrcsm.kiev.ua

ДП «Укрметртестстандарт», м.Київ, Україна

V. Degtjaruk, researcher,
e mail: degtjaruk@ukr.net

M. Khodakovskiy, candidate of technical sciences,
senior researcher,
e mail: nhodak@ukr.net

M. Budnyk, doctor of technical sciences,
chief researcher,
e mail: budnyk@meta.ua

V. Budnyk, researcher,
e mail: budnykv@meta.ua

M. Mudrenko, senior engineer,
e mail: mudrenko.m.i.@gmail.com

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National
Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

Ya. Tymoshenko, head of department
for of optical and physical measurements,
e mail: tymoshenko@ukrcsm.kiev.ua

State Enterprise «Ukrmetrteststandard», Kyiv, Ukraine

Наведено результати розроблення фотоплетизмографів — приладів для вимірювання сигналів пульсуючої артеріальної крові, тобто пульсової хвилі в різних ділянках тіла людини. Вимірювання проводиться неінвазивно за допомогою зондувального пучка світла, без пошкодження шкіри та відбору крові. У результаті ДМА отримано градувальну криву як залежність відносного коефіцієнта оберненого світлорозсіювання від розмаху амплітуди пульсової хвилі.

Investigating pulse in different parts of the body is of great interest to doctors. The purpose is the development of metrological maintenance, calibration and certification of photometric instruments [1—3].

Photoplethysmograph is designed to record changes in optical density of a person's body area with a beam of light reflected in the light [4—6]. Measurements are carried out non-invasively [7].

Ключові слова: фотоплетизмограф, амплітуда пульсової хвилі, коефіцієнт оберненого світлорозсіювання.

Keywords: photoplethysmograph, working measure, pulse wave amplitude, inverse light scattering coefficient.

У рамках проекту «Розроблення метрологічного забезпечення та дослідна експлуатація готових до впровадження інтелектуальних сенсорних приладів на основі реєстрації та аналізу магнітних, електричних та оптичних сигналів» в Інституті кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН

Such device registers pulse wave (PW) signals and reference ECG with computer processing, Fig. 1—2 [8—10].

A working measure (LED) was created and calibrated using an optical radiation power meter based on the substitution method [11], test bench is at Fig. 3, calibration results — in Table 1 and Fig. 4. Test bench for device calibration and an optical radiator are at Fig. 5—6, view of calibrated signal — at Fig. 7. As a result of calibration (Table 2) the dependence of the output signal on LED power supply (Fig. 8) is obtained, and the calibration dependence is shown at Fig. 9.

In the test bench for SMC used standardized light filters KNS-01 at a wavelength of 630 nm (Fig. 10a). The calibration curve is calculated as the dependence of the relative coefficient of inverse light dispersion (RCILD) on PW (Fig. 10b, Table 3). The view of output signal is at Fig. 11.

As a result of SMC, the limits of permissible absolute error of 2 % in the range of RCILD (15—100) % are defined.

України створено дослідні зразки рефрактометричного комп'ютерного аналізатора «Плазмонтест», неінвазивного комп'ютерного портативного фотогомометра та вимірювача середньої потужності оптичного випромінювання, мір та робочих еталонів та проведено їх державну метрологічну атестацію (ДМА)

і повірку в ДП «Укрметрестандарт» та ДП «Харківстандартметрологія» [1—3].

Дослідження пульсу в різних ділянках тіла і, зокрема, в мікроциркуляторному руслі становить великий інтерес для лікарів. *Мета роботи* — розроблення метрологічного забезпечення, калібрування та проведення ДМА ЕКГ фотометричного програмно апаратного комплексу.

Згідно із п.2.2.4 ДСТУ 2595 94 [4] фотоплетизмограф — це плетизмовазограф, вимірювання в якому здійснюється за зміною оптичної густини досліджуваної ділянки тіла або органа. Фотоплетизмограф 4-канальний комп'ютерний (портативний) (ФПК (П)4 01) згідно з класифікатором ЄСКД [5, 6] відноситься до класу: медична техніка; код 941329. Це медичний прилад, призначений для діагностики і точкової реєстрації зміни оптичної густини досліджуваної ділянки тіла людини за допомогою двох монохроматичних джерел у червоній області спектра світла і оптоелектричного перетворювача (ОЕП) у відбитому світлі, розміщених з одного боку поверхні тіла людини. Такий ЗВТ дозволяє реєструвати сигнали пульсуючої артеріальної крові, тобто пульсову хвилю (ПХ) у різних ділянках тіла та референтну ЕКГ із записом даних у пам'ять ПК з опрацюванням сигналів та їх візуалізацією у цифровій та графічній формах [7]. Вимірювання проводять неінвазивно зондувальним пучком світла, без пошкодження шкіри та відбору крові. Прилад представлено на рис. 1а, а блок-схему приладу — на рис. 1б.

До складу приладу входять 4 оптичні головки 1—4 (дві пальцеві та дві плоскі), які через кабелі з'єднані з 4 ма *USB* входами БОС 9. Сигнали з оптичних головок та ЕКГ електродів 5—8 надходять у БОС для підсилення, фільтрації та перетворення сигналів у цифрову форму. Із БОС цифрові сигнали 10 каналів (6 ЕКГ та 4 пульсометричних) надходять у ноутбук 10 [5]. Прилад має зв'язок з комп'ютером через *USB* порт і працює під його керуванням. Дані за допомогою програми 12 реєструються із записом у пам'ять ПК, опрацьовуються та візуалізуються. Живлення ноутбука здійснюється від адаптера 11, живлення БОС — від ноутбука через *USB* кабель. На рис. 2 подано вікно візуалізації за реєстрованих сигналів. До складу БОС входить мікросхема *ADAS1000* (*Analog Devices*), яка забезпе-

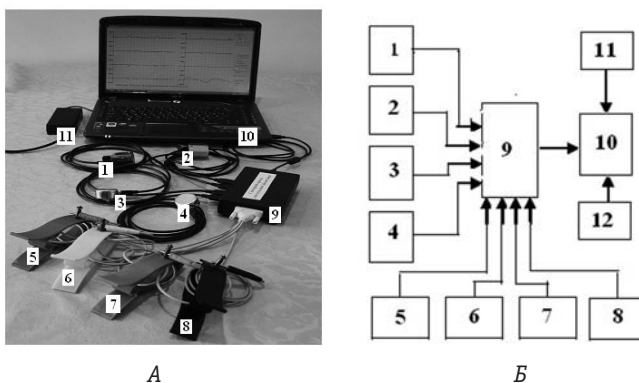


Рис. 1. Загальний вид (А) та блок-схема (Б) приладу: 1,2 — оптичні пальцеві головки; 3,4 — оптичні плоскі головки; 5—8 — ЕКГ електроди; 9 — блок опрацювання сигналів (БОС); 10 — ноутбук; 11 — адаптер живлення, 12 — програма «Pulse wave»
Fig. 1. General view (A) and flow chart (B) of device: 1,2 — optical finger heads; 3,4 — optical flatheads; 5—8 — ECG electrodes; 9 — signal processing unit (SPU); 10 — notebook; 11 — power adapter; 12 — software «Pulse wave».



Рис. 2. Вікно візуалізації зареєстрованих сигналів
Fig. 2. Window of visualization of registered signals

чує підсилення, фільтрацію, перетворення в цифровий 19 розрядний код та його передавання за стандартним послідовним інтерфейсом *SPI* в мікроконтролер *AT91SAM512* (*Atmel*). Мікроконтролер керує *ADAS1000* та передає оцифрований сигнал у ПК через убудований порт *USB*.

Цифрове опрацювання результатів дозволяє виконувати розрахунок параметрів та оцінку стану судин, зробити як діагностичні, так і прогностичні висновки, включаючи наявність та ступінь ендотеліальної дисфункції [7].

Роботу БОС та опрацювання сигналів детально розглянуто у [8—10]. На рис. 2 наведено вид вікна візуалізації 6 ЕКГ (I, II, III, *aVR*, *aVL*, *aVF*) та 2 пульсометричних (ПВ1,ПВ2) сигналів, де користувач може змінювати масштаб сигналів та кількість відведень.

**РОЗРОБЛЕННЯ
МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

Для проведення ДМА потрібно створити та відкалібрувати робочий еталон оптичного випромінювання з використанням еталонного вимірювача оптичної потужності (ЕВП) та застосувати метод заміщення шляхом непрямого вимірювання з порівнянням до зрівноваження вихідних величин [11]. Для цього потрібно виконати такі етапи:

1. Створити ЕВП (оптичний ватметр) на довжини хвиль: 525, 630, 850 нм, — у діапазоні від -30дБм до 3 дБм.
2. Провести ДМА зазначеного ЕВП [2].
3. Вибрати робочий еталон оптичного випромінювання.
4. Виготовити стенд для калібрування робочого еталона.
5. Провести калібрування робочого еталона за допомогою ЕВП (оптичного ватметра).
6. Провести калібрування приладу за допомогою відкаліброваного робочого еталона.
7. Обчислити калібрувальні залежності згідно з пунктами 5 та 6.
8. Обчислити калібрувальну залежність вихідного сигналу приладу від потужності як параметрично задану функцію від каліброваних залежностей згідно з пп.5 та 6.
9. Виготовити комплект каліброваних світлофільтрів на довжині хвилі 630 нм.
10. Повірити світлофільтри в ННЦ «Інституті метрології» (м. Харків).
11. Створити стенд та погодити методику ДМА.
12. Провести ДМА фотоплетизмографа.
13. Орпацювати результати ДМА та градуювати прилад.

КАЛІБРУВАННЯ РОБОЧОГО ЕТАЛОНА

Як робочий еталон взято оптичний випромінювач світла — світлодіод LUR 3333/H (фірма Agilent Technologies), оскільки він використаний в оптичних головках. Як ЕВП використано «Вимірювач середньої потужності оптичного випромінювання IT 703S», створений в ІК НАНУ; його ДМА проведено в ННЦ «Інститут метрології», м.Харків, (Св во № 8812 від 08.10.2013 р.) [1]. Структуру та вид стенда для калібрування наведено на рис. 3.

Процедура калібрування робочого еталона оптичної потужності здійснюється шляхом подавання регульованого струму заданих значень у діапазоні (2,7—6) мА із джерела живлення 2 на світлодіод 1. Із дисплея ЕВП зчитуємо показники та заносимо у таблицю; вимірювання проводили 5 разів та обчислювали середнє значення. Результати наведено у табл. 1 та на рис. 4.

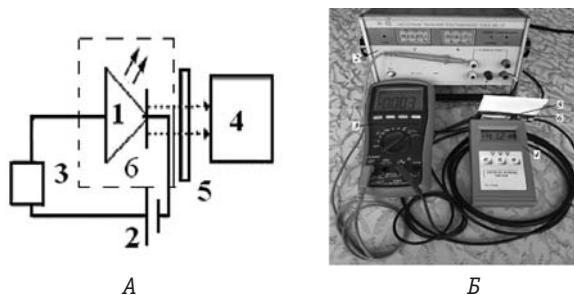


Рис. 3. Схема (а) та вид (б) стенду для калібрування робочого еталона (за подавання 3мА): 1 — оптичний випромінювач — світлодіод LUR 3333/H; 2 — джерело живлення постійного струму B5 47; 3 — мультиметр Voltcraft M 3890D фірми «ELV Electronic AG»; 4 — ЕВП IT 703S; 5 — оптичний атенюатор з матової кальки типу Dп6542 фірми Xerox. 6 — тримач зі світлодіодом (див.рис. 6)

Fig. 3. Flow chart (A) and view (B) of test bench for calibration of working measure (during supplying current 3mA): 1 — optical generator — LED LUR 3333/H; 2 — DC power supply B5 47; 3 — multimeter Voltcraft M 3890D (company «ELV Electronic AG»); 4 — standard device for optical power measurement IT 703S; 5 — matte film optical attenuator of Xerox Dp6542 type, 6 — LED holder (see Fig. 6)

зоні (2,7—6) мА із джерела живлення 2 на світлодіод 1. Із дисплея ЕВП зчитуємо показники та заносимо у таблицю; вимірювання проводили 5 разів та обчислювали середнє значення. Результати наведено у табл. 1 та на рис. 4.

Табл.1. Результати вимірювань оптичної потужності світлодіода (у мкВт)

Table 1. Measurement results of the optical power of LED

№ спостереження	Струм живлення, мА				
	2,7	3,0	4,0	5,0	6,0
1	178,4	214,8	507,1	744,2	955,1
2	178,8	215,1	508,2	743,6	954,8
3	178,6	215,3	507,8	742,8	953,9
4	178,8	216,2	507,2	742,5	954,4
5	178,4	216,1	507,7	743,4	954,3
Середнє	178,4	215,5	507,4	743,3	954,5

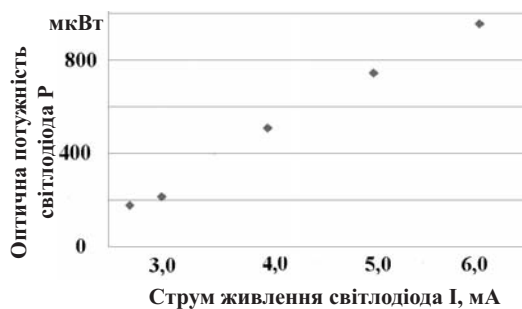


Рис.4. Залежність потужності світлодіода від струму його живлення

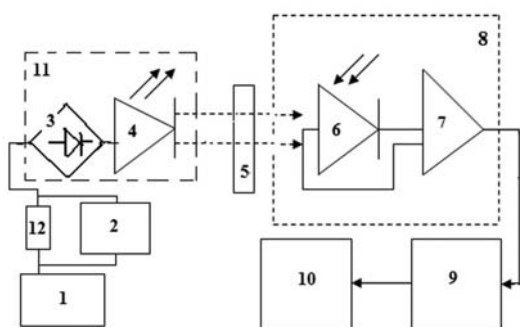
Fig.4. Dependence of the LED power on its supply current

КАЛІБРУВАННЯ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФА

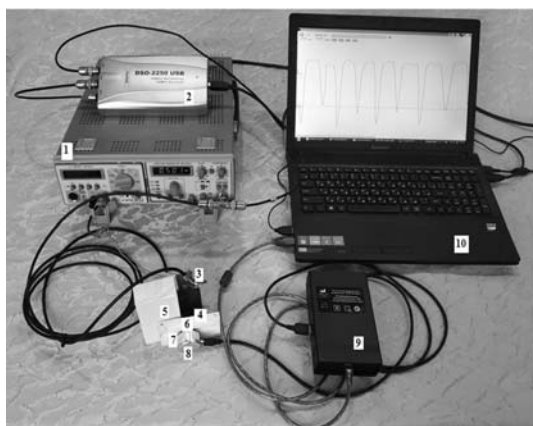
У стенді калібрування фотоплетизмографа (рис. 5) використано світлодіод як калібрований ви промінювач світла, описаний у попередньому пункті.

Стенд для калібрування (рис.5) включає такі частини: генератор функціональний FG HM8030 5; цифровий USB осцилограф Hantek DSO 2250; двонапів періодний випрямляч із 4 діодів КД 521; калібрований світлодіод; оптичний фільтр Cokin U 960 A PRO ND Gradaal kit Z Series — з розмірами (5x10x1,5) см; фотоприймач OPT 101; підсилювач сигналу LM258P DIP 8; оптична головка; БОС; ноутбук.

Робота стенда така: за допомогою генератора сигналів FG HM8030 5 вибираємо сигнал у виді



А



Б

Рис. 5. Схема (а) та вид (б) стенда для калібрування фотоплетизмографа:

1 — генератор сигналів FG HM8030 5; 2 — цифровий USB осцилограф Hantek DSO 2250; 3 — двонапівперіодний мостовий випрямляч (див. рис. 6); 4 — калібрований світлодіод; 5 — оптичний фільтр; 6 — фотоприймач; 7 — підсилювач сигналу; 8 — оптична головка; 9 — БОС; 10 — ноутбук; 11 — тримач (див. рис. 6); 12 — резистор

Fig. 5. Scheme (A) and view (B) of test bench for calibration of photoplethysmograph:

1 — signals generator FG HM8030 5; 2 — digital USB oscilloscope Hantek DSO 2250; 3 — two semipreiod bridge rectifier (see Fig.6); 4 — calibrated LED; 5 — optical filter; 6 — photodetector; 7 — signal amplifier; 8 — optical head; 9 — USP; 10 — notebook; 11 — holder (see Fig.6); 12 — resistor

Табл. 2. Результати калібрування приладу за допомогою світлодіода

Table 2. Calibration results of device using LED

№ спостереження	Струм живлення, мА				
	2,7	3,0	4,0	5,0	6,0
1	307,8	352,8	601,7	854,8	1057,6
2	307,7	353,7	600,8	853,8	1057,7
3	306,8	353,2	601,3	854,7	1057,8
4	307,5	351,8	601,4	854,7	1057,4
5	307,2	352,0	601,8	854,5	1057,5
Середнє	307,4	352,5	601,4	854,5	1057,4

синусоїди з частотою 0,5 Гц. Далі сигнал живлення надходить через випрямляч 2 (рис.6) для отримання на виході в 2 рази менших амплітуд напруги на світлодіод 4. Світлодіод генерує оптичне випромінювання, яке через світлофільтр 5 надходить на оптоелектронний перетворювач 8 та БОС приладу 9; далі цифровий сигнал надходить у ПК 10. Оптична головка 8 через USB роз'єм з'єднується з електронним блоком приладу ФПГ 9, який через USB кабель приєднується до ноутбука 10 [9].

Діапазон струму для світлодіода (2,7—6) мА. Струм світлодіода задається резистором 12

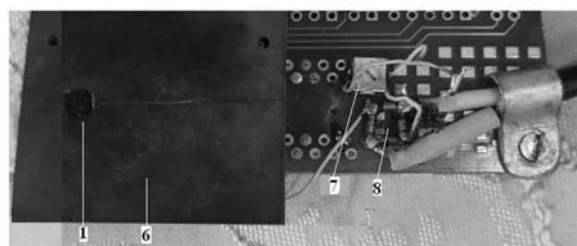


Рис. 6. Тримач зі світлодіодом: 1 — світлодіод; 6 — тримач; 7 — резистор для налаштування 1 кОм; 8 — двохнапівперіодний мостовий випрямляч із 4 діодів КД 521

Fig. 6. Holder with LED: 1 — LED; 6 — holder; 7 — 1 kOhm resistor for setting; 8 — two semipreiod bridge rectifier with 4 diodes KD 521

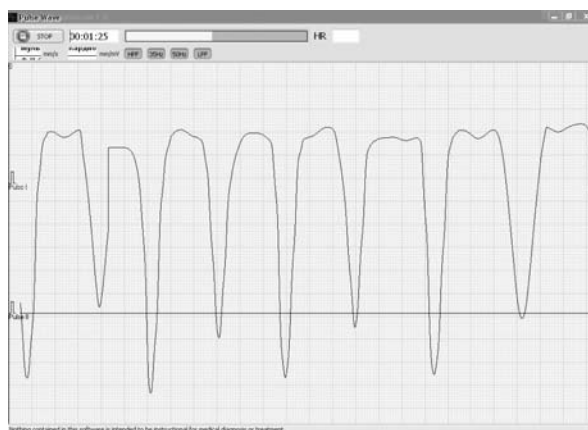


Рис. 7. Вид вихідного сигналу під час калібрування
Fig. 7. View of output signal during callibration

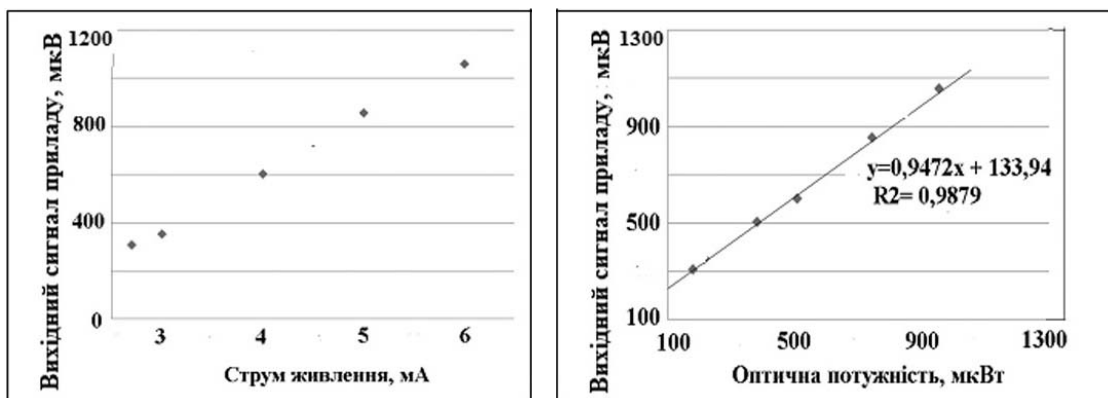


Рис. 8. Залежність вихідного сигналу приладу від струму живлення світлодіода (А) та калібрувальна залежність вихідного сигналу приладу від оптичної потужності (В)
 Fig. 8. Dependence of the device output signal from LED supply current (A) and the calibration dependence of the device output signal from optical power (B)

на 100 Ом та обчислюється згідно із законом Ома на осно ві амплітуди напруги на ре зисторі, що вимірюється осци лографом 2. Графік калібро ва ного сигналу 3 мА наведено на рис. 7.

Світло зі світлодіода реє струє ОЕП оптичної головки 8, при цьому обидва її світлодіо ди заклеєні світлонепроникною плівкою. Для роботи стенда по трібно забезпечити оптичну потужність у робочому діапа зоні ОЕП. Для цього використо вуємо оптичний фільтр 5, який розміщується між світлодіодом і оптичною головкою, які при тискають до фільтра з обох бо ків. Вимірювання проводять 5 разів, результати вимірювань вихідного сигналу приладу АПХ (мкВ) від струму живлен ня світлодіода наведені в табл. 2 та на рис. 8.

Обчислюємо калібрувальну залежність вихідного сигналу приладу від потужності світло діода (рис. 9) як параметрично задану функцію від калібро ваних залежностей потужнос ті світлодіода від струму його живлення (рис. 4) та залежнос ті вихідного сигналу від струму живлення світлодіода (рис. 8).

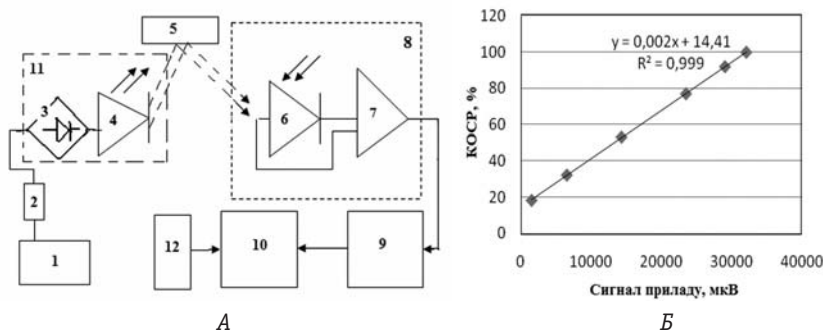


Рис. 9. Блок схема стенда для ДМА (а) та градувальна залежність КОСР від сигналу фотоплетизмографа (б):

- 1 — генератор сигналів ГЗ 109; 2 — резистор; 3 — двонапівперіодний випрямляч (рис.6); 4 — світлодіод LUR 3333H; 5 — еталонний світлофільтр із набору КНС 01; 6 — оптоелектронний перетворювач; 9 — БОС приладу; 10 — ПК; 12 — ПЗ Pulse Wave

Fig. 9. Scheme of test bench for State Metrological Certification (A) and calibration dependence of inverse light scattering coefficient from output signal of device (B): 1 — signal generator G3 109; 2 — resistor, 3 — two semipreiod rectifier (Fig.6); 4 — LED LUR 3333H; 5 — optical filter from KNS 01 set; 6 — optical electronic transformer; 9 — Signal processing unit of device; 10 — PC; 12 — PulseWave software.

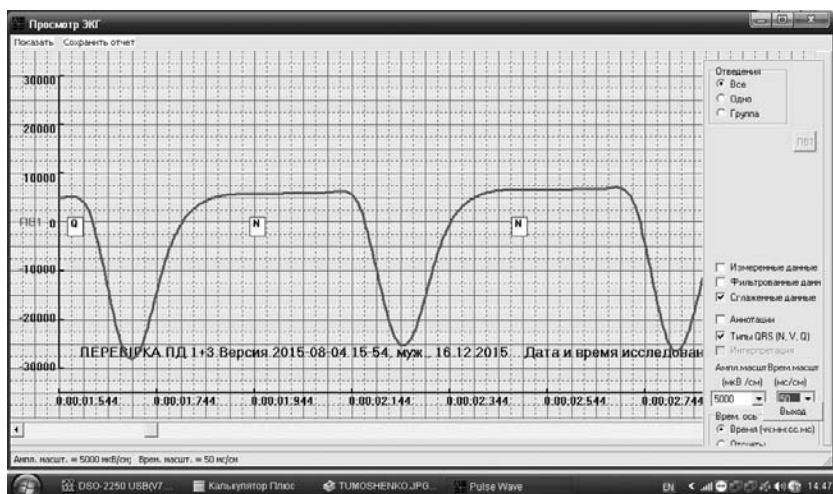


Рис. 10. Залежності вихідного сигналу в мкВ від часу за КОСР = 100 %
 Fig. 10. Time dependence of output signal in mкV if «Inverse light scattering coefficient» = 100 %

Табл. 3. Залежність вихідного сигналу в мкВ від КОСР за результатами ДМА

Table.3. Dependence of output signal in mkV on the «Inverse light scattering coefficient» based on results of State Metrological Certification

№ спо стере ження	КОСР, %					
	18,0	31,6	53,0	77,4	91,9	100,0
1	1482	6496	14264	23444	29001	32031
2	1485	6492	14269	23449	29006	32029
3	1477	6497	14265	23450	29004	32035
4	1484	6500	14270	23445	29007	32034
5	1486	6499	14272	23451	29008	32033
Середнє	1482,8	6496,2	14268,0	23447,8	29005,2	32032,4

ДЕРЖАВНА МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ

Методика атестації включає визначення діапазону та границь абсолютної похибки вимірювань відносного коефіцієнта оберненого світлорозсіювання (КОСР) на 630 нм. Стенд включає генератор сигналів ГЗ 109 1, еталонний світлофільтр 3, по передньо калібрований світлодіод 4 (рис. 9), інші компоненти, аналогічні стенду для калібрування приладу в Інституті кібернетики НАНУ (рис. 5), а USB осцилограф вилучено (рис. 4). Світлодіоди в оптичній головці також заклеєні для уникнення світла від них. Застосовано комплект 6 ти еталонних коригувальних світлофільтрів КНС 01 (довжина хвилі (630 ± 5) нм, напівширина пропускання 10 нм) в діапазоні КОСР (15—100) %, які входять до складу Вторинного еталона України одиниць спектральних коефіцієнтів спрямованого пропускання в діапазоні довжин хвиль $(0,2—2,5)$ мкм, дзеркального та дифузного відбиття в діапазоні довжин хвиль $(0,2—0,9)$ мкм (ВЕТУ 11 09 01 08, ДП «Укрметртестстандарт»).

Стенд працює у такий спосіб: за допомогою генератора сигналів ГЗ 109 (1) задаємо синусоїдальний сигнал з частотою 0,5 Гц. Струм світлодіода за дається резистором 2 на 100 Ом та обчислюється згідно із законом Ома на основі вихідної напруги генератора 1. Далі робота стенда аналогічна такому ж для калібрування приладу в Інституті кібернетики НАНУ (рис. 5), але оптичний фільтр 5 відбиває світлове випромінювання. Результати ДМА відображено на рис. 10 та у табл. 3.

Визначено границю допустимої абсолютної похибки: 2 % в діапазоні вимірювань відносного КОСР (15—100) %. Градувальна залежність фотоплетизмографа, а саме, залежність КОСР від розмаху амплітуди вихідного сигналу АПХ наведена на рис. 9б.

З великою точністю вона має вид лінійної залежності КОСР від розмаху вихідного сигналу приладу

$$\text{КОСР [\%]} = 2,679 \cdot 10^{-3} \text{ АПХ [мкВ]} + 14,247. \quad (1)$$

Розроблено методику повірки приладу, яка включає такі етапи:

1. Перевірка діапазону та границь абсолютної похибки вимірювань відносного КОСР для випромінювача світла на довжині хвилі 630 нм.

2. Діапазон вимірювання відносного КОСР для довжини хвилі 630 нм повинен міститися у межах (15—100) %.

3. Границі допустимої абсолютної похибки вимірювання відносного КОСР повинні бути не більше 2,0 %.

4. Результати повірки вважають позитивними, якщо вимірені значення діапазону та границь допустимої абсолютної похибки відносного КОСР відповідають вимогам п.п. 2 та 3.

5. Кожен прилад, який пройшов прийнятно здавальні випробування з позитивними результатами, підлягає первинній повірці згідно з вимогами стандартів [12, 13].

6. Обсяг первинної повірки під час випуску приладу та вторинної повірки в процесі експлуатації узгоджується виробником та організацією, яка має сертифікат для проведення повірки.

ВИСНОВКИ


Наведено результати розроблення метрологічного забезпечення для приладів, які поєднують функції пульсометрів та ЕКГ. Створено ряд дослідних зразків, які мають 6 ЕКГ та 4 пульсометричні канали, виконано їх ДМА. Такий ЗВТ реєструє ЕКГ та пульсову хвилю, що дає змогу проводити комбіновану діагностику серця та судин. У розвиток створено модифікацію, яка має 12 ЕКГ та 2 пульсометричних канали.

ДМА проведено 25.10.2015 у відділі 37 Метхім енерготесту ДП «Укрметртестстандарт» (керівник Тимошенко Я.М.). У результаті на 630 нм визначено границі допустимої абсолютної похибки: 2 % в діапазоні вимірювань відносного КОСР (15—100) %. Обчислено градувальну криву як залежність відносного КОСР від розмаху амплітуди пульсової хвилі. Отримано 2 свідоцтва про ДМА:

1) Фотоплетизмограф 4 каналний комп'ютерний (портативний), №37 472/15 від 29.10.2015.

2) Прилад для комбінованої ЕКГ та пульсової діагностики КПЕФД 01, №37 473/15 від 29.10.2015.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Ходаковський М.І. (2017) Забезпечення єдності вимірювань в біомедичних оптичних приладах / М.І. Ходаковський, М.М.Будник, Т.С. Лебедева та ін. // *Метрологія та прилади* (Khodakovskiy M.I. (2017) Assurance of uniformity of measurements in biomedical optical measuring instruments/M.I. Khodakovskiy, M.M. Budnyk, T.S. Lebedeva at al. // *Metrology and instruments*). № 1. — С/Р. 25—36.
2. Ходаковський М.І. (2017) Оптичні вимірювання для неінвазивної гемоглобінометрії / М.І.Ходаковський, М.М.Будник, Т.М.Риженко та ін. // *Український метрологічний журнал* (Khodakovskiy M.I. (2017) Optical measurements for non invasive hemoglobinometry / M.I.Khodakovskiy, M.M. Budnyk, T.M. Ryzhenko at al. // *Ukrainian Metrology Journal*). — № 4. — С/Р. 53—64.
3. Ходаковський М.І. (2017) Розроблення метрологічного забезпечення рефрактометричних вимірювань на основі поверхневого плазмонного резонансу / М.І.Ходаковський, М.М.Будник, Т.С.Лебедева та ін. // *Метрологія та прилади* (Khodakovskiy M.I. (2017) Metrological Maintenance Developed for Refractometric Measurements Based on the Surface Plasmon Resonance / M.I. Khodakovskiy, M.M. Budnyk, T.S. Lebedeva at al. // *Metrology and instruments*). — № 5. — С/Р. 25—31.
4. ДСТУ 2595 94. Прилади вимірювальні та апаратура для функціональної діагностики. Терміни та визначення. — Київ. Держстандарт України (DSTU 2595 94 *Measuring instruments and equipment for functional diagnostics. Terms and Definitions*. — *Kyiv. State Standard of Ukraine*). — 1994. — 61 с/р.
5. Класифікатор ЄСКД. Електронний ресурс (Classifier of «Unified system for design documentation». Electronic source) — www.libussr.ru/doc_ussr/usr_10041.htm.
6. Риженко Т.М. Класифікація сенсорних приладів / Біологічна і медична інформатика та кібернетика (БМІК 2014), науково технічна школа семінар. 2014 р. — Київ (Ryzhenko T.M. Classification of sensor devices // *Biological and medical Informatics and Cybernetics* (BMIC 2014), scientific technical school seminar. — *Kyiv*). — 2014. — С/Р. 33—36.
7. Дегтярук В.І. (2014) Пульсові процеси в серцево судинній системі людини та їх використання для діагностики // *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. — 36. наук. праць Ін ту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України (Degtjaruk V.I. (2014) Pulse processes in the human cardiovascular system and their use for diagnosis // *Computer tools, networks and systems*. — Scientific issue of V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine). — № 13. — С/Р. 43—52.
8. Дегтярук В.І. (2018) Розробка фотометричних приладів для пульсометрії/ В.І. Дегтярук, М.М. Будник, М.І. Ходаковський та ін. // *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського* (Degtjaruk V.I. (2018) Development of photometric instruments for pulsometry / V.I. Degtjaruk, M.M. Budnyk, M.I. Khodakovskiy at al. // *Science Ntes of V.I. Vernadsky Taurida National University*). — Т/Vol. 29(68), № 5. — С/Р. 41—52.
9. Дегтярук В.І., Ходаковський М.І. (2014) Метрологічна атестація фотоплетизмографа / Біологічна і медична інформатика та кібернетика (БМІК 2014), науково технічна школа семінар. — Київ (V.I. Degtjaruk, M.I. Khodakovskiy. (2014) Metrological certification of photoplethysmograph // *Biological and medical Informatics and Cybernetics* (BMIC 2014), scientific technical school seminar. — *Kyiv*). — С/Р. 125—129.
10. Дегтярук В.І. Розробка приладів для неінвазивної пульсометрії / В.І. Дегтярук, М.І. Ходаковський, І.А.Чайковський та ін. // *Міжнародна науково практична конференція «Інформаційні системи і технології в медицині» (ISM 2018)* (Degtjaruk V.I. Development of devices for non invasive pulsometry / V.I. Degtjaruk, M.I. Khodakovskiy, I.A. Chaykovskyy at al. // *International scientific and practical conference «Information systems and technologies in medicine»*, (ISM 2018) Nov 28 30, 2018. — *Kharkiv*). — С/Р. 41—52.
11. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Ігнатенко О.Г., Войтович О.П. (2006) Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ (Podzharenko V.O., Kulakov P.I., Ignatenko O.G., Voitovych O.P. (2006) Fundamentals of Metrology and Measuring Technique. Textbook. — *Vinnitsia: VNTU*). — 151 с/р.
12. ДСТУ 3394 96. Метрологія. Державна повірна схема для засобів вимірювань світлових величин. — Київ. Держстандарт України (DSTU 3394 96. *Metrology. State verification scheme for means of measuring light values*. — *Kyiv. State standard of Ukraine*).—1996.— 12 с/р.
13. ДСТУ 3387 96. Метрологія. Державна повірна схема для засобів вимірювань потужності слабких імпульсних світлових потоків випромінювання від 10^{-6} до 10^{-2} Вт в діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 1,6 мкм. — Київ. Держстандарт України (DSTU 3387 96. *Metrology. State verification schedule for means measuring power of weak pulse light radiation fluxes from 10^{-6} to 10^{-2} W within the wavelength range from 0.4 to 1.6 μm* . — *Kyiv. State standard of Ukraine*). — 1996. — 10 с/р. 

Отримано / received: 17.07.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.О. Яценком (Україна).
Prof. V.O. Yatsenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307 2180(4)2019.17 23

УДК 621.396.96

КОМПЕНСАЦІЯ БАГАТОПРОМЕНЕВИХ ПЕРЕШКОД У РОЗНЕСЕНИХ ПАСИВНИХ СИСТЕМАХ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ ТА ЧАСТОТИ

Compensation of Multipath Interference in a Separated Passive Time and Frequency Synchronization Systems



О. Костиця, доктор технічних наук, начальник науково дослідної лабораторії, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна, e mail: kaa1958@i.ua

В. Стороженко, аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e mail: verun.mak@gmail.com

В. Науменко, інженер з комп'ютерних технологій, Обласна спеціалізована школа інтернат «Обдарованість», Харків, Україна, e mail: naumenkovn@rambler.ru

O. Kostyria, doctor of technical sciences, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine, e mail: kaa1958@i.ua

V. Storozhenko, postgraduate, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e mail: verun.mak@gmail.com

V. Naumenko, computer engineer, Regional specialized boarding school «Gifted», Kharkiv, Ukraine, e mail: naumenkovn@rambler.ru

Розглядаються питання функціонування пасивних систем синхронізації часу та частоти за умов впливу багатопроменевих перешкод (БПП), вплив наявності багатопроменевого сигналу на точність синхронізації в таких системах. Обґрунтовується можливість компенсації завадової складової у сигналах інших пунктів. Наводяться математичні моделі блоків компенсації багатопроменевої перешкоди за часового і спектрального подання сигналів.

Multipath propagation of radio waves negatively affects to the performance of telecommunications and radio navigation systems [1, 3]. When

performing time and frequency synchronization tasks of spatially separated standards, the multipath signal propagation aggravates the probability of a correct synchronization and introduces an error. The presence of a multipath signal reduces the signal-to-noise ratio in the received signal, which in turn causes an increase in the synchronization error. The mathematical models of multipath interference suppression in the time and in the frequency domain are presented in the article. Compared to time processing, processing in the frequency domain reduces computational costs. The operation of suppression in the time domain has been verified experimentally.

Ключові слова: багатопроменева завада (БПЗ), загальне джерело (ЗД), частотно-часова синхронізація (ЧЧС), багатопозиційна пасивна система синхронізації (БПСС), взаємно-кореляційна функція (ВКФ), розповсюдження радіохвиль (РРХ).

Keywords: multipath interference (MPI), common source (CS), time-frequency synchronization, multipositional passive synchronization system (MPSS), inter-correlation function (ICF), radio wave propagation (RWP).

Частотно часова синхронізація з використанням сигналу спільного джерела (СД) передбачає приймання в головному (первинному) і другорядних (вторинних) пунктах радіосигналу довільного випромінювача за відомих з достатньою точністю відстаней від джерела сигналу до пунктів [1, 3]. Як такі джерела можуть використовуватися передавачі наземних і космічних телекомунікаційних систем, систем теле і радіомовлення, радіонавігаційних систем тощо, які використовують різноманіття частотних діапазонів і видів радіосигналів. Оскільки така система не містить випромінювальних пристроїв і складається із декількох просторово рознесених



О. Костиця



В. Стороженко



В. Науменко

приймальних пунктів, вона отримала назву багатопозиційної пасивної системи синхронізації (БПСС) [2].

Метою статті є дослідження впливу БПП на канал зв'язку в просторово рознесеній системі синхронізації часу та частоти, а також можливості компенсації БПП у частотній і часовій областях з використанням відомих математичних методів опрацювання сигналів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Для довільного сигналу СД величина зсуву шкал часу в БПСС визначається за результатами взаємного кореляційного опрацювання m сигнальних вибірок, у кожній із яких міститься по i відліків. Тобто, аналізу підлягає діагональна матриця взаємних кореляційних функцій (ВКФ) розмірністю $(m \times m)$ [2]:

$$B^{AB}[\tau] = M \{U_m^{AB}[i + \tau]U_m^{B*T}[i]\} = \begin{bmatrix} B_{11}^{AB} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & B_{mm}^{AB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

і в формуванні ВКФ беруть участь тільки ідентичні фрагменти сигналу СД; тому всі елементи такої матриці, окрім діагональних, дорівнюють нулю. Для кожної з ВКФ визначається часове положення її максимуму, яке далі бере участь у статистичному опрацюванні результатів вимірювань і формуванні результувальної оцінки порівняння шкал часу етапів.

У будь-яких інформаційно вимірювальних системах неминуче присутні джерела похибки синхронізації, які, виходячи з прийнятої в теорії інформаційно вимірювальних систем термінології, можна класифікувати за причинами появи [4]:

- 1) сигнали перешкод (потенційні шумові), зумовлені кінцевим значенням відношення сигнал / шум;
- 2) трасові (канальні), що залежать від характеристик каналу поширення радіохвиль (ПРХ);
- 3) апаратурні;
- 4) динамічні, зумовлені мінливістю вимірюваної величини;
- 5) алгоритмічні.

Одним із джерел трасових похибок синхронізації є багатопоменевість ПРХ [5]. Багатопоменевість у БПСС виникає під час приймання антеною одночасно прямого сигналу СД та сигналу, відбитого від навколишніх її поверхонь (місцевих предметів). У технічній літературі [3—6] аналізуються різні аспекти прояви багатопоменевості, особливо пильну увагу приділено проблемі зниження впливу багатопоменевості в телекомунікаційних системах і глобальних навігаційних системах синхронізації (ГНСС) у зв'язку з їх широким повсюдним використанням.

Потрібно зазначити, що для зниження впливу багатопоменевості в телекомунікаційних системах приймається комплекс заходів, пов'язаних з оптимізацією роботи стаціонарної приймально-передавальної апаратури. Для рухомих об'єктів, якими, як правило, є споживчі термінали, застосовуються різні методи завадостійкого кодування. Усунення інтерференційних завмирань сигналу, міжсимвольної інтерференції, інших небажаних проявів багатопоменевості ПРХ здійснюється внаслідок інформаційної надмірності, яку дає спеціальне кодування [7].

Особливість функціонування БПСС за використання телекомунікаційних сигналів полягає в тому, що повне декодування сигналу СД не проводиться: це, найчастіше, і не є можливим за закритого передавання даних [8, 9]. Тому реалізація переваг завадостійкого кодування для БПСС не може бути застосована, що вимагає розроблення таких методів компенсації багатопоменевості ПРХ, які враховували б особливості роботи пасивної системи синхронізації й були б достатньою ефективними.

Ідея компенсації радіоперешкод вперше була висловлена академіком Н.Д. Папалексі в його книзі «Перешкоди та боротьба з ними», виданій у 1942 році. У цій книзі завдання щодо компенсації радіоперешкод поставлено і вирішено у такий спосіб. Окрім основного приймача, що реагує на суміш сигналу і завади, використовується додатковий (компенсаційний) приймач, антена якого приймає тільки перешкоди. Інтенсивності й фази перешкод у компенсаційному та основному приймачах установлюються однаковими і протилежними, відповідно. У результаті, як стверджується у [7], перешкода на виході основного приймача компенсується, а корисний сигнал залишається неспотвореним.

Такі постановка і розв'язання задачі щодо компенсації перешкод є класичними і повністю відповідають випадку, коли основний і компенсаційний приймачі здійснюють лінійні перетворення діючих сигналів і завад [10].

Наявність багатопоменевості сигналу знижує відношення сигнал/шум у прийнятому сигналі СД, що, в свою чергу, викликає збільшення похибки синхронізації [11]. Якщо час затримки додаткового променя (променів) менше тривалості сигнальної вибірки, то приймання сигналу ще більше ускладнюється наявністю частково корельованої перешкоди, рівень і ступінь кореляції якої збільшується за зменшення часу затримки і може призвести до збільшення ймовірності помилкової синхронізації. На рис. 1,а представлено показана ВКФ сигналних вибірок за наявності в одному із пунктів додат

кового променя перешкоди [2]. На рис. 1,б подано накладені спектри пари сигнальних вибірок (миттеві спектри): спектр сигналу без перешкоди, який відображений чорним кольором і має меншу інтенсивність; спектр сигналу з багатопроменевою перешкодою (сірий колір), який зосереджений у тій же смузі частот і незначно відрізняється від спектра «чистого» сигналу. Із аналізу цього рисунка випливає, що використання частотної фільтрації для усунення БПП неможливе і потрібно вживати спеціальні заходи для виключення впливу перешкоди.

На рис. 2 подано результати опрацювання всіх сигнальних вибірок за умов багатопроменевої задачі. На рис. 2,а у виді точкового масиву представлено результати розрахунків відповідно до виразу (1), а на рис. 2,б ці ж результати подано у виді гістограми поблизу істинного значення.

На рис. 2,а поблизу позначки «+10» за вертикальною віссю згруповано відліки, зумовлені сигналом додаткового променя. Абсолютні значення цих відліків мали максимальні значення, і тому ці відліки було визначено як справжні. Отже, повинна виконуватися перевірка на істинність, оскільки результат

звірення є прогнозованим значенням. Із рис. 2,б випливає, що через вплив сигналу перешкоди має місце неоднозначність у визначенні результату звірення (ВКФ має два практично однакових максимальних значення, місце розташування яких не відповідає істинному результату порівняння шкал часу еталонів), і для її усунення сигнал перешкоди необхідно компенсувати.

Тому розроблення теоретичних і практичних підходів для зниження впливу багатопроменевої сигналу спільного джерела на точність синхронізації в БПСС, а також експериментальна перевірка розроблених технічних рішень є важливим науково-прикладним завданням.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОКА КОМПЕНСАЦІЇ БАГАТОПРОМЕНЕВОЇ ПЕРЕШКОДИ В ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

Розглянемо найпростіший випадок, коли у звіренні беруть участь два еталона в пунктах А і В. Уважаємо, що під час приймання сигналу СД у пункті В спостерігається ефект багатопроменевої. Сигнал СД є безперервним, тому БПП діє на всьому

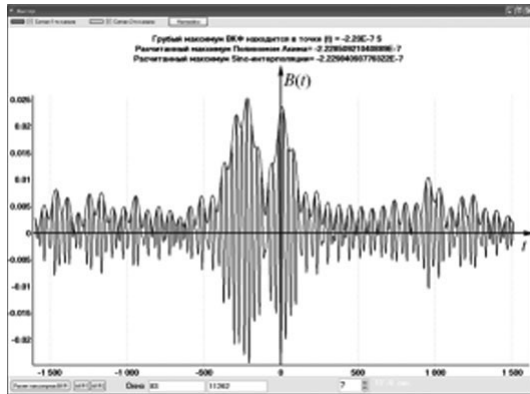


Рис 1,а. ВКФ сигнальних вибірок за наявності додаткового променя

Fig. 1,a. CCF of signal samples in the presence of an additional beam

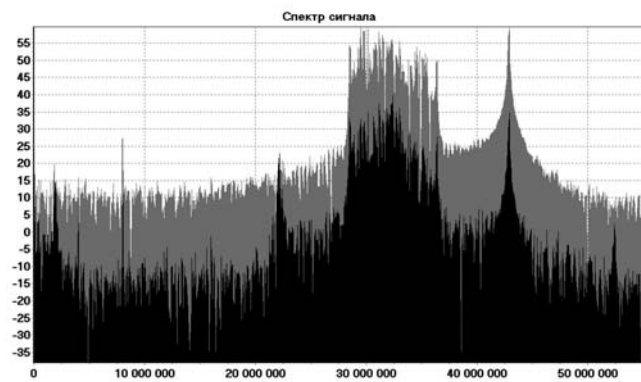


Рис. 1,б. Миттеві спектри OFDM сигналів ЗД за наявності БПП (сірий колір) та без БПП (чорний колір)

Pic 1,b. Instantaneous spectra of OFDM signals in case of presence of MPI (gray color) and without MPI (black color)

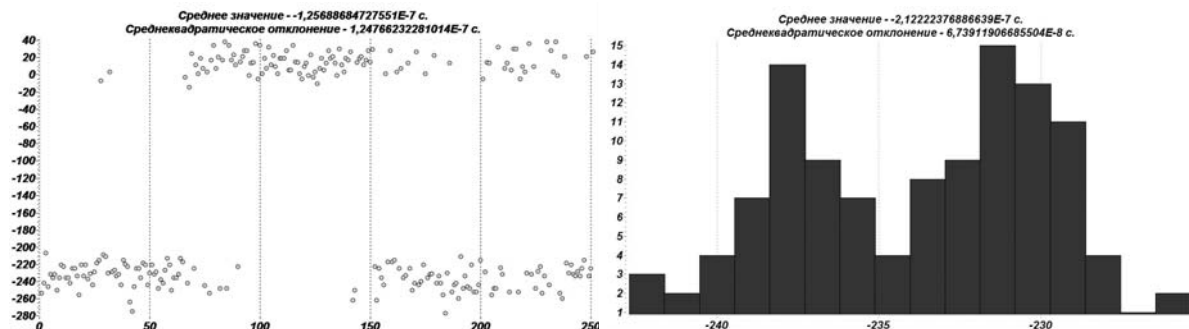


Рис. 2. Результати опрацювання сигналів ЗД за наявності багатопроменевої перешкоди

Fig. 2. Results of processing CS signals in the presence of multipath noise

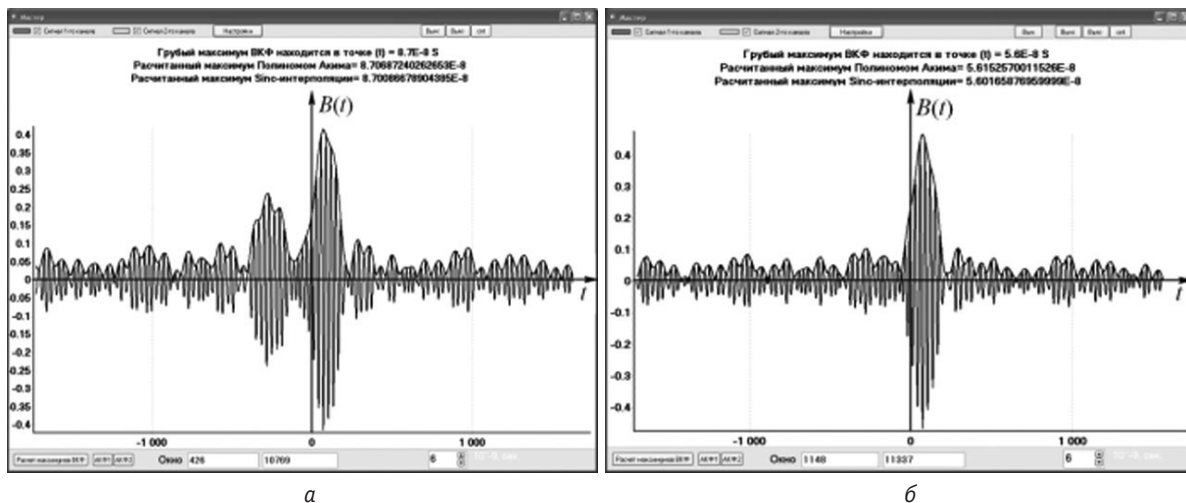


Рис. 3. ВКФ сигнальних вибірок з частковим подавленням (а) і повним подавленням (б) сигнальної складової
 Fig. 3. CCF of signal samples with partial suppression (a) and complete suppression (b) signal component

протязі сигнальної вибірки і не може бути усунена шляхом часового стробування. У цьому випадку такий сигнал можна представити у вигляді [8]:

$$U^B[i] = u^B[i] + \sum_{j=1}^m b_j u^B[i - \tau_j] + n^B[i], \quad (2)$$

де b_j — коефіцієнт ослаблення окремого додаткового променя;

τ_j — часова затримка променя;

m — кількість прийнятих додаткових променів.

Аналіз ВКФ (рис. 1,а) дозволяє визначити як часовий зсув кожного із додаткових променів, так і його рівень відносно до основного сигналу. Якщо в одному з приймальних пунктів БПЗ відсутня, то є можливим, записавши в другому, вільному від перешкоди, пункті сигнальну вибірку з необхідним часовим зсувом, після інвертування і вирівнювання амплітуди здійснити компенсацію сигнальної складової й виділити сигнал завади. За $\tau_j \leq \tau_{\text{кор}}$ ВКФ містить додаткові викиди, віддалені від головної пелюстки

на τ_j , як показано на рис. 1. Оскільки в обчисленні даної ВКФ беруть участь ідентичні фрагменти сигналу СД, тобто $u^A[i] \approx u^B[i]$ з точністю до фази, то, віднімаючи від $U^B[i]$ значення $U^A[i]$, отримуємо складову перешкоди сигналу в пункті В:

$$U^{Bn}[i] = U^B[i] - U^A[i] = u^B[i] + \sum_{j=1}^k b_j u^B[i - \tau_j] + n^B[i] - u^A[i] - n^A[i] = \sum_{j=1}^k b_j u^B[i - \tau_j] + n^B[i] - n^A[i]. \quad (3)$$

Виконання такої операції ілюструє рис. 3, на якому показано подавлення сигнальної складової в суміші сигналу і БПП, прийнятої в пункті В. Процес подавлення контролювався шляхом обчислення ВКФ сигналу з перешкодою і сигналу без перешкоди, прийнятих у пунктах, що синхронізуються. На рис. 3,а відображено випадок неповного, а на рис. 3,б — повного подавлення сигнальної складової.

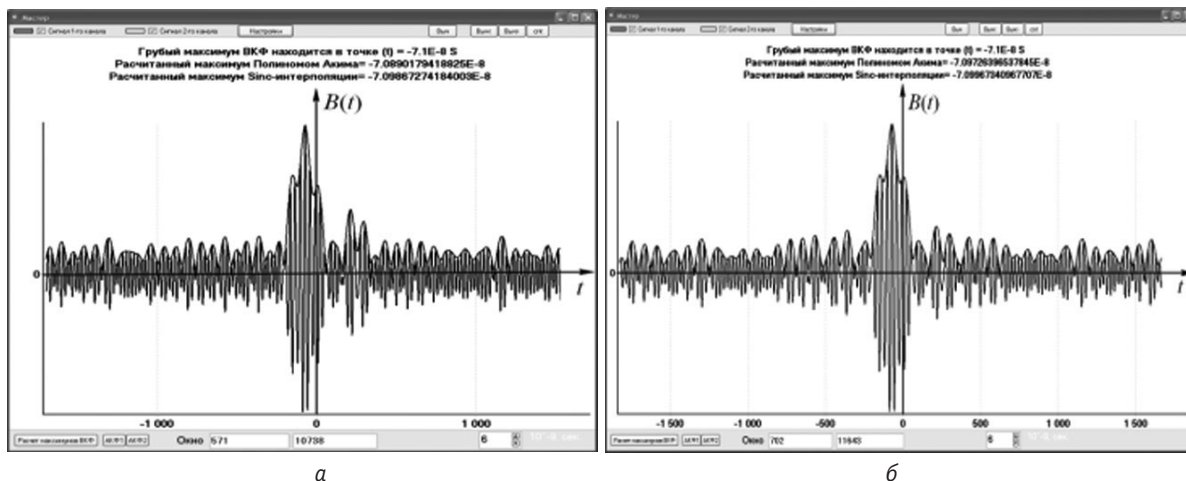


Рис. 4. ВКФ сигнальних вибірок з частковим подавленням (а) і повним подавленням (б) завадової складової
 Fig. 4. CCF of signal samples with partial suppression (a) and complete suppression (b) signal component

Отриману завадову складову тепер можна відняти від прийнятого в пункті B сигналу СД:

$$U^B[i] - U^{Bn}[i] = u^B[i] + n^A[i]. \quad (4)$$

Результат виконання цієї операції подано на рис. 4, де на рис. 4,а відображено випадок неповної, а на рис. 4,б — повної компенсації складової перешкоди сигналу СД.

Отримуємо результувальний сигнал пункту B , який використовуватиметься для обчислення ВКФ:

$$U^B[i] - U_n^B[i] = u^B[i] + n^B[i] - n^A[i], \quad (5)$$

тобто отримуємо сигнал, в якому багатопроменеву перешкоду скомпенсовано.

За порівняння ВКФ на рис. 1 і на рис. 4,б видно, що після подавлення БПП функція взаємної кореляції сигналів стала практично симетричною, має чітко виражений єдиний максимум; отже однозначність і достовірність результатів звірення еталонів забезпечується.

Для виконання операцій (2)—(5) необхідно здійснити відновлення обвідних сигналів СД з використанням перетворення Гільберта дискретних сигналів $S^A[t]$, $S^B[t]$ і отриманням квадратурних складових [9—11]:

$$\begin{cases} X^{A(B)} = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} y[t_{kl}] A[t_{kl}] \\ Y_{\perp}^{A(B)} = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} y[t_{kl} + T_0/4] A[t_{kl} + T_0/4], \end{cases}$$

де: $A[t]$ — дискретна огинаюча сигналу;

$y[t]$ — суміш сигналу і завади;

T_n — інтервал спостереження;

m — число відліків у сигнальній вибірці;

t_{kl} — поточний часовий відлік;

T_0 — період високочастотного заповнення радіо імпульсів.

Приймаємо $s^A[t] = X^A$, $s^B[t] = X^B$. Квадратурні складові цих сигналів отримуємо через перетворення Гільберта $Y_{\perp}^A = X^{GA}$, $Y_{\perp}^B = X^{GB}$.

Гільбертове перетворення в дискретній формі:

$$X^G[k] = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} X[n] / [k - n],$$

де $X^G[k]$ — комплексно спряжений сигнал; $X[n]$ — початковий сигнал.

Отже, дискретна обвідна сигналу та її фаза за $k = n$ у пунктах синхронізації A і B :

$$A^{A(B)}[k] = \sqrt{(X^{GA(B)}[k])^2 + (X^{A(B)}[k])^2}; \quad (6)$$

$$\varphi^{A(B)}[k] = \arctg \frac{X^{A(B)}[k]}{X^{GA(B)}[k]}. \quad (7)$$

Отримані за допомогою (6) і (7) дані дозволяють виконувати математичні операції (2)—(5).

Отже, для того, щоби компенсувати багатопроменеву перешкоду в сигналі спільного джерела пункту B у часовій області, необхідно виконати такі дії:

- визначити час затримки кожного із додаткових променів перешкоди за часовим положенням відповідних максимумів ВКФ;

- провести нормування (вирівнювання) амплітуд сигналів СД у приймальних пунктах шляхом порівняння оцінок максимумів ВКФ, отриманих від основного сигналу;

- від суміші сигналу і БПП відняти складову сигналу, використовуючи для цього сигнал пункту, в якому БПП відсутня, з урахуванням нормувального коефіцієнта k :

$$U_n^B[i] = U^B[i] - kU^A[i],$$

при цьому внаслідок підбору початкової фази кожної сигнальної вибірки необхідно забезпечити:

$$U_n^B[i] = U^B[i] - kU^A[i] \rightarrow \min$$

і отримати сигнал $U^B[i] - U_n^B[i]$, в якому скомпенсовано багатопроменеву перешкоду.

Отриманий масив сигнальних вибірок, в якому скомпенсовано БПП, далі використовується у виразі (1) для оцінки часового положення максимумів ВКФ, а, отже, для порівняння шкал часу еталонів у пунктах.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОКА КОМПЕНСАЦІЇ БАГАТОПРОМЕНЕВОЇ ПЕРЕШКОДИ В ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ

Компенсацію БПП також може бути виконано в частотній (спектральній) області. Для переходу в частотну область використовується відома операція перетворення Фур'є [12].

У результаті дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) масивів $U^B[i]$ і $U^A[i]$ отримуються реальні й уявні частини спектральних складових прийнятих сигналів СД [13].

$$\begin{aligned} y^{A(B)}(j\omega, m) &= \operatorname{Re}\{G^{A(B)}(j\omega, m)\} = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \left[u^{A(B)}(i) \cos \frac{mi}{N} + u_*^{A(B)}(i) \sin \frac{mi}{N} \right], \\ x^{A(B)}(j\omega, m) &= \operatorname{Im}\{G^{A(B)}(j\omega, m)\} = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \left[-u^{A(B)}(i) \sin \frac{mi}{N} + u_*^{A(B)}(i) \cos \frac{mi}{N} \right], \end{aligned}$$

де $m = 0, 1, \dots, N$; N — кількість відліків ДПФ.

За реальною та уявною частинами комплексного перетворення Фур'є можна обчислити миттєві амплітудно-частотні та фазо-частотні спектри сигналів (АЧС і ФЧС).

$$|G^{A(B)}(j\omega, m)| = \sqrt{[\operatorname{Re}\{G^{A(B)}(j\omega, m)\}]^2 + [\operatorname{Im}\{G^{A(B)}(j\omega, m)\}]^2};$$

$$\varphi^{A(B)}(\omega, m) = \arctg\left[\frac{\operatorname{Im}\{G^{A(B)}(j\omega, m)\}}{\operatorname{Re}\{G^{A(B)}(j\omega, m)\}}\right].$$

При цьому на спектр сигналу СД, прийнятого в пункті В, буде накладено спектр багатопроменевої перешкоди (рис. 1,б).

За аналогією з порядком дій у часовій області далі необхідно обчислити миттєві АЧС і ФЧС багатопроменевої перешкоди в пункті В, компенсавши сигнальну складову. Для цього використовують масиви миттєвих АЧС і ФЧС сигнальних вибірок, отриманих у пункті А, після амплітудного нормування і вирівнювання фазового набігу з використанням співвідношень векторної алгебри [13]:

$$|G^{Bn}(j\omega, i)| = \sqrt{[G^B(j\omega, i)]^2 - [G^A(j\omega, i)]^2 + 2G^B(j\omega, i)G^A(j\omega, i) \times \cos(\pi/2 - V\varphi^{AB}(\omega, i))};$$

$$\varphi^{Bn}(\omega, i) = \arcsin\left[\frac{G^A(j\omega, i) \sin(\pi/2 - V\varphi^{AB}(\omega, i))}{G^{Bn}(j\omega, i)}\right].$$

Далі необхідно компенсувати складову перешкоди в сигналі пункту В:

$$|G^{Bm}(j\omega, i)| = \sqrt{[G^B(j\omega, i)]^2 - [G^{Bn}(j\omega, i)]^2 + 2G^B(j\omega, i)G^{Bn}(j\omega, i) \times \cos(\pi/2 - V\varphi^{Bn}(\omega, i))};$$

$$\varphi^{Bm}(\omega, i) = \arcsin\left[\frac{G^{Bn}(j\omega, i) \sin(\pi/2 - V\varphi^{Bn}(\omega, i))}{G^{Bm}(j\omega, i)}\right].$$

Отримані дані дозволяють розрахувати реальну й уявну складові АЧС сигналу пункту В, в якому БПП скомпенсовано,

$$\operatorname{Re}\{G^{Bm}(j\omega, i)\} = |G^{Bm}(j\omega, i)| \cos \varphi^{Bm}(\omega, i);$$

$$\operatorname{Im}\{G^{Bm}(j\omega, i)\} = |G^{Bm}(j\omega, i)| \sin \varphi^{Bm}(\omega, i).$$

Для розрахунку ВКФ сигнальних вибірок пунктів складаємо новий комплексний масив [12]:

$$[Z(k) = \operatorname{Re}\{G^A(k)\} \operatorname{Im}\{G^{Bm}(k)\}], \quad k = 0, \dots, N-1$$

і виконуємо зворотнє перетворення Фур'є:

$$B(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Z(k) e^{j\frac{2\pi}{N}nk},$$

що дає вихідні дані для отримання масиву (1).

Отже, щоби компенсувати багатопроменевою перешкоду в сигналі загального джерела пункту В у частотній області, необхідно:

- за наявними сигнальними вибірками, записаними в пунктах А і В, визначити реальні й уявні частини спектральних складових прийнятих сигналів ЗД;
- обчислити миттєві АЧС і ФЧС цих сигналів;
- обчислити миттєві АЧС і ФЧС багатопроменевої перешкоди в пункті В;
- компенсувати БПП у спектрі сигналу пункту В;
- розрахувати реальну й уявну складові АЧС сигналу пункту В за компенсованої БПП;
- отримати комплексний масив для взаємної спектральної щільності потужності сигналів у пунктах та виконати операцію зворотнього перетворення Фур'є.

Отриманий у результаті масив значень ВКФ сигналів використовувати для порівняння шкал часу еталонів у пунктах. Для підвищення точності визначення часового положення максимумів ВКФ під час формування масиву (1) здійснюється інтерполяція цих значень [14, 15].

Для зменшення впливу апаратних похибок у процесі технічної реалізації БПСС доцільно використовувати спосіб формування гетеродинних сигналів, який виключає фазові надбавки, зумовлені допоміжними коливаннями [16].

ВИСНОВКИ

Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень продемонстрували можливість компенсації багатопроменевої перешкоди в рознесеній пасивній системі синхронізації часу та частоти у випадку, коли хоча б в одному із пунктів, що синхронізуються, багатопроменева перешкода не перевищує допустимого рівня. Розроблено математичні моделі блоків компенсації у часовій і частотній (спектральній) областях. У процесі розроблення моделей використано відомий математичний апарат спектрально кореляційного аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Koval Y.A., Ivanova E.A., Kostyrya A.A. & Al Tvejri B. (2011). Modeling frequency time synchronization systems that use signals of common sources. *Radioelectronics and Communications Systems*, 54(2), 68—76.
2. Kostyrya A.A., Naumenko V.N., Plehno S.A. & Ushakov S.I. (2016). Experimental verification of the algorithm of multipath interference compensation in a passive system synchronization time and frequency. *Radiotekhnika*, 178, 111—118.
3. Морозов В.А., Старков С.О. & Кузьмин Л.В. (2008, Май). Оценка скорости передачи информации в локальной сверхширокополосной системе связи в условиях многолучевого распространения. *Радиотехника и электроника* (Morozov V.A., Starkov S.O. & Kuzmyn L.V.

- (2008, May). Estimation of the speed of information transfer in a local ultra wideband communication system under conditions of multipath propagation. *Radio engineering and electronics*, 53(5), 594 — 598.
4. Okumura Y. (1968). Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land Mobile Radio Service. *Review of the Electr. Commun. Lab*, 16 (9 –10), 825—873.
 5. Greenstein L.J., Erceg V., Yeh Y.S., & Clark M.V. (1997, May) A new path gain/delay spread propagation model for digital cellular channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 46 (2).
 6. Михайлов С. (2006). Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS приемником. *Беспроводные технологии (Mikhailov S. (2006). The effect of multipath propagation of radio waves from a navigation spacecraft on the accuracy of determining the coordinates of a GPS receiver. Wireless technology*), 2006.
 7. Папалекси, Н.Д. (1942). Радиопомехи и борьба с ними. «Гостехиздат», Москва (Papaleksi N.D. (1942). *Radio interference and fight with them. «Gostekhizdat*, Moscow).
 8. Kostyria A.A., Naumenko V.N., Ushakov S.I. Suppression multipath signal common source in passive system time and frequency synchronization. *Radiotekhnika*, 183, 13—17.
 9. Бондарев В.Н., Трёстер Г. & Чернега В.С. (2001). Цифровая обработка сигналов: методы и средства. Учеб. пособие для вузов [текст] — Х.: Конус (Bondarev, V.N., Troster G. & Chernega V.S. (2001). *Digital signal processing: methods and means. Training manual for universities [text] — Х.: Konus*). — 398 с.
 10. Солодовников В.В., Дмитриев А.Н. & Егупов Н.Д. (1986). Спектральные методы расчета и проектирования систем управления, Москва (Solodovnikov V.V., Dmitriev A.N. & Egupov N.D. (1986). *Spectral methods for calculating and designing control systems, Moscow*), 440 с/р.
 11. Лутченко А.Е. Когерентный прием радиолокационных сигналов (1973). «Советское радио», Москва (Lutchenko A.E. *Coherent reception of radar signals (1973). «Soviet Radio*», Moscow), 208 с/р.
 12. Julius S., Bendat, Allan G. & Piersol (1980). *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis /A Wiley Inter science Publication John Wiley & Sons. — New York, Chichester Brisbane, Toronto*.
 13. Granino A., Korn & Theresa M. (1968). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Definitions, Theorems and Formulas for Reference and Review. Second, enlarged and revised Edition. McGraw Hill Book Company, New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney*.
 14. Костыря А.А., Науменко В.Н., Плехно С.А. (2013). Применение интерполирующих алгоритмов для получения оценок сдвига шкал эталонов времени и частоты при синхронизации по общему источнику сигналов. *Радиотехника (Kostyrya A.A., Naumenko V.N. & Plehno S.A. (2013). The use of interpolating algorithms to obtain estimates of the shift of the standards of time and frequency during synchronization by a common source of signals. Radio engineering* 173). 173, 88—95.
 15. Velichko A.F., Velichko S.A., Vichkan A.V. & Netebenko K.V. (2014). Window correction at time series realization of the narrow band gaussian stochastic process. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 9(70), 27—32.
 16. Velichko A.F. & Velichko S.A. (2016). Processing of packaged radar probing fm signals for retranslation systems in technical diagnostic. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1 (22), 118—123. ✎

Отримано / received: 23.07.2019.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А.Ф. Величком (Україна).
Prof. A.F. Velychko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.*

DOI: 10.33955/2307 2180(4)2019.24 30

УДК 616.07:519.248

ОСОБЕННОСТИ, ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ НАКОПЛЕННЫХ СУММ. ЧАСТЬ 1. МЕТОД ГРАФИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАЗЛАЖЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Features, Opportunities and Application of Control Cards Accumulated Sum. Part 1. Graphic Evaluation Method Dilution Technological Process



Е. Володарский, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина, e mail: vet 1@ukr.net

Л. Кошечая, доктор технических наук, профессор, Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e mail: arnis@ukrpost.net

И. Потоцкий, начальник отдела, ДП «Укрметрестстандарт», Киев, Украина, e mail: pototskiy@ukrcsm.kiev.ua

E. Volodarsky, doctor of technical sciences, professor, National technical university of Ukraine «Kyiv Polytechnic institute named Igor Sikorsky», Kyiv, Ukraine, e mail: vet 1@ukr.net

L. Kosheva, doctor of technical sciences, professor, National aviation university, Kyiv, Ukraine, e mail: arnis@ukrpost.net

I. Pototsky, head of department, State enterprise «Ukrmetrteststandart», Kyiv, Ukraine, e mail: pototskiy@ukrcsm.kiev.ua

Рассмотрена возможность поддержания в состоянии статистической управляемости технологического процесса с применением контрольных карт накопленных сумм. Показаны принципы построения этих карт, особенности выявления разлаженности технологического процесса. Рассмотрена взаимосвязь характеристик карт с установлением ошибок 1-го и 2-го рода при их интерпретации с использованием аппарата проверки гипотез. Рассмотрен метод графической оценки разлаженности процесса с применением V-маски теоретически и на числовом примере.

У статті розглянута можливість підтримання в стані статистичної керованості технологічного процесу із застосуванням контрольних карт накопчених сум. Показано принципи побудови цих карт, особливості виявлення розладу технологічного процесу. Особливістю контрольних карт накопчених сум є те, що рішення стосовно статистичної керованості процесу приймається з урахуванням попередньої інформації. Нанесені на карту точки не відповідають окремим результатам вимірювання або статистикам, вони відображають інформацію про усі отримані результати — від першого до останнього, включно. Ця особливість дозволяє швидше реагувати на ознаки розладу процесу, ніж при роботі з картами Шухарта, де для аналізу використовуються вибіркові статистики, які є незалежними результатами контролю.

Розглянуто взаємозв'язок характеристик карт з встановленням помилок 1-го і 2-го роду при їх інтерпретації з використанням апарату перевірки гіпотез. У статті наведено теоретичне обґрунтування та підходи до застосу-

вання послідовного LQ (likelyhood quotient) критерію при моніторингу технологічного процесу, описано основні параметри, які впливають на прийняття рішення. Для покращення сприйняття інформації наведено графічну інтерпретацію застосування LQ-критерію.

Також розглянуто метод графічної оцінки розладання процесу із застосуванням V-маски, який пов'язує із зворотньо напрямленим LQ-критерієм, якщо виявлено розлад технологічного процесу і потребується встановити момент часу, коли саме це відбулося. При цьому дуже важливим є правильний підхід до побудови шаблону V-маски, оскільки, окрім кута «розкриття» маски, необхідно враховувати коефіцієнт масштабування. Зазначений коефіцієнт являє собою відношення масштабу осі ординат до осі абсцис, а його не застосування призведе до неправильного трактування результатів контролю.

Розглянуто конкретний числовий приклад з відповідним графічним представленням результатів.

The article considers the possibility of maintaining in statistical controllable state the technological process with the use of control charts of accumulated sums. The principles of construction of these charts, features of the process disorder detection are shown. The feature of the control charts of accumulated sums is that, the decision regarding the statistical controllability of the process is made taking into account the preliminary information. The dots mapped do not correspond to individual measurement results or statistics, they display information about all the results obtained, from first to last, inclusive. This feature allows you to respond more quickly to signs of process disorder than when working with Shewhart control charts, where sample statistics are used for analysis, which are independent control results.



Е. Володарский



Л. Кошечая



И. Потоцкий

The characteristics relation of the charts with the establishment of errors of the 1st and 2nd kind when interpreting them using the hypothesis testing apparatus is considered. The article presents the theoretical substantiation and approaches to the application of sequential LQ (likelihood quotient) criterion in process monitoring, describes the main parameters that influence decision making. A graphical interpretation of the application of the LQ criterion is given to improve the perception of information.

The method of graphical estimation of the process disorder with the use of V-mask, which is associated with the reversed LQ criterion, is also

considered, if a disorder of the technological process is detected and it is necessary to set the time when it happened. At the same time, the right approach to constructing a V-mask template is very important, since in addition to the «opening» angle of the mask, the scaling factor must be taken into account. This coefficient is the ratio of the scale of the ordinate to the abscissa axis, and its failure to apply will lead to incorrect interpretation of the control results.

A specific numerical example with an appropriate graphical representation of the results is considered.

Ключевые слова: технологический процесс, контрольные карты, критерии, кумулятивная сумма, выборка, опорное значение, графическая оценка, статистическая гипотеза.

Ключові слова: технологічний процес, контрольні карти, критерії, кумулятивна сума, вибірка, опорне значення, графічна оцінка, статистична гіпотеза.

Keywords: technological process, control cards, criteria, cumulative sum, sample, reference value, graphical estimate, statistical hypothesis.

Контрольные карты накопленных сумм (их называют еще картами кумулятивных сумм или *Cusum* карты [1—4]) используются в методах контроля качества для выявления превышения абсолютных критических значений показателей продукции и процессов. Они могут обеспечить выявление на ранней стадии выхода процесса из под контроля и дают более ясное представление о поведении процесса, чем обычная карта Шухарта, которая не дает ответа на вопрос, где произошли существенные изменения процесса [5]. *Cusum* карта позволяет быстро и точно определить область изменений процесса, а также момент, когда необходимо введение корректирующих действий.

Кумулятивная сумма представляет собой сумму отклонений данных от некоторого установленного опорного значения. Любые изменения среднего и степень этих изменений могут быть представлены визуально с помощью угла наклона графика данных. Горизонтальный график указывает на соответствие среднего процесса опорному значению. Наклон графика вниз или вверх указывает на то, что среднее процесса меньше или больше опорного, соответственно. Чем больше угол наклона, тем существеннее расхождение.

Отличительной особенностью метода кумулятивных сумм является тот факт, что решение относительно налаженности процесса принимается с учетом предыдущей информации. Такая схема использования выборочных результатов контроля обеспечивает значительное уменьшение средней длины L_1 серии выборок. Это значит, что разлаженность процесса будет обнаружена значительно быстрее, чем при обычной схеме использования выборочных статистик, которые представляют собой независимые результаты контроля.

Таким образом, отличительная особенность *Cusum* карт состоит в том, что нанесенные на карту точки не соответствуют отдельным наблюдениям или статистикам, как, например, среднее или размах, вычисленные по одной выборке [6], а представляют информацию о наблюдениях от первого до последнего включительно.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОСТРОЕНИЯ *CUSUM* КАРТ

Рассмотрим особенности построения этих карт.

Отклонение $(\bar{X}_{jn} - \mu_0)$ среднего \bar{X}_{jn} значения j ой выборки, содержащей n элементов, от заданного/опорного значения μ_0 суммируется с отклонениями, полученными с момента контроля/мониторинга процесса в i й момент времени ($i = 1, (n - 1)$). Вычисленное таким образом значение, откладывается как ордината на *Cusum* карте и соответствует выборке в момент t :

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

Данная статистика, изменение во времени которой исследуется, подразумевает, что \bar{X}_{jn} имеет нормальное распределение $N(\mu_t, \sigma^2_0/n)$ с математическим ожиданием

$$E(Y_t) = \sum_{j=1}^t E(\mu_j - \mu_0) = \sum_{j=1}^t (\mu_j - \mu_0). \quad (2)$$

Если уровень настройки процесса μ_j в среднем не изменяется, то $E(Y_t) = (\mu - \mu_0)$ и совпадает с осью времени t , а график значений Y_t на контрольной карте варьирует относительно оси времени t .

При разлаженности процесса, т. е. в момент времени t_0 , происходит смещение уровня настройки, кривая значений Y_t будет колебаться относительно полупрямой, соответствующей математическому ожиданию, имеющему ненулевую крутизну $(\mu_t - \mu_0)$. Если кривая на *Cusum* карте начинает все больше удаляться от оси t , это означает, что произошло недопустимое отклонение от уровня настройки.

Поскольку выборочные средние являются случайными величинами, то необходимо «отсесть» возможные изменения, обусловленные этой случайностью. С этой целью выдвигается нулевая гипотеза $H_0: \mu_t = \mu_0$, т. е. процесс не разлажен, при альтернативной гипотезе $H_1: \mu_t = \mu_0 \pm \Delta$, где Δ — смещение по отношению к опорному значению.

При проверке гипотез определяется отношение вероятностей:

$$LQ = L(x | \mu_0 + |\Delta|) / L(x | \mu_0), \quad (3)$$

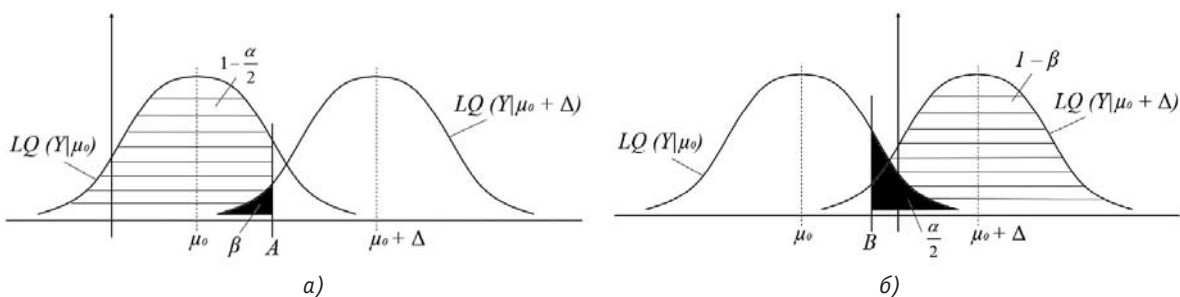


Рис. 1. К определению граничных значений принятия гипотез; а) для случая правдоподобности принятия гипотезы H_0 ; б) для случая правдоподобности принятия гипотезы H_1
 Fig. 1. To the determination of the boundary values of the adoption of hypotheses; а) for the case of plausibility of accepting the hypothesis H_0 ; б) for the case of plausibility of accepting the hypothesis H_1

где $L(x|\mu_0 + |\Delta|)$ и $L(x|\mu_0)$ — функции правдоподобия [8] при справедливости гипотез H_0 и H_1 , соответственно.

Отношение LQ , которое называется LQ критерием (likelihood quotient), является мерой правдоподобия для гипотез H_0 и H_1 . Так, при $LQ > 1$ более правдоподобной является гипотеза H_1 , а при $LQ < 1$ — решение принимается в пользу H_0 . При реализации процедуры проверки гипотез H_0 и H_1 могут возникать ошибочные решения о принятии той или иной гипотезы. Вероятность ошибки 1 го рода (принятие гипотезы H_1 , когда справедлива гипотеза H_0) определяется заданием верхней границы α (уровнем значимости). Вероятность ошибки 2 го рода β при заданном объеме выборки n необходимо вычислить для каждого значения $\mu \neq \mu_0$ [7]. При классическом LQ критерии Неймана Пирсона [8] используется одно граничное значение, и решение принимается для постоянного числа выборочных значений. Предложенный Вальдом (Wald) последовательный критерий отношения вероятностей [8], использует два граничных значения A и B ($A < 1 < B$), разделяющих гипотезы H_0 и H_1 . При этом число выборочных значений последовательно увеличивается на единицу, и каждый раз принимают решение, до

статочно ли имеющихся данных для окончательного принятия решения или нужно увеличить их число. Статистически критерии такого рода относятся к последовательному анализу [9]. Применение такого вида статистических критериев позволяет уменьшать объем выборок. Контроль продолжается до тех пор, пока значение LQ не выходит за границы, близкие к единице. Из выражения (3) следует, что при $LQ \leq A$ принимается решение о правдоподобности гипотезы H_0 , а при $LQ \geq B$ — о правдоподобности гипотезы H_1 .

На практике обычно задаются значениями α и β , и на их основании определяются граничные значения A и B :

$$A = \beta / (1 - \alpha / 2), \tag{4}$$

$$B = (1 - \beta) / (\alpha / 2). \tag{5}$$

На рис. 1 показаны расположения значений A и B для случая правдоподобности принятия гипотезы H_0 (рис. 1, а) и для случая правдоподобности принятия гипотезы H_1 (рис. 1, б).

Поскольку используется двухсторонний критерий, то уровень значимости принимается равным $\alpha/2$.

При проведении мониторинга контролируемого процесса граничные значения (границы интервала) являются функциями от времени t , что графически отображается в виде двух параллельных лучей с углом наклона c или $-c$, как показано на рис. 2.

Если для текущего значения статистики (1) выполняется условие $|y_t| \leq a + ct$, то верна гипотеза за H_0 — процесс не разлажен. Если же $|y_t| \geq b + ct$, то справедлива гипотеза H_1 — процесс разлажен и необходимо осуществлять корректирующие действия.

При получении результата y_t при $t = j$ внутри области, ограниченной этими лучами, берется следующая выборка, и процедура проверки y_{j+1} продолжается. Область, находящаяся между этими лучами, является областью продолжения контроля. Как видно из рис. 2, область продолжения контроля име

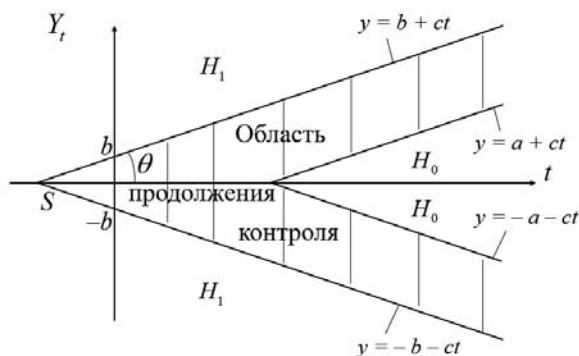


Рис. 2. Области принятия решений при использовании последовательной процедуры
 Fig. 2. Areas of decision making using a sequential procedure

ет форму горизонтально расположенной буквы «V», внешние стороны которой называются границами отклонения гипотезы H_0 .

При выполнении гипотезы H_0 процесс находится в статистически управляемом состоянии, а задачей применения контрольных карт является выявление разлаженности процесса. Поэтому, при использовании контрольных карт, справедливость гипотезы H_0 при $t = j$ является лишь условием продолжения мониторинга технологического процесса. В этой связи решение об остановке технологического процесса или введении корректирующих действий принимается лишь в случае, когда статистика (1) попадает в область принятия гипотезы H_1 , т. е. при $|y_t| \geq b + ct$.

Рассмотренный метод проверки гипотез $H_0: \mu_t = \mu_0$ и $H_1: \mu_t = \mu_0 + \Delta$, отображенный на рис. 2, называют *прямо направленным последовательным LQ критерием*.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО LQ КРИТЕРИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрим применение последовательного критерия отношения вероятностей для генеральной совокупности \bar{X} , элементы которой, являющиеся контролируемыми признаками, имеют нормальное распределение с заданной дисперсией σ_0^2 и уровнем настройки (опорным значением) процесса μ_0 . При этом формулируется нулевая гипотеза $H_0: \mu = \mu_0$ при альтернативной гипотезе $H_1: \mu_t = \mu_0 \pm \Delta$.

Для нормального распределения, принимая во внимание, что для «мгновенной» выборки проводится n наблюдений, а затем находится среднее значение, плотность распределения вероятностей будет:

$$f(\bar{x}_j | \mu_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_0/n} \cdot \exp \left[-\frac{(\bar{x}_j - \mu_0)^2 \cdot n}{2\sigma_0^2} \right].$$

В этом случае отношение вероятностей (3) записывается как:

$$LQ_n = \frac{\prod_{j=1}^t f(\bar{x}_j | \mu_0)}{\prod_{j=1}^t f(\bar{x}_j | (\mu_0 \pm \Delta))}, \quad (6)$$

где функции правдоподобия, при справедливости гипотез H_0 и H_1 , соответственно, имеют вид:

$$L(\bar{x} | \mu_0) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \cdot n/\sigma_0)^t} \cdot \exp \left[-\frac{\sum_{j=1}^t (\bar{x}_j - \mu_0)^2 \cdot n}{2\sigma_0^2} \right], \quad (7)$$

$$L(\bar{x} | \mu_0 \pm \Delta) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \cdot n/\sigma_0)^t} \times \exp \left[-\frac{\sum_{j=1}^t (\bar{x}_j - (\mu_0 \pm \Delta))^2 \cdot n}{2\sigma_0^2} \right]. \quad (8)$$

На практике критерий отношения вероятностей представляется в логарифмической форме. Исходя из (7) и (8), после логарифмирования, выражение (6) запишется как:

$$\ln(LQ_n) = \frac{n}{2\sigma_0^2} \cdot \left[\sum_{j=1}^t (\bar{x}_j - \mu_0)^2 - \sum_{j=1}^t (\bar{x}_j - \mu_0 \mp \Delta)^2 \right].$$

После простых математических преобразований придем к выражению:

$$\ln(LQ_n) = \frac{\left[\pm 2 \cdot \sum_{j=1}^t (\bar{x}_j - \mu_0) \cdot \Delta - \sum_{j=1}^t \Delta^2 \right] \cdot n}{2\sigma_0^2}.$$

Учитывая, что $\sum_{j=1}^t (\bar{x}_j - \mu_0) = Y_t$ и вводя нормиро-

ванное смещение процесса $\delta = \Delta/\sigma_0$, окончательно получим:

$$\ln(LQ_n) = -nt\delta^2/2 \pm n\delta Y_t/\sigma_0. \quad (9)$$

Ранее было показано, что граничной ситуации, когда принимается альтернативная гипотеза H_1 (контроль продолжается), соответствует граничное значение B , представленное выражением (5). Логарифм отношения правдоподобия для данного случая будет:

$$\ln(LQ_n) = \ln((1-\beta)/(\alpha/2)). \quad (10)$$

На основании равенства левых частей (9) и (10) следует, что

$$-nt\delta^2/2 \pm n\delta Y_t/\sigma_0 = \ln((1-\beta)/(\alpha/2))$$

или

$$|Y_t| n\delta/\sigma_0 = \ln((1-\beta)/(\alpha/2)) - nt\delta^2/2. \quad (11)$$

Определим значение $|Y_t|$ для $t = 0$, что будет соответствовать отрезку, отсекаемому на оси Y_t (рис. 2) положительных и отрицательных значений. Подставив в (11) $t = 0$, получим:

$$b = (\sigma_0/n\delta) \cdot \ln((1-\beta)/(\alpha/2)). \quad (12)$$

Возьмем производную по t от выражения (11), которая определяет тангенс угла наклона лучей c , соответствующих верхнему и нижнему граничному значению допустимых отклонений процесса:

$$\operatorname{tg} \theta = \delta\sigma_0/2. \quad (13)$$

Точка пересечения S этих лучей, которая лежит на оси t , определится как высота SO треугольника $(-b), S, (b)$. Обозначим отрезок SO через d . Тогда из треугольника получим соотношение: $d = b/c$.

Подставив значения b и c в последнее выражение получим:

$$d = (2/n\delta^2) \cdot \ln((1-\beta)/(\alpha/2)). \quad (14)$$

На практике значением β пренебрегают, тогда:

$$d = -(2/n\delta^2) \cdot \ln(\alpha/2).$$

Таким образом, ордината, наносимая на контрольную карту и соответствующая данному моменту времени, равна сумме ординаты Y_t текущего наблюдения и значения статистики, вычисленного по предшествующей выборке.

Для оценивания *Cusum* карт, в основном, применяются два метода:

- метод графической оценки с помощью, так называемой, *V* маски, предложенный *Barnard* [8];
- численный метод оценки с помощью схемы интервалов принятия решений *EIS*, предложенный *Page* [10].

Эти методы направлены на то, чтобы распознать момент времени, начиная с которого процесс изменения критерия отношения вероятностей LQ_n слишком быстро возрастает или убывает, что свидетельствует о недопустимом, по отношению к установленной (заданной) норме, смещении уровня настройки процесса.

МЕТОД ГРАФИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ *CUSUM* КАРТЫ

При обработке *Cusum* карт с использованием *V* маски используется шаблон с разрезом в виде буквы «*V*», который образует границы области отклонения. Поскольку буква «*V*» в маске повернута на 180° по сравнению с ранее рассмотренным случаем (рис.2), то процедуру обработки карт с помощью *V* маски связывают с *обратно направленным* LQ критерием, т. е. процесс разлаженности процесса установлен, и требуется установить, в какой момент времени он начался. Суть метода показана на рис.3 и сводится к следующему.

При интерпретации карты на нее накладывается шаблон (заштрихованная часть на рис. 3) вырезом влево, а биссектриса угла должна быть направлена параллельно оси t . Затем маска смещается вдоль кривой накопленных сумм с тем, чтобы последующая точка на карте совпадала с точкой O *V* маски. При этом длина отрезка SO равна значению d , рассчитанному в соответствии с (14); угол раскрытия 2θ *V* маски выбирают в соответствии с (13) как $\theta = \arct(\delta\sigma_0/2)$.

Если график, представляющий последовательно соединенные между собой точки $(1, y_1), \dots(t, y_t)$ находится внутри *V* маски, то до момента времени t смещение процесса от заданного значения μ_0 было незначительно и обусловлено влиянием случайных величин и ограниченным объемом n выборок. Если же график пересекает одну из сторон *V* маски, то это свидетельство того, что к моменту

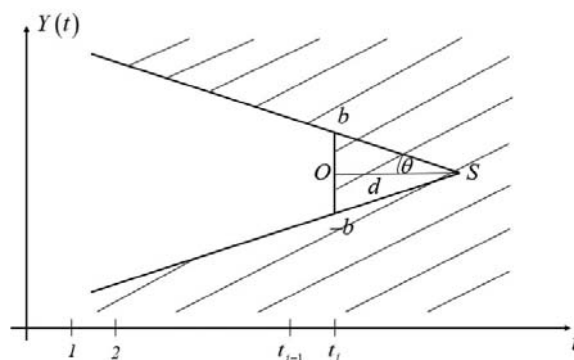


Рис. 3. Шаблон *V* маски для обработки *Cusum* карт
Fig. 3. *V* mask template for processing *Cusum* cards

времени t отклонение процесса от заданного (номинального) значения μ_0 настолько велико, что необходимо вмешиваться в процесс. Вмешательство в процесс подразумевает уменьшение или увеличение уровня настройки, что зависит от того, какая из сторон *V* маски пересекается.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что вычисление параметров шаблона теряет смысл, если не учитывать масштабный коэффициент f , который показывает, сколько единиц по оси Y_t соответствует одной единице по оси t . Здесь есть отличие от карт Шухарта, для которых важен масштаб только по вертикальной оси.

Выражение (12), на основании которого рассчитывается угол θ , можно применять непосредственно только, когда по оси t (ось абсцисс) и оси Y_t (ось ординат) откладываются величины в одних и тех же единицах. Исходя из этого, в общем случае, выражение (13) следует записать:

$$tg\theta = \delta\sigma/2f,$$

где f — масштабный коэффициент.

Параметр же *V* маски d определяется в соответствии с выражением (14).

В соответствии с (13) угол «раскрытия» *V* маски зависит от смещения Δ процесса, т. е.:

$$\theta = \arctg(\delta\sigma_0/2f) = \arctg(\Delta/2f).$$

Поэтому, чем меньше предполагаемое допустимое смещение процесса, тем меньше будет угол θ ; следовательно, будет больше число шагов с момента времени t_0 , когда наступит разлаженность процесса.

Параметрами *V* маски являются также значение b — ордината, отсекаемая лучом, соответствующим границе разделения области принятия решения при последовательной процедуре, и значение d — расстояние от точки начала координат до точки S пересечения лучей (полуосей). Эти параметры зависят от значения уровня статистической значимости α проверки гипотез (ошибки первого рода). Анализ этих выражений показывает, что чем меньше

значение α , тем больше времени (шагов) пройдет с момента разлаженности процесса до момента установления этого факта при использовании *Cusum* карты.

ЧИСЛОВОЙ ПРИМЕР

Был смоделирован случайный процесс, отображающий ход технологического процесса, имеющий нормальное распределение с нормированным уровнем настройки процесса $\mu_0 = 100$ единиц и стандартным отклонением $\sigma_0 = 20$ единиц.

Для каждого момента времени $t = 1, 2, \dots$ взята выборка объемом $n = 5$ и вычислены средние значения для этих выборок. Полученные средние значения при статистически управляемом процессе представлены в колонке 2 таблицы, а в колонке 3 представлены отклонения текущего среднего \bar{x}_j для j го момента времени от нормированного уровня настройки.

Вначале обратимся к контрольным картам Шухарта. Определим значения верхней и нижней контрольных границ для \bar{X} карты Шухарта при $\alpha = 0,01$:

$$UCL = \mu_0 + \frac{z_{0,995} \cdot \sigma_0}{\sqrt{n}} = 100 + 1,152 \cdot 20 = 123,04 \text{ ед.},$$

$$LCL = \mu_0 - \frac{z_{0,995} \cdot \sigma_0}{\sqrt{n}} = 100 - 1,152 \cdot 20 = 76,96 \text{ ед.}$$

Сопоставим с этими границами средние значения выборок \bar{x}_j , представленные в колонке 2 таблицы, т.е. когда отсутствует смещение. Можно сделать вывод, что процесс действительно статистически управляем — все значения не выходят за пределы этих границ, а разброс обусловлен лишь влиянием случайных величин.

Введем в смоделированный нормально протекающий случайный процесс смещение $\Delta = +10$ ед., чему соответствует $\delta = \Delta/\sigma_0 = 0,5$. Это смещение вводится в момент времени $t = 11$ и остается постоянным. Выборочные средние значения для этого случая представлены в колонке 5 таблицы, где, начиная с момента времени $t = 11$, они увеличены на 10 ед., однако не выходят за значения верхней и нижней контрольных границ $UCL = 123,04$ ед. и $LCL = 76$. Таким образом, хотя и процесс разлажен, имеется постоянное смещение, контрольные карты Шухарта это не обнаруживают.

Оценим данную ситуацию с использованием *Cusum* карты. В колонке 4 таблицы приведены накопленные суммы y_i отклонений процесса $(x_j - 100)$ для $j = \bar{1}, t$ при нормальном его протекании. Эта ситуация отображена на рис. 4 кривой в виде сплошных линий. Как видно из рис. 4, график колеблется

Выборочные значения технологического процесса

Sample Process Values

№	Нормальный ход процесса			Смещение на $\delta = +0,5$		
	\bar{x}_j	$\bar{x}_j - 100$	y_{ij}	\bar{x}_j	$\bar{x}_j - 100$	y_{ij}
1	2	3	4	5	6	7
1	91,4	8,6	8,6	91,4	8,6	8,6
2	97,2	2,8	11,4	97,2	2,8	11,4
3	92,8	7,2	18,6	92,8	7,2	18,6
4	107,8	7,8	10,8	107,8	7,8	10,8
5	110	10	0,8	110	10	0,8
6	97,2	2,8	3,6	97,2	2,8	3,6
7	112,4	12,4	8,8	112,4	12,4	8,8
8	103	3	11,8	103	3	11,8
9	95,6	4,4	7,4	95,6	4,4	7,4
10	95,2	4,8	2,6	95,2	4,8	2,6
11	103,2	3,2	5,8	113,2	13,2	15,8
12	95,8	4,2	1,6	105,8	5,8	21,6
13	91	9	7,4	101	1	22,6
14	94,6	5,4	12,8	104,6	4,6	27,2
15	109	9	3,8	119	19	46,2
16	102	2	1,8	112	12	58,2
17	105	5	3,2	115	15	73,2
18	109,6	9,6	12,8	119,6	19,6	92,8
19	106,6	6,6	19,4	116,6	16,6	109,4
20	92,8	7,2	12,2	102,8	2,8	112,2

случайным образом относительно оси времени, что как раз и является свидетельством статистической управляемости процесса.

При наличии смещения накопленные суммы для $t = 11, 20$ приведены в колонках 5 и 7 таблицы. На рис. 4 график накопленных сумм y_i отображен пунктирной линией. Начиная с момента $t = 11$, наблюдается тенденция постоянного возрастания графика. Это является признаком появления постоянного смещения. Необходимо выявить момент, когда возрастание нельзя объяснить только влиянием случайности.

Рассмотрим механизм выявления разлаженности процесса с применением графического метода — использование *V* маски. Для этого определим параметры *V* маски исходя из выражений:

$$\theta = \arctg(\delta\sigma_0/2f) \text{ и } d = -(2/n\delta^2) \cdot \ln(\alpha/2).$$

Исходя из графика, представленного на рис. 4, определим масштабный коэффициент $f = 7,5$. Подставив значения $\delta = 0,5$, $\sigma_0 = 20$, $n = 5$ и $\alpha = 0,005$, получим:

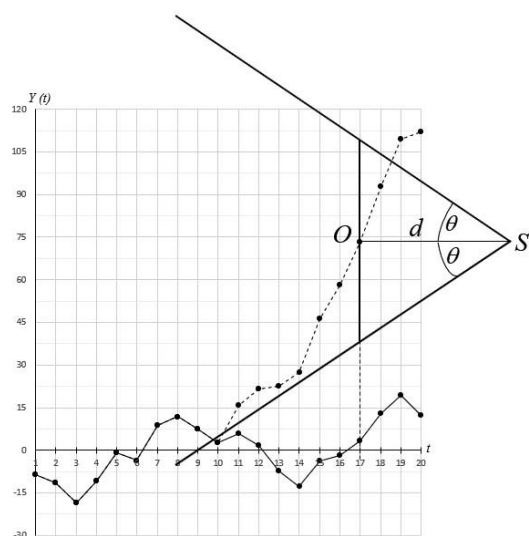


Рис. 4. Построение *Cusum* карты со смещением уровня настройки $\delta = +0,5$

Fig. 4. Construction of a *Cusum* card with a shift in the tuning level $\delta = +0.5$

$$\theta = \arctg\left(\frac{(0,5 \cdot 20)}{(2 \cdot 7,5)}\right) = 33,7^\circ;$$

$$d = -\left(\frac{2}{(5 \cdot 0,25)}\right) \cdot \ln(0,005) = 8,48.$$

Строим, как показано на рис. 3, шаблон *V* маски накопленных сумм для средних значений с параметрами: $\theta = 33,7^\circ$ и $d = 8,48$.

Накладываем шаблон *V* маски на график накопленных сумм, совмещая точку *O* с текущей *j* ой ($j = 12, 13, \dots$) точкой на *Cusum* карте, и ориентируем биссектрису угла раскрытия 2θ параллельно оси *t*. Если график *Cusum* карты при совмещении с точкой Y_j, t_j ($j = 11, 12, \dots$) находится внутри *V* маски, то делается вывод, что до момента времени $t = j$ смещение уровня настройки технологического процесса является незначительным. При пересече

нии графиком одной из сторон *V* маски (в рассматриваемом примере — верхней), принимается решение о необходимости вмешательства в процесс. В примере, приведенном на рис. 4, в момент времени $t = 17$ *Cusum* карта установила наличие смещения технологического процесса на $\Delta = +10$ ед. Если график пересекает нижнюю сторону *V* маски, то имеет место отрицательное смещение процесса.

Таким образом, для приведенного примера контрольные карты Шухарта при смещении уровня настройки процесса на $\delta = 0,5$ при $\alpha = 0,01$ не выявляют разлаженности. Это обусловлено тем, что, как показано в [11], для выявления статистической неуправляемости процесса необходимо, чтобы прошло в среднем 20 шагов с момента появления смещения. В то же время *Cusum* карта позволяет выявить смещение $\Delta = +10$ ед. на 6 шаге проводимого мониторинга.

ВЫВОДЫ

Применение *Cusum* карты позволяет с заданной степенью точности и достоверности судить о состоянии технологического процесса, оперативно, при необходимости, регулировать ход технологического процесса, прогнозировать и вырабатывать оптимальные управленческие решения на основе изучения фактических данных, тенденций и закономерностей.

Проведенный сравнительный анализ и расчеты характеристик карт Шухарта и *Cusum* карт показывают, что *Cusum* карты имеют большее быстродействие (для выявления смещения понадобилось всего 6 шагов). Для выявления меньших смещений понадобится больше времени. Поэтому *V* маску следует строить, исходя из предельно допустимого смещения технологического процесса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- ISO 7870 4:2011 «Control charts — Part 4: Cumulative sum charts».
- Мердок Дж. (1986) Контрольные карты / Дж. Мердок. — М.: Финансы и статистика (J. Murdoch. (1986) Control charts / J. Murdoch. — Moscow: Finance and statistics). — 150 с/р.
- Монтгомери, Д. С. (2009) Введение в статистический контроль качества. — 6 е издание. — Рио де Жанейро: LTC (Douglas C. Montgomery. (2009) Introduction to Statistical Quality Control, 6th edition, John Wiley & Sons, New York).
- Шишкин Б.В. (2016) Контрольные карты // Международный журнал экспериментального образования (Shishkin B.V. (2016) Kontrolnyie kartyi // Mezhdunarodnyiy zhurnal eksperimentalno go obrazovaniya). — № 6 1. — С/Р. 129—130.
- Nishina, K., Kuzuya, K., Ishi, N.: (2005) Reconsideration of Control Charts in Japan. *Frontiers in Statistical Quality Control*. 8, 136—150.
- E. Volodarsky, L.Kosheva, Z.Warsza, A. Idźkowski. Precautionary statistical criteria in the monitoring quality of technological process// In book *Recent Advances in Systems, Control and Information*. Proceeding of Internation.
- Gatti, P.L.: (2004) *Probability Theory and Mathematical Statistics for Engineers*. Taylor & Francis.
- Jonhson N., Leone F., (1977) *Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences*, vol. 1, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Вальд А. (1960) Последовательный анализ: Монография / Перевод с англ. — М.: Физматиз (Vald A. (1960) Posledovatelnyiy analiz: Monografiya / Perevod s angl. — М.: Fizmatiz). — 320 с/р.
- Horst Rinne, (1995) Hans Joachim Mittag. *Statistische Methoden der Qualitätssicherung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, München, Wien,.
- Є.Т. Володарський, М.В. Добролюбова, М.О. Клевцова. (2017) Аналіз чутливості контрольних карт Шухарта. Інформаційні системи, динаміка та керування (E.T. Volodarsky, M.V. Dobrolyubova, M.O. Klevtsova. (2017) Analysis of the sensitivity of the Shekhart control cards. *Information Systems, Dynamics and Keruvannya*) № 17. — с/р. 51—60.

Отримано / received: 12.07.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.Ю. Кучеруком (Україна).
Prof. V.Yu. Kucheruk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307_2180(4)2019.31_33

УДК 621.3

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ

Device for Generating and Measuring Time Intervals

І. Оробець, провідний інженер з метрології,
e mail: isystem.ua@gmail.com

В. Шевченко, директор Кам'янської філії,
e mail: vnshevchenko.dndz@gmail.com

ДП «Дніпростандартметрологія», м. Дніпро, Україна

I. Orobets, leading metrology engineer,
e mail: isystem.ua@gmail.com

V. Shevchenko, director of the Kamyansky branch,
e mail: vnshevchenko.dndz@gmail.com

Dniprostandartmetrology, Dnipro, Ukraine

Запропоновано пристрій, який дозволяє розширити функціональні можливості засобів вимірювальної техніки (генератора і частотоміра) та використовувати їх як робочі еталони у складі комплексу для перевірки та калібрування секундомірів. Для лабораторій, в яких є в експлуатації зазначені прилади, цей підхід дозволить відмовитися від придбання додаткових еталонів, що сприятиме зменшенню витрат на обслуговування і калібрування еталонного обладнання.

The article suggests a device that extends the functionality of the measuring devices such as generators and frequency meters. So these devices can be used as part of working standards in a complex for verification and calibrating stopwatches.

The device consists of an electronic commutator and a component controlled by a microcontroller, which forms the required intervals of time and provides a necessary connection from the generator output to the frequency counter input, turned on in the pulse counting mode.

The control signal simultaneously arrives at the commutator and the device for automatic start/stop of stopwatches.

The circuit design of the device allows minimizing the device's influence on the overall metrological characteristics of the complex through the use of a high-speed controlled M74HC125 buffer (high-speed CMOS QUAD BUFFER (3-STATE)) as a switch.

The M74HC125 buffer in this device is the only metrologically significant node; the state switching time of which in the aspect of this task can be ignored (Fig. 3).

A computer and standard software, such as HyperTerminal from the Windows XP or PuTTY distribution, are used to control and communicate with the device.

The device can be connected to the computer via USB.

For laboratories that have these instruments in operation, this approach can help to avoid acquisitions of the additional reference equipment, which helps to reduce the maintenance and calibration costs of reference equipment.

Ключові слова: комутатор, час, частота, таймер, секундомір, перевірка, калібрування.

Keyword: switch, time, frequency, timer, stopwatch, verification, calibration.

У науково технічній діяльності вимірювальних лабораторій існують завдання, що вимагають формування тривалих інтервалів часу.

Наприклад, для перевірки (калібрування) секундомірів потрібний еталоний формувач інтервалів часу; як такого ДСТУ 7230: 2011 [1] рекомендує використовувати секундомір еталонний з таймерним виходом (типу СТЦ 1 і ан.), а МПУ 101 / 07 2003 [2], для перевірки (калібрування) годинників таймерів — синхронometr Ч7 15.

На сьогодні вітчизняна промисловість не випускає аналогічних приладів, а обслуговування і ремонт приладів, що перебувають в експлуатації, з кожним роком стають складнішими, оскільки елементна база, яка застосовується в таких приладах, давно не випускається. Придбання аналогічних приладів імпортного виробництва потребує значних фінансових витрат.

Для вирішення зазначених вище завдань пропонується пристрій для формування та вимірювання часових інтервалів (далі SSC), який дозволяє генерувати задані інтервали часу, а для їх контролю використовувати генератор і частотомір з функцією підрахунку імпульсів, а також керувати пристроєм для автоматичного пуску / зупинки секундомірів.

Для лабораторій, у яких є в експлуатації такі прилади, цей підхід дозволить розширити їх функціональні можливості та знизити витрати на обслуговування



І. Оробець



В. Шевченко

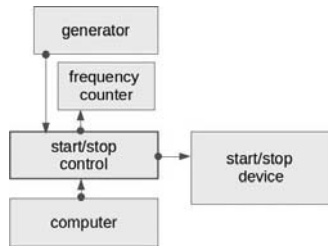


Рис. 1. Функціональна схема установки для повірки (калібрування) секундомірів: generator — генератор, frequency counter — частотомір (лічильник імпульсів), start/stop control — SSC, start/stop device — пристрій для автоматичного пуску та зупинки секундомірів, computer — персональний комп'ютер

Fig. 1. Functional scheme of the installation for verification (calibration) of the stopwatch: generator — generator, frequency counter — frequency meter (pulse counter), start/stop control — SSC, start/stop device — device for automatic start and stop of stopwatches, computer — personal computer

і калібрування еталонного обладнання. Пристрій дозволяє модернізувати установки для повірки (калібрування) механічних та електронних секундомірів.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Функціональну схему установки для повірки (калібрування) секундомірів наведено на рис. 1.

Пристрій складається з електронного комутатора DD1 (рис. 2) і мікропроцесорного блока ARDUINO NANO [3] на базі мікроконтролера ATMEGA328 [4]. SSC формує необхідну тривалість інтервалу часу і забезпечує комутацію сигналу з виходу генератора на вхід частотоміра, включеного в режимі підрахунку імпульсів, а також керує пристроєм для автоматичного пуску / зупинки секундомірів.

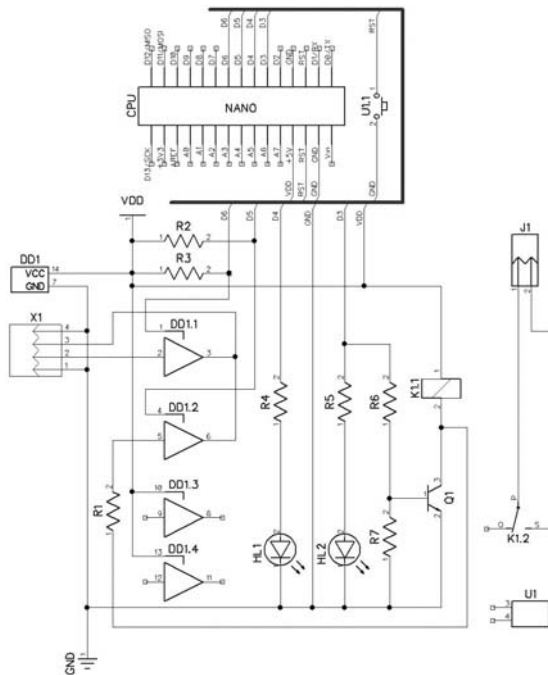


Рис. 2. Принципова схема формувача часових інтервалів SSC
Fig. 2. Schematic diagram of SSC time interval generator

WAVEFORM 2: OUTPUT ENABLE AND DISABLE TIMES
(f = 1 MHz; 50% duty cycle)

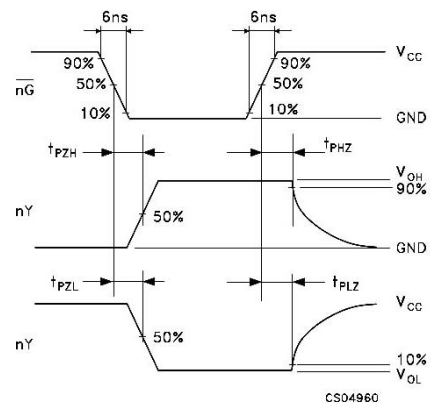


Рис. 3 Оцилограма часу переключення стану буфера M74HC125 [5]

Fig. 3 Oscillogram of switching state of buffer state M74HC125 [5]

Частотомір підраховує кількість імпульсів, що прийшли з генератора за встановлений проміжок часу. Необхідна дискретність відліку регулюється частотою генератора.

Наприклад, за встановленої частоти 10 кГц дискретність 0,0001 с.

Точність методу, в основному, залежить від метрологічних характеристик використовуваного генератора, оскільки точність частотоміра у режимі лічильника імпульсів, як правило, не перевищує ±1 одиниці відліку.

Модуль підключається до комп'ютера через інтерфейс USB.

Підключення генератора до входу частотоміра здійснюється через високошвидкісний буфер

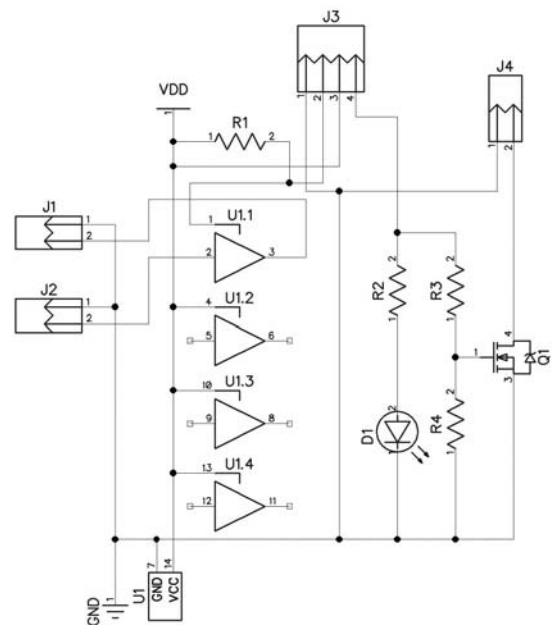


Рис. 4. Принципова схема пристрою з вихідним каскадом на польовому транзисторі (IRLR/U2905 — HEXFET)
Fig. 4. Principal scheme of the device with the output stage on the field transistor (IRLR/U2905 — HEXFET)

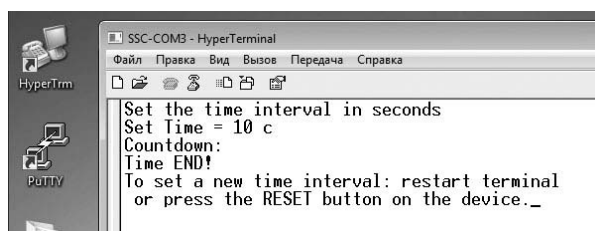


Рис. 5. Відображення процесу роботи системи у вікні терміналу

Fig. 5. Displays the system operation process in the terminal window

M74HC125 [5] (DD1.1, рис. 2) через роз'єм X1. В якості індикаторів HL1 (живлення) та HL2 (сигнал керування реле) застосовані світлодіоди INL 5AX30, для обмеження току через них встановлені резистори R4 і R5 номіналом 2.2 кОм.

Резистори R2 і R3 номіналом 100 кОм забезпечують високоімпедансний стан буфера в режимі очікування.

Резистори R6 (1 кОм) і R7 (22 кОм) призначені для забезпечення стабільної роботи транзистора Q1 (MMBT2222A SOT23) в режимі ключа.

Всі резистори в корпусі 0805.

Сигнал керування подається одночасно на вузол комутації (вхід частотоміра — вихід генератора) і на схему керування пристроєм для автоматичного пуску/зупинки секундомірів.

Принципову схему пристрою представлено на рис. 2.

Затримку в схемі синхронізації, яка зумовлена часом перемикавання стану високошвидкісного буфера M74HC125 (high speed CMOS QUAD BUFFER (3 STATE) fabricated with silicon gate C2MOS technology), можна вважати не суттєвою, що підтверджує осцилограма (рис. 3).

Як ключ для комутації пристроєм для пуску/зупинки секундомірів (*start/stop device*, рис. 1), можна використовувати польовий транзистор, наприклад,

IRLR/U2905 — HEXFET [6] (рис. 4) або електромагнітне реле (рис. 2).

Модуль, принципову схему якого наведено на рис. 2, підтримує додатковий режим імітації вирадоміра з імпульсним виходом (DD1.2, R1, R2).

Структура HEXFET — це організація в одному кристалі тисячі паралельно включених МОП транзисторів, що утворюють шестикутник. Таке рішення дозволило істотно знизити опір відкритого каналу і зробило можливим комутацію великих струмів.

Але для перевірки (калібрування) механічних секундомірів ключовий елемент не має принципового значення, оскільки затримка часу включення і виключення взаємно компенсується.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

За використання частотоміра *Pendulum CNT 85* [7] і генератора *Protek 93120* [8] система забезпечує формування часових інтервалів:

Частота, (Гц)	Максимальний інтервал часу, (год)
1 Гц	27777777777777.8
10 Гц	277777777777.78
100 Гц	27777777777.778
1000 Гц	2777777777.7778
10000 Гц	277777777.77778

Для обміну даними з модулем використовується стандартне порогове забезпечення — термінал, наприклад *HyperTerminal* з дистрибутива *Windows XP* або *PuTTY* [9].

Програми *HyperTerminal* і *PuTTY* працюють на комп'ютерах під управлінням усіх операційних систем сімейства *Windows*. *PuTTY* також можна встановити на *Linux*.

На рис. 5 наведено фрагмент відображення процесу роботи системи у вікні програми *HyperTerminal*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. DSTU 7230:2011 Метрологія. Секундоміри механічні. Методика перевірки (калібрування) (DSTU 7230: 2011 Metrology. Stopwatches are mechanical. Calibration technique (calibration)).
2. МПУ 101/07 2003 Інструкція. Метрологія. Годинники таймери типу RS. Методика перевірки (MPU 101 / 07 2003 Instruction. Metrology. Clock timers type RS. Method of verification).
3. <https://store.arduino.cc/arduino-nano> The Arduino Nano is a small, complete, and breadboard friendly board based on the Atmega328.
4. <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/> ATmega328P (технічне описання).
5. M74HC125 QUAD BUS BUFFER (3 STATE), Data Sheet (технічний опис).
6. <https://eu.mouser.com/pdfdocs/irlr2905pbf.pdf> IRLR/U2905 — HEXFET Power MOSFETs, Data Sheet (технічний опис).
7. Pendulum CNT 85. Інструкція з експлуатації (Operating Instructions).
8. Protek 93120. Інструкція з експлуатації (Operating Instructions).
9. <https://www.putty.org> PuTTY is an SSH and telnet client. 🖨

Отримано / received: 03.04.2019.

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_2180(4)2019.34_38

УДК 043.3

ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПРИЛАДОВИМИ СИСТЕМАМИ (ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ)

Processing of Measurement Results for Mechanical Values by Intellectual Equipment Systems (Uncertainty Conditions)



В. Квасніков, доктор технічних наук,
професор,

А. Передерко, кандидат технічних наук,

Л. Кузьмич, кандидат технічних наук,

e mail: klv@nau.edu.ua

Національний авіаційний університет, Київ, Україна,

В. Котетунов, кандидат технічних наук,

Національний транспортний університет, Київ, Україна,

e mail: v.kotetunov@ukr.net

V. Kvasnikov, doctor of technical science in engineering,
professor,

A. Perederko, candidate of technical sciences,

L. Kuzmich, candidate of technical sciences,

e mail: klv@nau.edu.ua

National Aviation University, Kyiv, Ukraine,

V. Kotetunov, candidate of technical sciences,

National Transport University, Kyiv, Ukraine,

e mail: v.kotetunov@ukr.net

Стаття присвячена вимірюванню механічних величин. Запропоновано методи, спрямовані на механічні величини інтелектуальних приладів системи (за умов невизначеності). Обґрунтовано підходи щодо опрацювання результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами, зокрема, оцінювання точності вимірювань за умов невизначеності.

This article is devoted to the measurement of mechanical quantities. The proposed methods are directed to the mechanical values of the intellectual devices of the system (in conditions of uncertainty). At the present stage of the development of intellectual systems, the issue of creating methods for rapid processing of the obtained results, determining the accuracy of their measurement in real time, in particular in solving management problems and making decisions under uncertainty, remains an issue.

The result of the measurement of mechanical quantities, in particular the cost of thermal energy by intelligent instrumentation systems (IPS), is complete, provided that it is accompanied by an estimate of its accuracy [1].

The processing accuracy of the measurement results depends on the type of measurement, the number of experimental data, the accuracy requirements of the measurement, and so on. Only during direct one-time measurements the result of the study may be the result of the measurement (provided that the systematic errors of measurement are not corrected). In other measurements, processing can be

done using standardized techniques (eg statistical methods), or require the creation of special algorithms.

In general, the processing involves the following steps [2, 3, 4]:

- preliminary analysis of the results of observations (primary measurements), their systematization of the rejection of obviously false results;
- Correction of the influence of systematic effects (study of measurement conditions, calculation and amendment);
- analysis of the effects of random effects, testing hypotheses about their distribution, selection of the best estimates of the required values;
- evaluation of the accuracy characteristics of a numerical algorithm, its stability;
- execution of calculations in accordance with the chosen algorithm;
- analysis of the results;
- submission of measurement results and characteristics of their accuracy in the appropriate form.

Each type of measurement has its own characteristics and therefore the specific content of these operations of processing the results of a particular type of measurement has certain differences.

The approaches to processing the results of measurement of mechanical quantities by intelligent instrumental systems, in particular estimating the accuracy of measurements under uncertainty, are substantiated.

Ключові слова: механічні величини, похибка, невизначеність вимірювання, середнє квадратичне відхилення.

Keywords: mechanical values, error, uncertainty of measurement, mean square deviation.

На сучасному етапі розвитку інтелектуальних систем актуальним залишається питання створення методів швидкого опрацювання отриманих результатів, визначення точності їх вимірювання за реального часу, зокрема, в процесі розв'язування задач управління та прийняття рішень за умов невизначеності.

Результат вимірювання механічних величин, зокрема витрат теплової енергії, інтелектуальними приладовими системами (ІПС), є повноцінним за умови, що він супроводжується оцінюванням його точності [1].

Обсяг опрацювання результатів точності вимірювання залежить від різновиду вимірювання, кількості

експериментальних даних, вимог щодо точності вимірювання тощо. Лише під час прямих разових вимірювань отриманий результат дослідження може бути результатом вимірювання (за умови, що систематичні похибки вимірювання не коригують). За інших вимірювань опрацювання може здійснюватися за стандартизованими методиками (наприклад, статистичними методами) або вимагати створення спеціальних алгоритмів.

У загальному випадку опрацювання передбачає такі етапи [2—4]:

- попередній аналіз результатів спостережень (первинних вимірювань), їх систематизація, відкидання явно недостовірних результатів;
- корекція впливу систематичних ефектів (вивчення умов вимірювань, розрахунок і внесення поправок);
- аналіз впливу випадкових ефектів, перевірка гіпотез відносно їх розподілу, вибір найкращих оцінок шуканих величин;
- оцінювання характеристик точності числового алгоритму, його стійкості;
- виконання розрахунків згідно з вибраним алгоритмом;
- аналіз отриманих результатів;
- подання результатів вимірювань та характеристик їх точності за відповідною формою.

Кожний вид вимірювань має свої особливості, й тому конкретний зміст зазначених операцій опрацювання результатів конкретного виду вимірювання має певні відмінності.

Практична корисність будь якого вимірювання визначається зазначенням його похибки, тобто кількості характеристики відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної механічної величини.

У вітчизняних нормативних документах для оцінювання точності вимірювань зберігається традиційний підхід, що ґрунтується на понятті «похибка вимірювань» [5]. Традиційний аналітичний підхід до визначення похибок полягає у поділі їх на складові, кожна із яких зумовлена певними факторами. Це дозволяє досліджувати джерела складових похибок, проводити необхідні експерименти, у тому числі допоміжні вимірювання, і, як наслідок, визначити властивості похибки та з необхідною точністю оцінити її складові. Знаючи властивості й оцінки складових, можна правильно врахувати їх за оцінкою повної похибки, а також за необхідності ввести поправку до результату вимірювання або організувати вимірювальний експеримент так, щоби звести окремі складові, а з ними й повну похибку, до до

пустимого значення. Так, зокрема, за вимірювання витрат теплової енергії інтелектуальними приладами системами похибка вимірювання не має перевищувати $\pm 5\%$.

Для підвищення об'єктивності оцінки похибок вимірювань механічних величин і визначення шляхів їхнього зменшення, з метою покращання якості вимірювань, необхідно дослідити можливі причини виникнення різних складових повної похибки вимірювань і закономірності їх змінювання.

Новий підхід, який рекомендується Міжнародним комітетом з мір та ваг (МКМВ), Міжнародною організацією законодавчої метрології (МОЗМ), Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК), іншими міжнародними організаціями, ґрунтується на оцінюванні точності вимірювань за допомогою поняття «невизначеність вимірювань» [5—7].

Уперше концепція невизначеності з'явилася у відповідь на появу нових, нетрадиційних об'єктів вимірювання в певних сферах (аналітична хімія, психологія, соціологія, педагогіка, медицина тощо); прагнення усунути слабкі місця концепції похибки результату вимірювання; вплив нових наукових напрямів (кібернетики, теорії інформації, теорії прийняття рішень, теорії нечітких множин); розроблення математичної моделі вимірювання, що відповідає сучасним тенденціям розвитку теорії вимірювань. У роботі *L. Finkelstein «Theory and Philosophy of Measurement»* запропоновано концепцію невизначеності як один із напрямів розвитку теорії вимірювань [8].

Розроблена вченими світу теорія невизначеності зумовила появу документа Міжнародної організації стандартизації (ISO) «*Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*», виданого у 1993 році [9].

Головні відмінності концепції невизначеності від концепції похибки результату вимірювання такі: відхід від поняття істинне значення вимірюваної величини як такого, що не піддається пізнанню; у зв'язку з останнім поняття похибки вимірювання як відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини втрачає сенс; невизначеність результату вимірювання характеризується чи середнім квадратичним відхиленням (СКВ), чи симетричними границями, тому всі систематичні похибки підлягають корекції, а їх невилучені залишки входять до розсіювання результату вимірювання; у зв'язку з останнім недоцільним є сенс розподілу похибок результату вимірювання на систематичні і випадкові; залишається тільки розподіл компонентів невизначеності на компоненти катего

рії A і компоненти категорії B за способом їх оцінювання.

Між двома концепціями (невизначеності результату вимірювання і похибки результату вимірювання) є суттєві відмінності, які треба враховувати, складаючи методики опрацювання даних вимірювань і подаючи кінцевий результат. Але відкидати чи не помічати концепцію невизначеності не доцільно. Це унеможливить гармонізацію вітчизняних і зарубіжних нормативно технічних документів та уповільнить роботу в нетрадиційних сферах вимірювань.

Метою цієї роботи є формування методу опрацювання результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами із застосуванням нового підходу, що базується на теорії невизначеності, для опрацювання даних і подання результату вимірювання.

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПОВНИМ ОБҐРУНТУВАННЯМ ОТРИМАНИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У літературних джерелах з метрології та в міжнародних документах немає достатньо переконливих обґрунтувань щодо відмови від терміна «похибка» і заміни його новим терміном «невизначеність». Більше того, рекомендовані методи оцінки для відображення кількісних характеристик невизначеності мають або той самий, або дещо модифікований вид, як і для похибок, зберігаючи, в основному, фізичний зміст. Тому заміна зазначених термінів зумовлена не принципово якісними, фундаментальними обґрунтуваннями, а асоціативністю їх розуміння. Так, термін «похибка» асоціюється з визначеною величиною, а термін «невизначеність» — із сумнівом, невпевненістю, що нібито більше відображає фізичний зміст результату вимірювання [9—11].

Термін «невизначеність» означає сумнів, він розширює сенс невизначеності вимірювання в бік сумніву відносно результату вимірювання.

Терміни «істинне значення вимірюваної величини» і «похибка результату вимірювання» не використовують у формуванні групи понять, пов'язаної з результатом вимірювання. Використовують поняття «оцінене значення вимірюваної величини» і «невизначеність».

Невизначеність, за ДСТУ 2681 94, — це оцінка, що характеризує діапазон значень, у якому є істинне значення вимірюваної величини. У керівному документі ISO наведено таке визначення: невизначеність вимірювання — параметр, об'єднаний з результатом вимірювання, що характеризує розсіювання значень вимірюваної величини.

Невизначеність характеризує розсіювання значень вимірюваної величини. Параметром розсіювання є середнє квадратичне відхилення чи половина ширини інтервалу розсіювання з установленим рівнем довіри. Рівень довіри в цьому випадку дорівнює одиниці [11].

Невизначеність результату вимірювання (НВ) включає багато компонентів. Деякі з них можна охарактеризувати СКВ, отриманим на основі статистичного розподілу результату вимірювань. Решту компонентів можна також охарактеризувати СКВ, але отриманим на основі суб'єктивно визначеного розподілу ймовірностей чи за допомогою іншої інформації [10].

Очевидно, що результат вимірювання є найкращою оцінкою значення вимірюваної величини, коли всі складові невизначеності, що виникають у результаті систематичних ефектів, вилучено, наприклад, за допомогою корекції, введення поправки і використання еталонів; невилучені залишки входять до розсіювання результатів вимірювання і тобто до невизначеності.

Отже, невизначеність вимірювань означає сумнів відносно достовірності результатів вимірювань.

Для кількісного представлення пропонується три її види: стандартна невизначеність (типи A і B), сумарна стандартна невизначеність і розширена невизначеність.

Компоненти типу A — компоненти НВ, які оцінюють за допомогою статистичного аналізу ряду вимірювань.

Компоненти типу B — компоненти НВ, які оцінюють за допомогою інших операцій.

Стандартна невизначеність (u) — це невизначеність результату прямих вимірювань, виражена через СКВ.

За способом обчислення і представлення розрізняють два типи стандартної невизначеності: тип A і тип B .

Стандартна невизначеність типу A (u_A) — це невизначеність, яка обчислюється статистичними методами опрацювання результатів багаторазових вимірювань.

Оцінювання стандартної невизначеності типу A відбувається у такий спосіб:

1. Якщо кількість дослідів $n < 10$, u_A не оцінюють. Для $10 \leq n < 20$ — якщо закон розподілу ймовірностей невідомий, для оцінювання u_A приймають рівномірний закон. Якщо $n \geq 20$, — закон розподілу ймовірностей визначають апроксимацією експериментальних даних.

2. Для прямого вимірювання результат визначають як середнє арифметичне отриманих значень,

тоді невизначеність за типом *A* обчислюють за формулою:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (1)$$

де x_i — отриманий результат вимірювання;
 $\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n$ — середнє арифметичне результатів вимірювання;

n — кількість проведених вимірювань.

3. Для опосередкованого вимірювання результат визначають за оцінками декількох величин, тоді невизначеність за типом *A* обчислюють для кожної вихідної величини:

* якщо значення величини розподілені за рівномірним законом, за формулою:

$$u_A = b / \sqrt{3}, \quad (2)$$

де b — півширина інтервалу (для несиметричного закону розподілу $b = (b_+ + (-b_-)/2)$);

* якщо значення величини розподілені за нормальним законом, невизначеність обчислюють як СКВ за формулою:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

У випадку, коли дисперсія результатів урахована у невизначеності, то додатково похибку ІПС ураховувати не потрібно, оскільки вона відображена у дисперсії.

Стандартна невизначеність типу *B* (u_B) — це невизначеність, яка обчислюється за деякою апріорною інформацією: даними попередніх вимірювань величин, що входять у рівняння; даними вимірювань, що ґрунтуються на досвіді експериментатора або загальних знаннях стосовно поведінки відповідних об'єктів і засобів вимірювальної техніки; даними їх повірки, атестування і калібрування, невизначеності констант і довідкових даних тощо. Невизначеність усіх цих даних звичайно відображають границями відхилення результату вимірювання фізичної величини від оцінки її істинного значення. Тому невизначеність вимірювань типу *B* залежить від закону розподілу можливих значень вимірюваної величини.

Оцінювання стандартної невизначеності типу *B* відбувається у такий спосіб:

1. Ґрунтуючись на рівнянні залежності вимірюваної величини від вихідних величин, складають переліки: вимірюваних вихідних величин; невимірюваних впливних вихідних величин; уведених поправок на відомі систематичні похибки; коефіцієнтів і констант; додаткових похибок тощо.

2. Невизначеності усіх вхідних величин оцінюють інтервалами і перетворюють їх у середньоквадратичне відхилення, при цьому закон розподілу

їхніх ймовірностей, якщо він невідомий, приймають рівномірним. Формула перерахування інтервальної оцінки у середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = b/t, \quad (4)$$

де σ — середньоквадратичне відхилення (СКВ); b — напівширина інтервалу; t — значення функції Лапласа для нормального закону розподілу ймовірностей (або аналог значення функції Лапласа для іншого закону).

Сумарна стандартна невизначеність — це стандартна невизначеність результату непрямих вимірювань. Вона має фізичний зміст дисперсії результату непрямих вимірювань і обчислюється через дисперсії (квадрати стандартних невизначеностей) інших фізичних величин (аргументів), через які визначається шукана фізична величина.

Якщо величини, що входять у рівняння, мають різні одиниці вимірювання, то безпосередньо сумувати інтервальні оцінки невизначеності не можна, їх необхідно звести до безрозмірних величин — середньоквадратичних відхилень згідно із формулою (4), за однакових рівнів довіри $P(\partial)$.

Якщо закон розподілу невідомий, то, під час перерахунку інтервальної оцінки в середньоквадратичне відхилення, приймають рівномірний закон, а під час перерахунку СКВ в інтервальну оцінку — нормальний закон. Тобто, значення функції Лапласа t або його аналога обирають таким, що би забезпечити «запас» невизначеності. Якщо закон розподілу відомий, то коефіцієнт для перерахунку приймають згідно з цим законом.

Оцінювання сумарної стандартної невизначеності відбувається у такий спосіб:

1. Під час вимірювання показників якості текстильних матеріалів сумарну стандартну невизначеність типу *A* визначають за формулою для некорельованих величин:

$$u_{CA} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial f / \partial x_i)^2 \cdot u_B^2(x_i)}, \quad (5)$$

де $f(x_i)$ — залежність вимірюваної величини від вхідних величин (рівняння вимірювання); $\partial f / \partial x_i$ — коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт), який визначають як частинну похідну рівняння залежності вимірювальної величини за однією із вхідних величин. Коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт) відображає зміну впливу цієї вхідної величини на результат вимірювання; $u_A(x_i)$ — стандартна невизначеність за типом *A* вихідної величини.

2. Сумарну стандартну невизначеність типу *B* визначають за формулою:

$$u_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial f / \partial x_i)^2 \cdot u_B^2(x_i) + u_B^2(z_i)}, \quad (6)$$

де $u_B(x_i)$ — стандартна невизначеність за типом *B* величин, що входять у рівняння залежності

вимірюваної величини; $u_B(z_i)$ — стандартна не визначеність за типом B величин, що не входять у рівняння залежності вимірюваної величини.

3. Якщо впливний фактор не входить у рівняння залежності вимірюваної величини, його враховують у невизначеності, але без урахування коефіцієнта впливу (вагового коефіцієнта).

Тоді сумарна стандартна невизначеність:

$$u_C = \sqrt{u_{CA}^2 + u_{CB}^2}. \quad (7)$$

Розширена невизначеність — це величина, що визначає інтервал, у границях якого міститься більша частина результатів непрямих вимірювань, які з достатньою підставою можуть бути приписані вимірюваній величині. Розширена невизначеність вимірювань обчислюється через сумарну стандартну невизначеність.

Розширену невизначеність визначають за такою формулою:

$$U = k \cdot u_C, \quad (8)$$

де k — коефіцієнт охоплення, який залежить від заданого рівня довіри $P(\partial)$ і ефективного числа ступенів свободи. Для рівня довіри $P(\partial) = 0,95$ за нормального закону розподілу його вірностей коефіцієнт охоплення $k = 1,96$, за рівномірного закону розподілу — $k = 1,65$ [11].

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОЇ РОБОТИ У ЗАЗНАЧЕНОМУ НАПРЯМУ

Основою статистичних досліджень є результати вимірювань, тобто метрологічні дослідження. Останніми роками в теоретичній та практичній метрології виникають зміни, які пов'язані з введенням, у першу чергу, поняття «невизначеність» для оцінювання достовірності результатів вимірювань та засобів вимірювання. Разом з цим під час проведення деяких метрологічних робіт зберігається використання поняття «похибка». Така подвійність оцінки результатів вимірювань зумовлює достатньо повільне впровадження невизначеності в метрологічну практику України. Об'єктами дослідження є метрологічні характеристики та методи їх визначення.

Термін «невизначеність вимірювання» можна трактувати як параметр, який характеризує розсіювання значень, що включає складові, зумовлені систематичними впливами.

Невизначеність визначення вимірюваної величини є мінімальною невизначеністю вимірювання. Цей інтервал, який називається вимірюваним значенням величини, може бути представлений одним із його значень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- Кузьмич Л.В. (2016) Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин / Л.В.Кузьмич // Вісник Інженерної Академії України. Київ (Kuzmich L.V. (2016) Modern tendencies in the development of instrumentation systems for measuring mechanical quantities / L.V.Kuzmich // Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. Kyiv). — № 2. — С/Р. 180—184.
- Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України № 113/98 ВР від 11.02.1998 (зі змінами, внесеними згідно із Законом № 762 IV від 15.05.2003, в редакції Закону № 1765 IV від 15.06.2004). [Електронний ресурс]. — Режим доступу (On metrology and metrological activity: Law of Ukraine No. 113/98 VR dated February 11, 1998 (as amended in accordance with the Law No. 762 IV of May 15, 2003, as amended by Law No. 1765 IV of June 15, 2004). [Electronic resource]. — Mode of access: zakon.rada.gov.ua/laws/show/113/98 vr.
- Захаров И.П. (2002) Обработка результатов измерений: Уч. пособие — Харьков:Изд во Нац. уни та внутренних дел (Zakharov I.P. (2002) Processing of measurement results: Uch. allowance — Kharkiv: Publishing house. of the same interior affairs). — 125 с/р.
- Грановский В.А., Сирая Т.Н. (1990) Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. — М.: Энергоатомиздат (Granovsky V.A., Syraya T.N. (1990) Methods of processing experimental data in measurements. — Moscow: Energoatomizdat). — 320 с/р.
- Чалый В.П. (2006) Неопределенность и погрешность, их сходство, различие и употребление в разных метрологических процедурах / В.П. Чалый // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. — № 7(56). Невизначеність вимірювання: наукові, нормативні та прикладні аспекти (Chaly V.P. (2006) Uncertainty and error, their similarity, difference and use in different metrological procedures / V.P. Chaly // Collection of scientific works. Information processing systems. — N 7(56). Uncertainty of Measurement: Scientific, Regulatory and Applied Aspects). — С/Р. 82—86.
- Захаров И.П. (2002) Теория неопределенности в измерениях: [учеб. пособие] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. — Харьков, Консум (Zakharov I.P. (2002) The theory of uncertainty in measurements: [study, allowance] / I.P. Zakharov, V.D. Cukush — Kharkov, Consum), — 256 с/р.
- Мерживська В.В. (2008) Оцінювання невизначеності вимірювання параметрів автомобільних двигунів під час стенового випробування / В.В. Мерживська // Системи обробки інформації. — Харків (Merzhivska V.V. (2008) Estimation of Uncertainty of Measurement of Automobile Engine Parameters during Stand Test / V.V. Merzhivska // Systems of information processing. — Kharkiv).
- Паракуда В.В. (2005) Еволюція вимог до метрології / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалый // Український метрологічний журнал (Parakuda V.V. (2005) Evolution of Requirements for Metrology / V.V. Parakuda, B.D. Kolpak, V.P. Chalyi // Ukrainian Metrological Journal). — №3. — С/Р. 56—60.
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. — ISO, Switzerland, 1993.
- ДСТУ Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT) (DSTU N RMG 43: 2006 Metrology. Applying the «Guide to Expression of Uncertainty in Measurement» (RMG 43: 2001, IDT)).
- Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань: Технічний звіт EUROLAB № 1/2006//Переклад з англ. та науково технічне редагування: А.В. Абрамов; А.М. Коцюба, В.М. Новіков. — Київ, Євролаб Україна (Guidelines for estimating the uncertainty of the measurement of the results of quantitative tests: EUROLAB Technical Report # 1/2006 // Translation from English. and scientific and technical editing: A.V. Abramov, A.M. Kotsyuba, V.M. Novikov — Kyiv, EuroLab Ukraine), 2008. — 51 с/р.

Отримано / received: 29.06.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.А. Подтяшинським (Україна).
Prof. Yu.A. Podtyashynsky, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307 2180(4)2019.39 43

УДК 536.08

ІНЕРЦІЙНІСТЬ ПОКАЗІВ РІДИННИХ МІКРОТЕРМОМЕТРІВ

**Inertia of liquid
microthermometer readings**



С. Яцишин, доктор технічних наук, професор кафедри «Інформаційно вимірювальні технології», e mail: slav.yat@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000 0002 4874 1866>

Х. Мельник, аспірант,

e mail: hrustuna_levytska@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000 0002 8248 1922>

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

S. Yatsyshyn, doctor of technical sciences, professor of department «Information measuring technologies» e mail: slav.yat@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000 0002 4874 1866>

Kh. Melnyk, PhD student,

e mail: hrustuna_levytska@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000 0002 8248 1922>

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Потреба у рідинних мікротермометрах з малою інерційністю i , відповідно, з малим діаметром капіляра зростає. Їх стала теплової інерції є малою, оскільки теплова рівновага термометра і контрольованого об'єкта встановлюється надзвичайно швидко. Проте, пересування рідини в капілярі термометра, що визначає швидкість відліку температури, ускладнюється за мірою зменшення діаметра капіляра. Для оцінки впливу цього гідродинамічного чинника скористалися законом Жюрена щодо в'язкості рідини, яка експоненційно зменшується з підвищенням температури. Відповідно, вона обернено пропорційна швидкості переміщення меніска стовпчика термометра. Нами проаналізовано вплив різних чинників на сталу теплової інерції мікротермометрів.

Currently the need for micro thermometers with low inertia and accordingly with the small diameter of the capillary is increasing, and information about their inertia, which is necessary, in particular, for medicine, becomes insufficient. Micro thermometers with liquid-phase sensitive elements are made on the basis of capillaries filled with liquid. Important is the type of liquid (water, alcohol, mercury, etc.), the angle of inclination of the thermometer capillary, and its internal diameter. The time of their thermal inertia is rather small, since the thermal equilibrium

of the thermometer and the controlled object is set extremely fast. However, in reality, the movement of a liquid in a capillary of a thermometer, which determines the readout of the temperature value, due to the change in the thermodynamic conditions during the measurement, is not so rapid to satisfy the metrology. The experience of studying the spontaneous penetration of liquids in porous micro and nano channels of natural structures is limited mainly by works that capture the significance of the influence of initial conditions.

The features of filling capillaries of different internal diameters at different angles of inclination are considered in the paper. It enables us to work out the technology of manufacturing and application of these thermometers, and thus to predict the duration of setting the micro thermometers' indications not limited by thermal inertia.

For this purpose, the Washburn's and Bosanquet equations are considered. Rate of filling the capillary is affected by fluid viscosity, surface tension, length of the filled capillary, and its diameter. Since the viscosity of the liquid increases slightly with pressure and decreases exponentially with temperature, it is inversely proportional to the rate of liquid penetration or to the rate of moving meniscus. We have analyzed the impact of these factors on the micro thermometers' performance that promotes their efficient production and application.

Ключові слова: рідинний термометр, вимірювання температури, мікротермометр, стала теплової інерції, тривалість установлення показів термометра, градувальні характеристики.

Keywords: liquid-in-glass thermometer, temperature measurement, microthermometer, thermal inertia, duration of setting the thermometer's indications, calibration characteristics.

Існує чимало різних видів термометрів, які відрізняються використанням залежностей різних властивостей речовини від температури. Поширеними вважаються рідинні термометри, легкі у виконанні та використанні. Вони набули масового



С. Яцишин



Х. Мельник

застосування, оскільки не потребують допоміжних приладів та джерел енергії. Серед рідинних термометрів вирізняються ртутні термометри та термометри з нертутним заповненням (спиртові, ксилолові, толуолові, які використовуються для вимірювання температур від -200°C), тощо. Під час їх виготовлення використовують капіляри з діаметром каналу від 100 мкм і вище. У процесах перевірки й експлуатації таких термометрів уникають вимірювань достатньо низьких температур, оскільки у вузьких капілярах стовпчик ртуті рухається стрибкоподібно і навіть може розірватися за зниження вимірюваної температури. Зазначені проблеми посилюються під час проектування, виготовлення та використання за призначенням мікро і нанотермометрів.

Мета роботи полягає у вивченні аспектів заповнення різними термочувливими рідинами (на етапі виготовлення) капілярів мікротермометрів, їх переміщення в процесах вимірювання температури, а також дослідження характеристик інерційності, пов'язаних не стільки з особливостями теплообміну, але й з рухом термочувливої рідини по капіляру внаслідок зміни температури.

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА ГІДРОДИНАМІЧНІ ЯВИЩА ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ МІКРОТЕРМОМЕТРІВ

Стала теплової інерції термометрів визначається інтенсивністю теплообміну термометра з вимірюваним середовищем. Термометр, поміщений у рідке середовище з високим коефіцієнтом теплообміну, характеризуватиметься меншою сталою порівняно з таким самим термометром, установленим на повітрі. Експериментальні дані стосовно деяких мікро термопар, близьких за розмірами та отже за сталою теплової інерції до досліджуваних мікротермометрів, наведені у [1—2]. Свій вплив чинить теплоемність термочувливого матеріалу та інших матеріалів конструкції термометра c_{therm} . Ці параметри описані у [3], де показано, що методична складова похибки вимірювання температури визначається співвідношенням їх лінійних розмірів (за співмірних значень їх масово теплофізичних характеристик та характеристик вимірюваного об'єкта $c_{therm}\rho_{therm} = c_{ob}\rho_{ob}$, де ρ — питома густина матеріалу):

$$\delta T_{met} = \frac{v_{therm}}{V_{ob}} \left(\frac{T_{therm}}{T_x} - 1 \right). \quad (1)$$

Тут v_{therm} та V_{ob} — об'єм матеріалу термометра та вимірюваного об'єкта відповідно; T_x — температура, що встановлюється у термометрі вна

слідок його теплообміну з вимірюваним об'єктом (за $V_{ob} \gg v_{therm}$ вона близька до температури останнього).

У [4] здійснено термодинамічний аналіз роботи зазначених термометрів на основі визначення сукупності чинників впливу, зумовлених дією різних термодинамічних сил і потоків на термочувливу субстанцію термометра у разі зменшення його розмірів у мікро і нанообласть. Вони призводять до формування градууювальної характеристики й до її зміни внаслідок дії функції впливу. Остання формує інструментальну складову похибки термометра за умови зміни термодинамічного стану термочувливої речовини.

Якщо у рідинного макротермометра визначальною термодинамічною силою є сила, зумовлена об'ємним розширенням термочувливої рідини, то у рідинного мікротермометра маємо справу зі зміщенням стовпчика рідини відносно певної позначки внаслідок зміни сили поверхневого натягу цієї рідини за зміни температури. Визначена залежність такого зміщення від температури слугує основою для формування градууювальної характеристики. За умови нехтування впливом механічного ступеня свободи й процесів перенесення, зумовлених ним, отримуємо 2 взаємопов'язані чинники: поверхневий натяг і температуру, — що визначають вид градууювальної характеристики рідинного мікро і нанотермометра. При цьому правило Етвеша [5] та рівняння Релея Шільда [6] визначають залежність поверхневого натягу будь якої чистої рідини від температури: за ними коефіцієнт поверхневого натягу є лінійною функцією температури. Отже, врахувавши їх, отримуємо рівняння градууювальної характеристики мікро, нанотермометра із капіляром, заповненим термочувливою рідиною:

$$\Delta h = \frac{4k'}{\gamma d} \left(\frac{N_A}{V} \right)^{2/3} (T_c - 6 - T) = C(T_c - 6 - T), \quad (2)$$

де C — стала; T_c — критична температура, за якої коефіцієнт поверхневого натягу рідини зменшується до нуля (наприклад, для води ця температура становить 547 К). Як видно, до сталої C градууювальної характеристики такого термометра входить розмір визначального конструктивного елемента, а саме, внутрішній діаметр капіляра d .

Відзначимо, що, коли термометр використовується у зоні дії градієнта температури, виникає ефект термокапілярної течії [7—8]. Він полягає у появі різниці поверхневого натягу і, отже, різниці капілярного тиску в рідині, що призводить до перенесення самої рідини або пухирців газу в нерівномірному нагрітому середовищі. Цей чинник може

виявитися істотним у формуванні додаткового дже рела похибки термометрів у наносвіті. У всякому ра зі, він уже використовується у нанотехнологіях під час створення нанодвигунів [9], рушійною силою яких слугує ефект термокапілярної течії.

Дія сил поверхневого натягу виявляється вже у звичайних термометрах викривленням меніска. Важливою для макро, мікро та нанотермометрів вважається так звана капілярна стала a , як величина, що описує характеристичні розміри системи: $L < a$, за яких суттєвими стають капілярні явища (капіляр не всмоктування, капілярний рух рідини, капілярна конденсація тощо):

$$a = \sqrt{2\sigma / ((\rho_1 - \rho_2)g)}, \quad (3)$$

де g — прискорення вільного падіння; ρ_1, ρ_2 — відповідно густина рідини і густина газу над нею. Для води за температури 293 К капілярна стала становить, наприклад, 3,8 мм. Зазначимо, що:

$$a^2 = hd / 2, \quad (4)$$

де h і d — висота і діаметр стовпчика рідини у капілярній трубці. Для визначення домінування тих чи інших сил у конструкції рідинного термометра за зменшення його розмірів у мікро, а далі й у нанообласть, доцільно скористатися введеним безрозмірним критерієм — числом Бонда Bo :

$$Bo = \rho g d^2 / \sigma, \quad (5)$$

За $Bo < 1$ домінують капілярні сили; за $Bo > 1$ — гравітаційні сили.

Випадку проникнення рідини у горизонтальні капіляри притаманні більш істотні тривалості. Асимптотичне рішення визначає максимальну тривалість встановлення показів мікротермометром. Воно описується рівнянням Лукаса Вашборна [9], що є граничним випадком достатньо значних тривалостей витримки. Спрощене рівняння Вашборна, виведене [10] для переміщення рідини у капілярній циліндричній трубці за відсутності гравітаційного поля, є достатньо точним у випадку, коли капілярна сила все ще значно перевищує силу тяжіння. Воно має вид:

$$L^2 = (\gamma D t \cos(\varphi)) / 4\eta, \quad (6)$$

де t — час, L — відстань, γ — поверхневий натяг, η — динамічна в'язкість, φ — кут між рідиною і твердим тілом.

За виведення рівняння Вашборна інерція рідини ігнорується, як незначна, що дає радше значну швидкість dL/dt для малих значень t . При цьому не змінні поточні умови Пуазейля не враховують ефектів масоперенесення, що призводять до прискорення потоку перенесення у точках зміни внутрішньої геометрії капіляра. Отримане вдосконалене рівняння Вашборна, що враховує інерцію рідини, — рів-

няння Босанке [11] — диференціальне рівняння 2 го порядку в частинних похідних. Воно описує рух рідини в тонкій капілярній трубці або у пористому матеріалі, який можна сприймати як сукупність капілярів. Використовуючи позначення x для відстані, яку проходить рідина, і припускаючи, що рух повністю зумовлений силами поверхневого натягу, без прикладеного тиску до обох кінців капілярної трубки, рівняння Босанке можна подати як:

$$\frac{d}{dt} \left(\pi r^2 \rho x \frac{dx}{dt} \right) + 8\pi \eta x \frac{dx}{dt} = 2\pi r \gamma \cos \theta. \quad (7)$$

Це рівняння вивчає початковий рух рідини за відносно малої тривалості експерименту, близької до 0:

$$x^2(t) - x^2(0) = (2b/a) \left[t - (1/a)(1 - e^{-at}) \right], \quad (8)$$

де $c = 8\eta / \rho r^2$, $b = (2\gamma \cos \theta) / \rho r$. За цієї умови визначається початкова позиція меніска, яка, як видно з рівняння, є пропорційною часу. Зрештою, рівняння розкладається до відомої форми Лукаса Вашборна, що відтворює залежність зсуву меніска від часу й в'язкості. Зсув незначно посилюється з підвищенням тиску й зменшується з підвищенням температури за експоненціальним законом.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дійсності, за певний час, що визначається сталою температурної інерції, термометр, поміщений у середовище з іншою температурою, повинен установити власні покази, відчутно змінивши рівень відліку в капілярі. Тому описані вище параметри радше характеризують спроможність виконання мікро і нанотермометра із певних конструктивних матеріалів (добір капіляра, підбір термочутливої речовини, їх взаємне змочування та проникнення такої рідини в капіляр), переміщення останньої залежно від положення капіляра термометра у просторі (горизонтальне, похиле, вертикальне), правильний вибір співвідношення довжини і діаметра капіляра, тобто узгодження заповнення рідиною (капілярна стала a), оптимізацію конструкції під певне значення сталої земного тяжіння (число Бонда Bo) тощо.

Для визначення висоти підйому рідини у капілярі використовуємо закон Жюрена. За ним висота підняття рідини у капілярі є пропорційною коефіцієнту поверхневого натягу рідини і обернено пропорційною радіусу капіляра та густині рідини (табл. 1, рисунк):

$$h = 2\sigma / \rho g r, \quad (9)$$

За нахилу капіляра висота заповнення розраховується за формулою (табл. 2):

$$h = l \sin \varphi, \quad (10)$$

Таблиця 1. Висота заповнення капіляра водою, спиртом та ртуттю за радіусів капілярів 0,1; 0,5 та 1 мкм

Table 1. Height of capillary filling by water, alcohol and mercury at the radiuses of capillaries 0.1; 0.5 and 1 μm

Радіус капіляра r, мкм	Висота підняття води h ₁ , мкм	Висота підняття спирту h ₂ , мкм	Висота підняття ртутті h ₃ , мкм
0,1	2,94	1,122	1,41
0,5	2,21	0,841	1,058
1	1,47	0,5608	0,705

Таблиця 2. Висота заповнення капіляра водою, спиртом та ртуттю за його нахилу на 30°, 60° та 90°

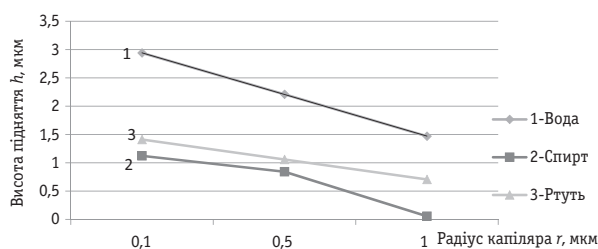
Table 2. Height to filling the capillaries by water, alcohol and mercury at its inclination on 30°, 60° and 90°

Кут нахилу φ°	Висота заповнення капіляра водою h ₁₁ , мкм	Висота заповнення капіляра спиртом h ₂₁ , мкм	Висота заповнення капіляра ртуттю h ₃₁ , мкм
30	20	25	22,5
60	34,64	43,3	38,97
90	40	50	45

Таблиця 3. Швидкість наповнення капілярів різного діаметра водою, спиртом, ртуттю за їх горизонтального розміщення (0°)

Table 3. Speed of capillaries filling by water, alcohol and mercury at 0° depending on their radius

Швидкість наповнення капілярів різних радіусів термочутливою речовиною за 0°								
Вода								
r ₁ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с	r ₂ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с	r ₃ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с
0,1	15	13,42	0,5	15	67,114	1	15	134,228
	20	10,067		20	50,336		20	100,671
	40	5,034		40	25,168		40	50,336
Спирт								
r ₁ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с	r ₂ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с	r ₃ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с
0,1	15	3,41	0,5	15	17,07	1	15	34,14
	20	2,56		20	12,80		20	25,61
	40	1,28		40	6,40		40	12,80
Ртуть								
r ₁ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с	r ₂ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с	r ₃ , мкм	z, мкм	dz/dt, мкм/с
0,1	15	5,13	0,5	15	25,67	1	15	51,33
	20	3,85		20	19,25		20	38,50
	40	1,93		40	9,62		40	19,25



Висота заповнення капіляра водою, спиртом та ртуттю за радіусів капілярів 0,1; 0,5 та 1 мкм. Height of capillary filling by water, alcohol and mercury radiuses at the capillaries of 0.1; 0.5 and 1 μm

Швидкість наповнення капіляра визначається поверхневим натягом σ і в'язкістю μ рідини, радіусом капіляра r і довжиною заповненої частини капіляра z і описується рівнянням :

$$dz/dt = rσ \cos \theta / 4\mu z, \quad (11)$$

Приклади наповнення капілярів різного діаметра водою, спиртом, ртуттю за їх горизонтального розміщення подані у табл. 3.

Як видно, швидкості заповнення капілярів діаметра 1,0 мкм водою в горизонтальному положенні становлять (50...134) мкм/с., спиртом — (13...34) мкм/с., ртуттю — (19...51) мкм/с. Це означає, що рідинний мікротермометр довжиною 100 мкм, за умови майже повного заповнення капіляра 1,0 мкм, коли він змінює покази (довжину заповненої частини капіляра) на 10 мкм, характеризується часом встановлення показів (0,20...0,07) с для води, (0,80...0,30) с для спирту та (0,5...0,02) с

для ртуті. За зменшення діаметра капіляра у 10 разів, тобто до 0,1 мкм, час встановлення показів термометра тієї самої довжини зростає в 10 разів, тоді як швидкість переміщення зменшується на порядок. Для ртуті він може досягати 5,0 с, що може не задовільняти вимогам щодо часу встановлення показів мікротермометра.

Коректним підбором діаметра капіляра можна досягти співмірності впливу теплофізичних характеристик, які у мікротермометрів визначають першу складову сталої теплової інерції, та впливу характеристик, зумовлених рухом термочутливої рідини внаслідок зміни сили поверхневого натягу з температурою, що, зі свого боку, визначають час встановлення показів термометра (друга складова сталої теплової інерції).

ВИСНОВКИ


У результаті дослідження низки характеристик термометра, залежних від його розмірів, зокрема

від діаметра капіляра, що істотно зменшується для мікро і нанотермометрів, показано таке:

1. За мірою зменшення розмірів рідинних термометрів істотно зменшується стала теплової інерції термометра, зумовлена інтенсивним теплообміном термометра з навколишнім середовищем; вона може спадати до 0,001 с.

2. Для рідинних мікротермометрів час встановлення показів за зміни температури вже не може описуватися тільки теплофізичними характеристиками. Посилюється роль гідродинамічних характеристик, оцінювана за швидкістю заповнення капіляра та переміщення термочутливої рідини у ньому, що також характеризує час встановлення показів мікротермометра. При цьому, якщо час встановлення показів, оцінений за інтенсивністю теплообміну, для мікротермометра становить мікросекунди, то час, оцінений за переміщенням рідини у капілярі, — на 1—2 порядки вище, залежно від діаметра капіляра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Stadnyk B., Yatsyshyn S., Lutsyk Ya. (2012) Research in Nanothermometry. Part 1. Temperature of Micro and Nano sized objects. *Sensors & Transducers*. Vol.140. Issue 5, pp. 1—7.
2. D. Quéré, F. Brochard Wyart, P. G. Gennes, (2004) «Capillarity and Gravity», in *Capillarity and Wetting Phenomena*, Springer, New York, NY, pp. 33—67.
3. Stadnyk B., Yatsyshyn S., Kozak O. (2012) Research in Nanothermometry. Part 2. Methodical Error Problem of Contact Thermometry. *Sensors & Transducers*. Vol.140. Issue 5, pp. 8—14.
4. Yatsyshyn S., Stadnyk B., Lutsyk Ya. (2012) Research in Nanothermometry. Part 3. Characteristics of the Thermometers with liquid and solid phase sensitive elements. *Sensors & Transducers*. Vol.140. Issue 5, pp. 15—23.
5. V. Zablotskii, O. Lunov, P. Gomez (2009) «Magnetic heating by tunable arrays of nanoparticles in cancer therapy», *Acta Phys. Pol.*, vol. 115(1), pp. 413—417.
6. Yang X., Zhou Z., Zheng F. and others (2010) High sensitivity temperature sensor based on a long, suspended single walled carbon nanotube array, *Micro & Nano letters*, IET, , Vol. 5, Issue 2, pp. 157—161.
7. Khaidarov G., Khaidarov A., Mashek A. (2011) The physical nature of liquid surface tension, *Vestnik St.Petersburg University, Series 4: Physics and Chemistry*, Issue 1, pp. 3—8.
8. http://www.ppsi.ethz.ch/fmi/xsl/eqi/eqi_property_details_en.xml?node_id=1113
9. Powering nanotechnology devices with novel surface energy generators, *Nanowerk Nanotechnology Spotlight*, 2010. March 5.
10. Edward W. Washburn. (1921) «The Dynamics of Capillary Flow». *Physical Review*, 17 (3): 273.
11. Micrometrics, «A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures», *Journal of the Association of Computing Machinery*. 1970, Vol. 17(4), pp. 589—602. 

Отримано / received: 12.07.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., В.Б. Большаковим (Україна).
D. Sc. (Techn.) V.B. Bolshakov, Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307_2180(4)2019.44_47

УДК 621.81:621.253.2

ПОСТАЧАННЯ ЗРАЗКІВ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ІНОЗЕМНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОЗБРОЄННЯ: АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Delivery of Samples of Military Techniques of Foreign Manufacture to Arms: Pressing Questions of Metrological Maintenance



В. Бойко, начальник науково дослідного відділу,
Метрологічний центр військових еталонів ЗС України,
Харків, Україна,
e mail: gavanat66@gmail.com

V. Bojko, head of scientific research department,
Metrological centre of military standards of Armed Forces
of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,
e mail: gavanat66@gmail.com

Систематизовано структурну схему процесу постачання зразків (комплексів) озброєння і військової техніки іноземного виробництва. Систематизовано умови постачання техніки на озброєння Збройних Сил України, порядок кодифікації й уведення до штатів, порядок прийняття техніки на озброєння за результатами планового проведення підконтрольної експлуатації та визначених відомчих випробувань. Визначено основні вимоги до метрологічного забезпечення на зазначених етапах, обґрунтовано вимоги до складових технічної, організаційної й нормативної основ системи метрологічного забезпечення процесу постачання й на етапі експлуатації озброєння.

In the conditions of modern deepening of defense-industrial and military-technical cooperation with foreign powers pressing questions of metrological maintenance of statement on arms of Armed forces of Ukraine of samples (complexes) of arms of foreign manufacture are defined and proved. The structure chart of process of delivery of arms and the military techniques in the conditions of the special period is developed and systematized, delivery conditions

are systematized: completeness of the sample (complex) of arms and the military techniques, an order of preparation of experts for service and operation of arms and the military techniques, representation of operational and other documentation in a state language, an order of codification, introduction in states and sheets. The basic requirements to metrological maintenance of the sample (complex) of arms and the military techniques of foreign manufacture at stages of carrying out of under control operation and the established departmental tests are defined. Components of technical, organizational and standard bases of system of metrological maintenance of the sample (complex) of arms and the military techniques at the specified stages and at the basic stage of life cycle of the sample (complex) of arms and the military techniques - an operation phase are defined and proved. It is recommended to use an optimum variant of operation of the sample (complex) of arms and the military techniques of foreign manufacture - operation on a technical condition which assumes definition and forecasting of a real condition of the sample (complex) of arms and the military techniques.

Ключові слова: військова техніка іноземного виробництва, метрологічне забезпечення, етапи експлуатації.
Keywords: military techniques of foreign manufacture, metrological maintenance, operation phases.

Одним із основних напрямів військово технічної політики [1] визначено підвищення бойового потенціалу, відновлення справності, подовження ресурсу, модернізацію та створення нових зразків озброєння і військової техніки (ОВТ) силами вітчизняного оборонно промислового комплексу, в тому числі розроблення і виробництво ОВТ за закордонними ліцензіями.

Підвищення обороноздатності держави пов'язано з поглибленням оборонно промислового та військово технічного співробітництва з іншими державами, насамперед, членами НАТО та ЄС [1].

На сьогодні визначено відсутність технічно замкнених циклів виробництва більшості видів ОВТ, руйнування традиційної науково технічної й виробничої кооперації, низькі темпи проведення диверсифікації закупівель товарів військового призначення та подвійного використання [2].

Підвищення обороноздатності держави пов'язано, в тому числі, з поглибленням оборонно промислового та військово технічного співробітництва з членами НАТО і ЄС, досягненням повної незалежності від Росії з питань виробництва ОВТ [3]. До основних шляхів досягнення необхідних оперативних та інших спроможностей



© Бойко В., 2019

складових сектору безпеки та оборони держави ви значено своєчасне розроблення та виконання про грамних документів розвитку складових сектору безпеки та оборони з урахуванням планомірного переходу до стандартів НАТО та ЄС.

Аналіз тенденцій розвитку ОВТ у збройних силах провідних держав світу свідчить, що у XXI століт ті відбувається зміна озброєння і військової техні ки на основі використання новітніх технологій, но вих фізичних принципів, сучасної елементної бази. При цьому досвід країн у створенні нового поколін ня ОВТ свідчить, що постановка питання щодо пріо ритету якісних параметрів зброї потребує як суттє вого зростання витрат на науково технічні дослід ження, розроблення, виробництво і державні випро бування ОВТ, так і комплексного та системного під ходу до забезпечення ефективного виконання ета пів створення ОВТ та етапу експлуатації.

За сучасних умов постачання озброєння і військо вої техніки за умов особливого періоду і проведення бойових дій передбачається можливість закупівлі зраз ків військової техніки іноземного виробництва [3].

Потреба у забезпеченні конкретним зразком військової техніки іноземного виробництва визна чається державним замовником у разі виникнення нагальної потреби в особливий період.

Державний замовник після надходження війсь кової техніки здійснює кодифікацію об'єкта поста чання, вводить його до штатів і табелів до них та ви дає наказ стосовно допуску до експлуатації [3].

Етап експлуатації — один із важливіших ета пів життєвого циклу зразків (комплексів) ОВТ. Ефективність експлуатації ОВТ залежить практич но від усіх видів забезпечення Збройних Сил (ЗС) України, і, в першу чергу, від технічного забезпе чення та її складової частини — системи метроло гічного забезпечення (СМЛЗ) [4, 5].

Метрологічне забезпечення зразків (комплексів) ОВТ на етапі експлуатації — це комплекс органі заційних і технічних заходів, спрямованих на до сягнення повноти контролю, точності вимірювань, заданих у тактико технічному завданні (ТТЗ) щодо тактико технічних характеристик (ТТХ) на об'єкт експлуатації [6].

Мета статті — систематизація порядку поста чання зразків військової техніки іноземного вироб ництва та визначення основних питань метрологіч ного забезпечення зразків на етапі експлуатації.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Підтримання боєготовності зразків (комплек сів) ОВТ на етапі експлуатації, згідно з нормативно

правовими документами, здійснюється за такими основними напрямками: експлуатація протягом попе редньо призначеного терміну служби, експлуатація протягом продовженого терміну служби, експлуа тація за технічним станом [7]. Технічний стан зраз ка (комплексу) ОВТ оцінюється за результатами ви мірювального контролю його параметрів і функціо нального діагностування.

За сучасних умов найбільш оптимальним варі антом експлуатації зразків (комплексів) ОВТ є екс плуатація за технічним станом, яка передбачає ви значення і прогнозування реального стану зраз ків (комплексів) ОВТ протягом їх життєвого циклу [4, 6].

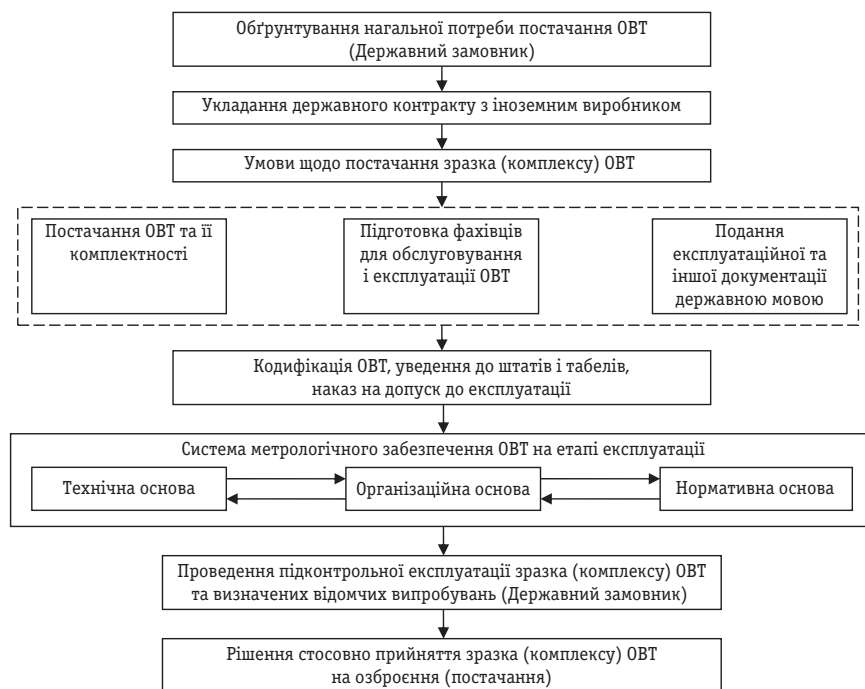
На рисунку представлено узагальнену струк турну схему процесу постачання зразків (комплек сів) ОВТ іноземного виробництва за умов особливо го періоду. За результатами обґрунтованої потре би постачання державним замовником виконується укладення державного контракту з іноземним ви робником, у якому передбачаються умови щодо по стачання зразка (комплексу) ОВТ: умови постачан ня та комплектність; заходи щодо підготовки вітчиз няних фахівців для експлуатації ОВТ; подання екс плуатаційної та іншої документації визначеною дер жавним замовником мовою; забезпечення технічної підтримки на визначений контрактом період та ав торського супроводження.

Заключне рішення відносно прийняття зразка (комплексу) ОВТ іноземного виробництва на озброєн ня (постачання) державний замовник приймає за ре зультатами планового проведення підконтрольної екс плуатації та визначених відомчих випробувань зразка (комплексу) ОВТ, виконання яких забезпечує комісія, визначена державним замовником згідно з уведенням до штатів й табелів зразка (комплексу) ОВТ [4].

Основні вимоги до метрологічного забезпечення зразка (комплексу) ОВТ у процесі переведення на екс плуатацію за технічним станом: точність і достовір ність вимірювань (контролю) заданих у ТТЗ тактико технічних характеристик, при цьому необхідно та кож забезпечити оптимальні оперативність, ресурсні показники і повноту функціонального діагностуван ня [7]. Ці вимоги можуть бути реалізовані, насампе ред за ефективності технічної, організаційної й нор мативної основ системи метрологічного забезпечен ня зразка (комплексу) ОВТ іноземного виробництва.

Технічна основа СМЛЗ повинна мати:

- штатні засоби вимірювальної техніки військо вого призначення (ЗВТВП), що вбудовані або дода ються до штатних комплексів згідно з державним контрактом;



Структурна схема процесу постачання зразків (комплексів) ОВТ іноземного виробництва за умов особливого періоду
The block diagram of the process of supplying samples (complexes) of foreign military equipment to a special period

▪ ЗВТВП вітчизняного виробництва (за необхідності).

Усі ЗВТВП повинні бути атестованими (каліброваними) і включеними у військовий каталог ЗВТВП.

Аналіз і систематизація завдань керування парком ЗВТВП дозволяє постійно і послідовно проводити каталогізацію ЗВТВП і коректувати класифікацію постачання військової вимірювальної техніки.

У своєму складі технічна основа СМЛЗ також повинна мати:

- комплекс стандартизованих ЗВТВП за різними видами вимірювань, які використовуються у процесі підконтрольної експлуатації та відомчих випробувань;

- апаратуру приймання, контролю й опрацювання сигналів інформаційно вимірювальних систем (еталонних сигналів часу і частоти, сигналів навігаційних систем);

- спеціальну метрологічну техніку (робочі (військові) еталони, пересувні лабораторії вимірювальної техніки та допоміжне устаткування).

Організаційну основу СМЛЗ складають метрологічні служби Міністерства оборони України та ЗС України:

Центральне управління метрології та стандартизації ЗС України Озброєння ЗС України — головна організація з метрологічного забезпечення Міністерства оборони України та ЗС України;

Метрологічний центр військових еталонів ЗС України Озброєння ЗС України — головна орга-

нізація з військово метрологічного супроводження ОВТ на всіх етапах його життєвого циклу;

Служби метрології та стандартизації командувань видів ЗС України, командування ДШВ ЗС України, командування ССО ЗС України, оперативних та повітряних командувань військово морських баз.

Згідно з [5] у зазначених формуваннях у ряду основних завдань є:

- участь у роботі комісій з приймання та введення в експлуатацію озброєння та бойової техніки;
- організація військово метрологічного супроводження ОВТ у процесі експлуатації.

Нормативною основою СМЛЗ процесу проведення підконтрольної експлуатації зразка (комплексу) ОВТ іноземного виробництва, насамперед, є нормативні документи — державні, військові, галузеві стандарти, накази, положення, інструкції та інші документи, які визначають зміст організації робіт, спрямованих на забезпечення єдності вимірювань, точності й достовірності вимірювань. На сьогодні більшість нормативних документів потребують принципового реопрацювання.

За сучасних умов оптимальним є варіант удосконалення нормативної основи — використання досвіду військових структур країн НАТО в цій галузі.

Державний замовник згідно з уведенням до штатів і порядком кодифікації зразка (комплексу) ОВТ іноземного виробництва визначає комісію з включенням представників відповідних метрологічних служб для організації й проведення підконтрольної

експлуатації та відомчих випробувань, які розробляють відповідні програми, затверджені замовником.

Головна організація з питань проведення метрологічної експертизи документації (МЕД) — Метрологічний центр військових еталонів ЗС України Озброєння ЗС України — бере участь у розроблянні нормативних документів, що встановлюють порядок і організацію проведення МЕД на зразок (комплекс) ОВТ іноземного виробництва; у подальшому проведенні військово метрологічного супроводження на етапі експлуатації ОВТ.

За результатами оцінки тактико технічних характеристик зразка (комплексу) ОВТ іноземного виробництва на етапах підконтрольної експлуатації і відомчих випробувань визначається відповідність

результатів вимірювань ТТХ, заданим в експлуатаційній документації на ОВТ.


Державний замовник приймає рішення стосовно прийняття зразка (комплексу) ОВТ на озброєння (постачання).

ВИСНОВКИ

1. Представлено структурну схему процесу прийняття на озброєння (постачання) зразка (комплексу) ОВТ іноземного виробництва за умов особливого періоду.

2. Для ефективного військово метрологічного супроводження зразків (комплексів) ОВТ іноземного виробництва на етапі експлуатації визначено складові технічної, організаційної та нормативної основи системи метрологічного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Концепція розвитку сектору безпеки і оборони України. Введено в дію Указом Президента України №92/2016 від 14.03.2016 (The concept of development of sector of safety and defense of Ukraine. It is installed by the Decree of the President of Ukraine №92/2016 from 14.03.2016).
2. Военна доктрина України. Затверджено Указом Президента України №555/2015 від 24.09.2015 (The military doctrine of Ukraine. It is confirmed by the Decree of the President of Ukraine №555/2015 from 24.09.2015).
3. Порядок постачання озброєння, військової і спеціальної техніки під час особливого періоду, введення надзвичайного стану та у період проведення антитерористичної операції. Постанова Кабінету Міністрів України №345 від 25.02.2015 (Order of delivery of arms, the military and special techniques during the special period, introduction of an extreme situation and in carrying out of antiterrorist operation. The decision of the Cabinet of Ukraine №345 from 25.02.2015).
4. Порядок експлуатації за технічним станом виробів авіаційної техніки державної авіації, за якими розробник не виконує своїх обов'язків із супроводження експлуатації. Затверджено Наказом Міністра оборони України №904 від 19.12.2014 (Method of operation on a technical condition of products of aviation techniques of the state aircraft on which the developer does not carry out the obligations on operation support. It is confirmed by the Order of the Minister of Defense of Ukraine №904 from 19.12.2014).
5. Положення про метрологічну службу Міністерства оборони України та Збройних Сил України. Затверджено Наказом Міністра оборони України №288 від 24.05.2017 (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 №288 from 24.05.2017).
6. Ланецький Б.М. (2006) Науково технічне супроводження експлуатації і ремонту засобів зенітних ракетних систем: основні положення, сучасний стан та пропозиції щодо удосконалення / Б.М. Ланецький, В.В. Бурцев, В.І. Карпенко, В.В. Лісовенко // ХУПС. — Системи обробки інформації (Lanetsky B.M. (2006) Scientific and technical support of operation and repair of means of antiaircraft rocket systems: substantive provisions, a modern condition and offers on improvement / B.M. Lanetsky, V.V. Burtsev, V.I. Karpenko, V.V. Lisovenko // HUPS. — Systems of processing of the information) — № 3(52). — С/Р. 75—80.
7. Дзисюк О.В. (2015) Актуальні питання метрологічного забезпечення зразків (комплексів) ОВТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом / О.В. Дзисюк, В.М. Бойко, Ю.П. Рондін // Метрологія та прилади (Dzisyuk O.V. (2015) Pressing questions of metrological maintenance of samples (complexes) of a arms and the military techniques at reconducting on operation on a technical condition / O.V. Dzisyuk, V.M. Boyko, Ju.P. Rondin // Metrology and instruments) — №5. — С/Р. 62—66. 

Отримано / received: 26.06.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.В. Коломіїцевим (Україна).
Prof. O.V. Kolomiitsev, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(4)2019.48-54

УДК 006.91:528.08:621.317

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПО СОСТАВЛЯЮЩИМ ИМПЕДАНСА

Efficiency Analysis and Application of Improved Method for Heterogeneous Liquids Quality Assessing by Impedance Components

CC BY-SA

А. Должанський, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Якість, стандартизація та сертифікація»,

Є. Колот, бакалавр за спеціальністю «Метрологія та інформаційно вимірювальна техніка», Національна металургійна академія України, м. Дніпро, e mail: a.dolzhanskiy@gmail.com

A. Dolzhanskiy, doctor of technical sciences, professor, head of the department «Quality, standardization and certification»,

Ye. Kolot, bachelor's degree in metrology and information and measurement engineering, National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, e mail: a.dolzhanskiy@gmail.com

Представлены новые результаты теоретического и экспериментального исследования применения предложенного авторами усовершенствованного метода для измерения электрического импеданса применительно к идентификации уровня показателей качества гетерогенных жидкостей. Выявлено, что чувствительность одной из составляющих импеданса (активной или емкостной) к изменению конкретного свойства жидкости выше, чем всего импеданса. Представлены зависимости составляющих импеданса модельного кисломолочного продукта от его жирности при низких частотах (до 400 Гц) и напряжении (до 5 В) электрического тока.

Наведені нові результати теоретичного та експериментального дослідження застосування удосконаленого методу, який раніше був запропонований авторами, для вимірювання електричного імпедансу стосовно ідентифікації рівня показників якості гетерогенних рідин. Виявлено, що чутливість однієї зі складових імпедансу (активної або ємнісної) до змінення конкретної властивості рідини вище, ніж усього імпедансу. Надані залежності складових імпедансу модельного кисломолочного продукту від його жирності за низьких частот (до 400 Гц) та напруження (до 5 В) електричного струму.

Parameters of the total electrical resistance (impedance) are often used for substances properties identification, in particular, for heterogeneous liquids. In such conditions, the quality of the product is compared with the measured impedance (or full

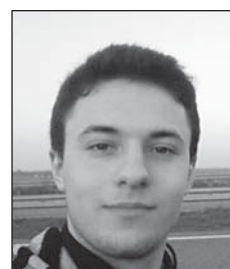
admittance) on alternating current [7, 8]. To do this, the industrial meters (RLC-meters), based on equivalent circuits, for example, in accordance with the «Warburg impedance scheme», are used. The disadvantages of such measurement tools are the uncertainty of the measuring circuit model components, the choice limitations of electrical parameters measuring means with the necessary sensitivity, as well as the high cost. Previously, the authors developed a new method of separate determination of active and capacitive impedance components for a heterogeneous fluid. This method is based on measuring at two close frequencies the levels of electric current and voltage with the subsequent calculation of the impedance components by a certain algorithm [1]. It is taken into account that the electrical properties of suspensions are usually caused by several types of charge carriers and depend a lot on the measurement conditions, in particular, the type (constant or alternating) and frequency of the electric current (6)...(8) [2, 3]. A new theoretical analysis and comparison of its results (9)...(11) with experimental data to determine the electrical properties of a water-graphite suspension (Table 1) revealed that the sensitivity of one of the impedance components (active or capacitive) to changes in a specific fluid property is higher than the total impedance. The experimental dependencies of the impedance components of a model fermented milk product on its fat content at low frequencies (up to 400 Hz) and voltage (up to 5 V) of electric current are presented (Figures 2, 3). These data confirmed the possibility of practical use of the design results for rapid quality assessment of various electrically conductive heterogeneous liquids with the necessary sensitivity and accuracy of measuring instruments.

Ключевые слова: электрический импеданс, чувствительность метода измерений, свойства гетерогенной жидкости.

Ключові слова: електричний імпеданс, чутливість методу вимірювань, властивості гетерогенної рідини.
Keywords: electrical impedance, sensitivity of measurement method, heterogeneous fluid properties.



А. Должанський



Є. Колот

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] был представлен усовершенствованный метод определения составляющих импеданса гетерогенных жидкостей (суспензий, эмульсий, взвесей и др.). Учтено, что их электрические свойства могут быть обусловлены несколькими видами носителей электрических зарядов и во многом зависят от условий измерения, в частности, вида (постоянный или переменный) и частоты электрического тока [2, 3]. При прохождении постоянного тока через такие жидкости обычно наблюдаются явления поляризации и коагуляции частиц дисперсной фазы на одном из электродов. При одновременном наличии в жидкости ионов, электронов и заряженных частиц дисперсной фазы («мицелл») в ней может образоваться так называемый «двойной электрический слой» [4, 5]. Каждая из этих составляющих электропроводности характеризуется временем перемещения носителей зарядов: от долей микро или миллисекунды (электроны и ионы) до нескольких минут (заряженные мицеллы). На указанные электрические параметры также могут влиять уровень напряжения, температура, конструкция измерительного приспособления, скорость расслоения, наличие перемешивания жидкости и т.д. [4—10]. В связи с этим «прямое» сопоставление свойств жидкости с величиной активного электрического сопротивления R , определяемого на постоянном токе с помощью омметра, не дает адекватных результатов.

В подобных условиях качество продукта соотносят с измеренным полным электрическим сопротивлением (импедансом) или полной проводимостью

(адмитансом) на переменном токе. Для этого рассматривают различные эквивалентные схемы замещения проводимости жидкости, например, в соответствии с «импедансом Варбурга» [8, 11, 12] при определении электрического напряжения U , силы тока I и частоты f с учетом законов Ома и Кирхгофа и расчете активной R и емкостной X составляющих импеданса:

$$Z_{\Sigma} = U/I = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (1)$$

где емкостное электрическое сопротивление

$$X = 1/(2 \times \pi \times f \times C); \quad (2)$$

C — электрическая емкость измерительной цепи, —

а также соответствующих значений удельных сопротивлений:

- активного: $\rho = R \times S/a$, (3)

- емкостного: $\rho_C = X \times S/a$, (4)

- полного: $\rho_Z = Z \times S/a$, — (5)

где a , S — расстояние между электродами измерительного устройства и рабочая площадь фронтальной поверхности одного из них соответственно [1].

При этом необходимо учитывать, что разделение импеданса на активную R и реактивную (емкостную) X составляющие является условным, поскольку они существуют одновременно в едином объеме гетерогенной жидкости.

Аналогом разработки [1] явилось определение электрических свойств различных жидкостей с помощью специальных дорогостоящих приборов — RLC измерителей [8, 10]. Однако, применение здесь схемы замещения «по Варбургу» [7, 10, 11] сопровождается неопределенностью задействованного

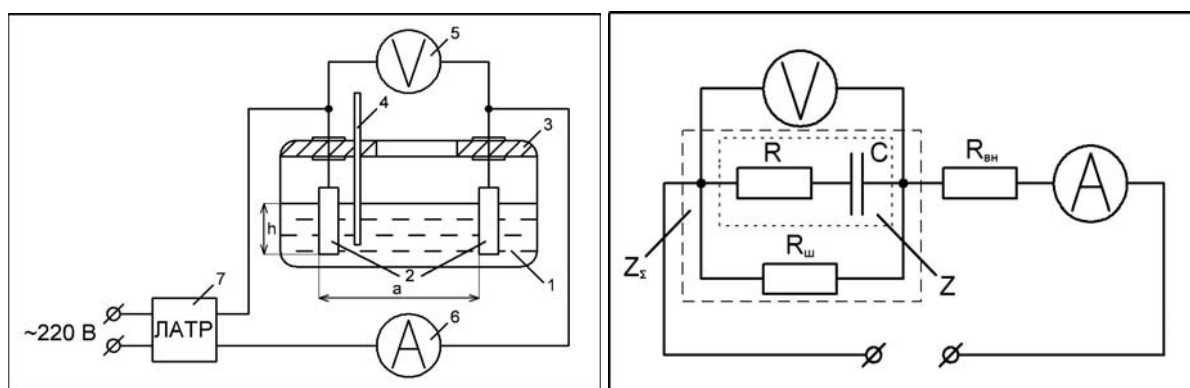


Рис. 1. Схемы измерения (а) и замещения (б): 1 — емкость с суспензией; 2 — медные электроды; 3 — крышка емкости с контактами и креплением термометра 4; 5 — вольтметр; 6 — миллиамперметр; 7 — устройство электрического питания: ЛАТР (лабораторный автотрансформатор) или генератор переменного тока с управляемой частотой; R_{iN} — внутреннее активное сопротивление элементов цепи (пояснение остальных параметров — в тексте)

Fig. 1. Measurement circuit (a) and substitution (b) when measuring the parameters of the heterogeneous liquid impedance: 1 — container with suspension; 2 — copper electrodes; 3 — container cover with contacts and thermometer mounting 4; 5 — voltmeter; 6 — milliammeter; 7 — the device of electric power supply: LATR (laboratory autotransformer) or alternator with controlled frequency R_{iN} — internal pure resistance of the chain elements (explanation of the remaining parameters — in the text)

количества активно реактивных участков электрической схемы замещения и, вследствие этого, неадекватностью расчетов составляющих импеданса. Кроме того, сужаются возможности выбора измерительного прибора требуемой чувствительности.

Отличительными особенностями усовершенствованного метода, представленного в работе [1], явились: использование физической схемы измерения согласно рис. 1,а [1, 9]; эквивалентной схемы ее замещения, представляющей фрагмент «импеданса Варбурга» [8]; последовательные измерения: на постоянном токе активного сопротивления $R_{\text{ш}}$, далее — измерение тока I и напряжения U составляющих суммарного импеданса Z_{Σ} на каждой из двух частот f_1 и f_2 переменного тока, которые отличаются одна от другой на (10...20) % и, наконец, расчет активного сопротивления R , емкости C и эквивалентной частоты f_e по формулам (в модифицированном виде):

$$R = R_{\text{ш}} / (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 1}) \times \sqrt{\{Z_{\Sigma 1}^2 - f_2^2 \times [Z_{\Sigma 1}^2 - Z_{\Sigma 2}^2 \times (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 1})^2 / (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 2})^2] / (f_2^2 - f_1^2)\}}; \quad (6)$$

$$C = (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 1}) \times (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 2}) / (2 \times \pi \times R_{\text{ш}} \times f_1 \times f_2) \times \sqrt{\{f_2^2 - f_1^2\} / [Z_{\Sigma 1}^2 \times (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 2})^2 - Z_{\Sigma 2}^2 \times (R_{\text{ш}} - Z_{\Sigma 1})^2]}; \quad (7)$$

$$f_e = 2 \times f_1 \times f_2 / (f_1 + f_2), \quad (8)$$

где $Z_{\Sigma 1}$, $Z_{\Sigma 2}$ — соответственно значения импеданса на частотах тока f_1 и f_2 , которые соотносят с характерными свойствами (показателями качества) изучаемой жидкости.

Исследование [1] свойств двух жидкостей, содержащих в качестве дисперсной фазы углерод, с помощью представленного метода позволило выявить рациональный диапазон используемых частот (100...400 Гц). Также был подтвержден общий вывод [1, 7, 11], что измерение составляющих импеданса (или адмитанса) может быть использовано при идентификации показателей качества суспензии (например, для оценки наличия и/или концентрации в ней определенной фазы).

Однако открытым остался вопрос о чувствительности как измерения импеданса, так и его составляющих (R и X) к изменению параметров жидкости.

Целью работы явилось определение чувствительности усовершенствованного метода и оценка эффективности использования составляющих импеданса по сравнению с самим импедансом при идентификации физических свойств гетерогенной жидкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

При применении схемы замещения на рис. 1,б рассматривали: общий импеданс $Z_{\Sigma} = U/I$ по формуле (1), используемый при «традиционном» измере-

нии электрических параметров, и импеданс Z только для ($R - C$) — участка схемы, для которого и рассчитываются значения R и C по формулам (6) и (7), соответственно.

Теоретически чувствительность метода оценили по соотношению приращений ΔZ и ΔZ_{Σ} при одинаковом изменении какой либо из характеристик гетерогенной жидкости.

Для параллельного соединения сопротивлений (см. рис. 1,б): $Z_{\Sigma} = R_{\text{ш}} \times Z / (R_{\text{ш}} + Z)$, откуда для первого (индекс «1») и второго (индекс «2») уровня некоторого свойства жидкости получили: $|Z_{\Sigma 2} - Z_{\Sigma 1}| = \Delta Z_{\Sigma} = R_{\text{ш}} \times Z_2 / (R_{\text{ш}} + Z_2) - R_{\text{ш}} \times Z_1 / (R_{\text{ш}} + Z_1)$, а после простых преобразований нашли:

$$\Delta Z / \Delta Z_{\Sigma} = (R_{\text{ш}} + Z_2) \times (R_{\text{ш}} + Z_1) / R_{\text{ш}}^2 > 1. \quad (9)$$

Другими словами, чувствительность импеданса Z для ($R - C$) — участка измерительной схемы, представленной на рис. 1,б, существенно выше, чем суммарного импеданса Z_{Σ} всей схемы.

В развитие полученного результата дополнительно поставили вопрос о том, в каких случаях и какая из составляющих ($R - C$) — участка схемы обладает большей чувствительностью к изменению свойств гетерогенной жидкости.

Тогда, аналогично предыдущему, с учетом выражения (1), для одинакового значения частоты f переменного тока выразили:

$$\Delta Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma 2} - Z_{\Sigma 1} = R_{\text{ш}} \times \sqrt{(R_2^2 + X_2^2) / [R_{\text{ш}} + \sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}]} - R_{\text{ш}} \times \sqrt{(R_1^2 + X_1^2) / [R_{\text{ш}} + \sqrt{(R_1^2 + X_1^2)}]}. \quad (10)$$

Приняв, в рамках проводимого анализа, $\Delta Z_{\Sigma 2} - \Delta Z_{\Sigma 1} = 0$ для двух независимых измерений с индексами «1» и «2» при $\Delta R = R_2 - R_1$ и $\Delta X = X_2 - X_1$, после простых преобразований из равенства (10) вывели:

$$|\Delta R / \Delta X| = (X_1 + X_2) / (R_1 + R_2). \quad (11)$$

Последнее соотношение свидетельствует о том, что при равном изменении импеданса $\Delta Z_{\Sigma i}$, которое соответствует изменению некоторого свойства гетерогенной жидкости, более чувствительной составляющей суммарного импеданса является та, доля которой в формировании величины $Z_{\Sigma i}$ меньше.

Для проверки сделанных выводов подвергли дополнительному анализу экспериментальные данные, посвященные изучению зависимости составляющих импеданса водно графитовой суспензии ВКГС 0 от напряжения и частоты тока из работы [1]. При этом, для целей анализа приняли, что соответствующие связи, отраженные в таблице, являются свойствами суспензии, а составляющие импеданса представлены их удельными значениями импеданса по формулам (3) — (5).

Оценка чувствительности нового метода определения составляющих импеданса к изменению напряжения и частоты электрического тока (пояснение параметров — в тексте)

Estimation of new method sensitiveness for determination of impedance constituents to the electric current tension and frequency changing (explanation of the parameters — in the text)

U , В	f , Гц	$\rho_{Z\Sigma}$, Ом·м	ρ_Z , Ом·м	ρ , Ом·м	ρ_C , Ом·м	Z_Σ , Ом	Z , Ом	R , Ом	X , Ом
1	100	0,194	0,400	0,356	0,140	45,2	93,2	82,9	45,6
	400	0,180	0,349	0,340	0,120	41,9	81,3	79,2	18,4
Чувствительность $\Delta Z / \Delta Z_\Sigma$ при $U = 1$ В и изменении частоты f , раз						3,61	—		
Чувствительность по различию в сопротивлениях ($R - C$) — участка при $U = 1$ В и изменении частоты f , раз						—	1,05	2,48	
$ \Delta R / \Delta X = (X_1 + X_2) / (R_1 + R_2)$ при $U = 1$ В						—	0,39		
5	100	0,176	0,287	0,273	0,100	41,0	66,9	63,6	20,8
	400	0,172	0,278	0,273	0,055	40,0	64,8	63,4	12,4
Чувствительность $\Delta Z / \Delta Z_\Sigma$ при $U = 5$ В и изменении частоты f , раз						2,1	—		
Чувствительность по различию в сопротивлениях ($R - C$) — участка при $U = 5$ В и изменении частоты f тока, раз						—	1,003	1,68	
$ \Delta R / \Delta X = (X_1 + X_2) / (R_1 + R_2)$ при $U = 5$ В						—	0,26		
Чувствительность $\Delta Z / \Delta Z_\Sigma$ при $f = 100$ Гц и изменении напряжения U , раз						6,26	—		
Чувствительность $\Delta Z / \Delta Z_\Sigma$ при $f = 400$ Гц и изменении напряжения U , раз						8,68	—		

Эти данные подтверждают выводы проведенного теоретического анализа:

* представленный метод потенциально обладает более высокой чувствительностью к изменению свойств гетерогенной жидкости (суспензии) по сравнению с традиционным, проявляя различную чувствительность составляющих импеданса. При этом, эффективность метода оказалась тем выше, чем выше напряжение и ниже частота питающего переменного тока. Однако, при этом увеличивается вероятность искажающего влияния нагрева жидкости, ее поляризации и коагуляции на электродах;

* большей чувствительностью (в рамках предыдущего вывода, когда суммарный импеданс Z_Σ изменяется незначительно) обладает параметр, доля которого при формировании импеданса ($R - C$) — участка меньше, причем эта чувствительность повышается с уменьшением напряжения U и частоты f . Последнее, при прочих равных условиях, связано с уменьшением тока I и требует использования измерительных приборов более высокого класса точности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для дополнительной экспериментальной проверки результатов теоретического анализа провели соответствующие изыскания. При этом значения величин Z_Σ , Z , R , X представили в виде соответствующих удельных сопротивлений $\rho_{Z\Sigma}$, ρ_Z , ρ , ρ_X .

В качестве объекта изучения выбрали кислородный продукт, а показателем качества (независимой переменной) — концентрацию жира в нем как дисперсной фазы. Для этого использовали исходные обезжиренный кефир и сметану с начальной жирностью 0,01 (1 %) и 0,20 (20 %) соответственно. Навески продукта с промежуточными концентрациями: 0,01 (1 %); 0,02 (2 %); 0,05 (5 %); 0,10 (10 %); 0,15 (15 %) и 0,20 (20 %), — изготавливали, применяя расчетные формулы из монографии [13] и смешивая нужные количества исходных продуктов.

В экспериментах, также, как и в работе [1], использовали оснастку по рис. 1,а. Расстояние между электродами $a = 56$ мм. Их ширина была 10 мм, а глубина погружения в жидкость, составляла $h = (25 \pm 0,5)$ мм. Самую жидкость тщательно перемешивали до достижения нею изотропного состояния. Температура в помещении была 20 °С.

Необходимый уровень электрического тока $I = (16 \pm 1)$ мА, как постоянного (для определения шунтирующего сопротивления $R_{ш}$ — см. рис. 1,б), так и переменного (при его определенных частотах f_1 и f_2) обеспечивали варьированием напряжения U . Переменный синусоидальный ток с контролем частоты к измерительной схеме подавали через электронный усилитель от генератора. В качестве последнего использовали открытую для пользователей программу [14], которая была «загружена» в компьютер в виде соответствующего файла.

Уровни тока I и напряжения U фиксировали цифровыми мультиметрами типа DT9205A и DT9208A после стабилизации показаний приборов (в течение 15 с). Согласно паспортным характеристикам указанных приборов верхний предел частоты их рабочего диапазона составлял не больше $f_{\max} = 400$ Гц. В опытах обеспечивали $U < 4$ В (для минимизации термического воздействия тока на электропроводность жидкости). Влиянием активного сопротивления R_{iN} приборов, проводников и их соединений на результаты измерений пренебрегали.

Эксперименты провели в соответствии с методикой, изложенной в работе [1].

1. Величину $R_{\text{ш}}$ рассчитывали по закону Ома при определенном уровне напряжения и соответствующих значениях силы *постоянного* электрического тока.

2. При значениях пар частот $f_{11} = 90$ Гц и $f_{12} = 100$ Гц (первая пара) и $f_{21} = 360$ Гц и $f_{22} = 400$ Гц (вторая пара) и одинаковых значениях *переменного* напряжения $U = U_1 = U_2$ проводили измерение силы тока $I_1 \neq I_2$. Различие в 10 % значений частот обусловлено необходимостью последующего сопоставления *эквивалентной частоты* f_e , определяемой равенством (8), с измеренными значениями напряжения и тока при минимальной разнице $|I_1 - I_2|$, которую можно достоверно оценить в частотном диапазоне работоспособности используемых приборов.

Каждое измерение дублировали 5 раз для минимизации случайной ошибки. В последующих расчетах использовали средние значения измеренных величин (со средним коэффициентом вариации менее 0,02).

3. Далее, по формуле (1) при каждой из пар частот f_{1i} и f_{2i} определили значения полного импеданса

$Z_{\Sigma 1}$ и $Z_{\Sigma 2}$; по формуле (8) — f_e и соответствующее ей значение полного эквивалентного импеданса: $Z_{\Sigma e} = Z_{\Sigma 1} \times f_2 / (f_1 + f_2) + Z_{\Sigma 2} \times f_1 / (f_1 + f_2)$; по формулам (6) и (7) — значения активного сопротивления R и электрической емкости C для $(R - C)$ — участка (см. рис. 1,b); по формуле (2) — емкостное сопротивление X ; с учетом (1) — импеданс Z для $(R - C)$ участка измерительной схемы, и, наконец, по формулам (3)—(5) — соответствующие удельные сопротивления ρ_Z , ρ и ρ_C , а также — аналогичным образом — $\rho_{Z\Sigma e}$.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 2 и 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ представленных данных свидетельствует о следующем.

При частотах $f_1/f_2 = 90/100$ Гц и изменении показателя качества модельной гетерогенной жидкости — жирности кисломолочного продукта в диапазоне от 1 до 20 % удельное сопротивление ρ_Z для $(R - C)$ — участка измерительной цепи изменялось от 0,395 до 0,630 Ом·м (т. е. в 1,59 раза), активное удельное сопротивление ρ изменялось от 0,475 до 0,685 Ом м (т.е. в 1,44 раза) по сравнению с изменением $\rho_{Z\Sigma e}$ всей измерительной цепи от 0,312 до 0,423 Ом м (т.е. в 1,36 раза). Аналогичные данные при измерениях на частотах 360/400 Гц выявили изменение ρ_Z от 0,327 до 0,580 Гц (т.е. в 1,77 раза), изменение ρ от 0,415 до 0,66 Ом м (т.е. в 1,59 раза) по сравнению с изменением $\rho_{Z\Sigma e}$ от 0,285 до 0,41 (т.е. в 1,44 раза).

Тем самым подтверждены выводы предыдущего анализа о большей в (1,06...1,23) раза чувствительности *составляющих* ρ_Z и ρ общего импеданса

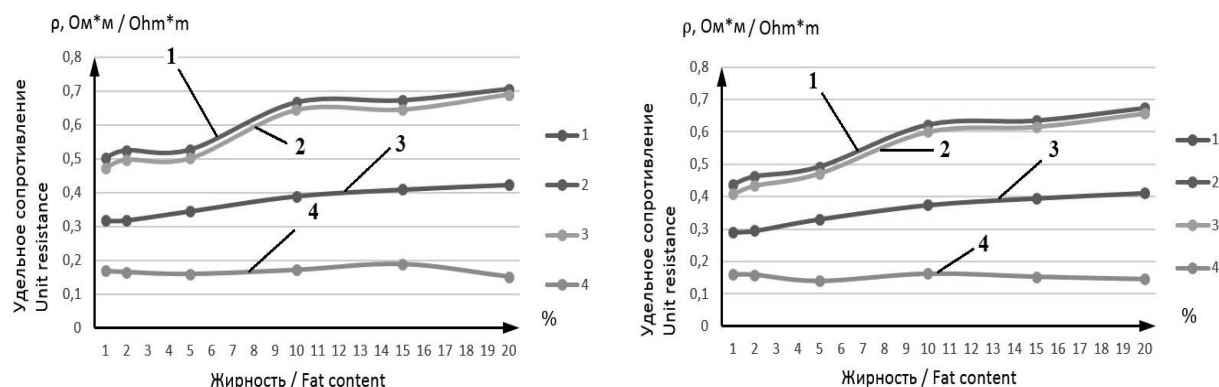


Рис. 2. Зависимость удельных сопротивлений (импедансов) эквивалентной схемы измерительной цепи от жирности кисломолочного продукта: а — при частотах измерений 90/100 Гц; б — при частотах измерений 360/400 Гц; 1 — $\rho_{Z\Sigma e}$; 2 — ρ_Z ; 3 — ρ ; 4 — ρ_C (пояснение параметров — в тексте)

Fig. 2. Dependence of equivalent chart unit resistances (impedances) to the measuring chain on the fat content of soul milk product: а — at measurement frequencies of 90/100 Hz; б — at measurement frequencies of 360/400 Hz; 1 — $\rho_{Z\Sigma e}$; 2 — ρ_Z ; 3 — ρ ; 4 — ρ_C (parameters explanation is in the text)

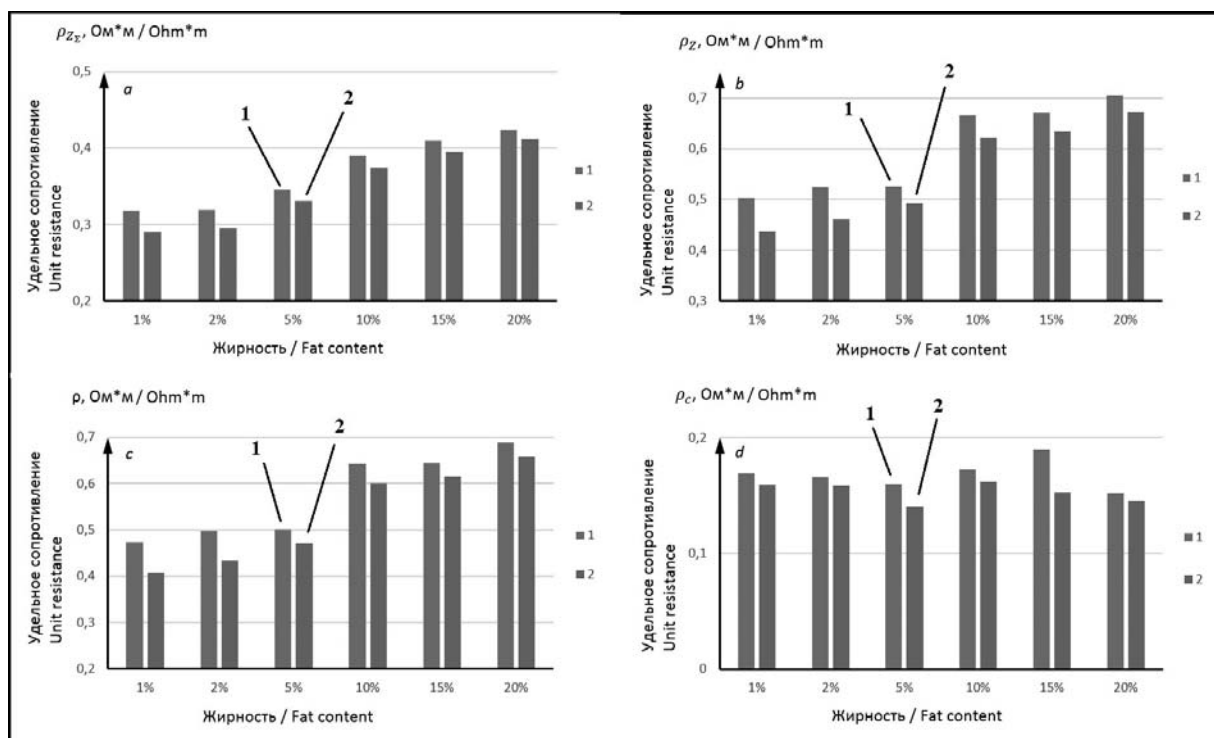


Рис. 3. Зависимость удельных сопротивлений (импедансов) эквивалентной схемы измерительной цепи от частоты измерений (1 — 90/100 Гц и 2 — 360/400 Гц — отмечено под элементами диаграммы) при жирности кисломолочного продукта (отмечено на элементах диаграммы): а — $\rho_{Z\Sigma_e}$; б — ρ_Z ; в — ρ ; д — ρ_C (пояснение параметров — в тексте)

Fig. 3. Dependence of unit resistances (impedances) of equivalent chart of measuring chain on measuring frequency (1 — 90/100 Hz and 2 — 360/400 Hz — marked under diagram elements) at the fat content of soul milk product (marked on diagram elements): а — $\rho_{Z\Sigma_e}$; б — ρ_Z ; в — ρ ; д — ρ_C (parameters explanation is in the text)

по сравнению с самим импедансом $\rho_{Z\Sigma_e}$ к изменению свойств гетерогенной жидкости. При этом большую чувствительность проявляет одна из составляющих ($R - C$) — участка измерительной цепи (в данном случае — ρ по сравнению с ρ_C). Вывод о большей значимости меньшего из сопротивлений, представленный выше при анализе формулы (11), в данном случае неприменим, поскольку соответствующий суммарный импеданс измерительной цепи существенно (в 1,3...1,4) раз) изменялся.

Существенным также является однозначное, но не одинаковое влияние частоты электрического тока на чувствительность метода при идентификации свойств различных гетерогенных жидкостей. Это, вероятно, связано с отличиями в номенклатуре носителей электрических зарядов, которые формируют их проводимость. Последнее свидетельствует о необходимости специальных исследований связей свойств конкретных жидкостей с электрическими свойствами при определении их качества.

ВЫВОДЫ

Проведена оценка чувствительности усовершенствованного метода определения электрических составляющих импеданса к изменению существенных

свойств (показателей качества) гетерогенных жидкостей, основанного на использовании эквивалентной схемы замещения реальной жидкости фрагментом «импеданса Варбурга», и поочередном измерении электрического напряжения и тока на двух близких (до 10 %) частотах.

Впервые теоретически и экспериментально установлено, что чувствительность меньшей по величине составляющей импеданса к изменению показателей качества гетерогенной жидкости выше, чем импеданса всей измерительной схемы. При этом доли, которыми представляются активная и емкостная составляющие импеданса активно емкостного участка схемы, могут отличаться друг от друга до 2,5 раз, что определяется природой гетерогенной жидкости.

Увеличение напряжения может повысить вероятность искажающего влияния нагрева жидкости и ее поляризации. Уменьшение напряжения требует использования измерительных приборов более высокого класса точности. Влияние же частоты тока оказалось неоднозначным и также зависящим от природы жидкостей, что, вероятно, связано с наличием в них разного количества носителей электрических зарядов разной природы (электронов, ионов, мицелл), а также склонностью к образованию

двойного электрического слоя. Уменьшение частоты тока может усилить коагуляцию дисперсной фазы гетерогенной жидкости на электродах, а через мерное увеличение — к несоответствию частотной характеристике приборов.

Предложенный метод может быть использован при оперативной оценке качества гетерогенных электро-

проводящих жидкостей с повышением чувствительности схемы измерений.

Перспективным направлением дальнейших аналогичных исследований представляется расширение их номенклатуры: масло и нефтепродукты, загрязненные водой или ион содержащими добавками, глинистая пульпа, продукты фармацевтики или питания и др.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Должанський, А.М. Удосконалення методу та результати вимірювання електричних властивостей суспензій/ А. Должанський, В. Пінчук, Є. Колот// Метрологія та прилади (Dolzhanskiy A.M., Pinchuk V.O., Kolot Ye.M. Method improvement and results of the suspensions electrical properties measuring. Metrology and instruments) — 2017, N 4, с/р. 21—31 (in Ukrainian).
2. Вишняков А.В. Физическая химия: Учебник для вузов / А. Вишняков. — М.: Химия (Vishniakov A.V. Physical chemistry: Textbook for universities. Moscow, Khimiya Publ.), — 2012. 840 с/р.
3. Духин, С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем / С. Духин. — К.: Наукова думка (Dukhin S.S. Conductivity and electrokinetic properties of the dispersible systems. Naukova Dumka Publ.), — 1975. — 248 с/р.
4. Духин С.С. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах / С. Духин, В. Шилов. — К.: Наукова думка (Dukhin S.C., Shilov V.N. The dielectric phenomena and double layer in the dispersible systems and polyelectrolytes. Naukova Dumka Publ.) — 1975. — 246 с/р.
5. Maibam Birla Singh and Rama Kant. Theory for Anomalous Electric Double Layer Dynamics in Ionic Liquids. *Physics Chemistry C*, 2014, vol. 118 (17), pp. 8766–8774. — DOI: 10.1021/jp500383p.
6. Christopher McCallum, Sumita Pennathur, and Dirk Gillespie. Society Two Dimensional Electric Double Layer Structure with Heterogeneous Surface Charge. *Langmuir*, 2017, 33 (23), pp. 5642–5651. — DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b00731.
7. Столярчук, П.Г. Результати експериментальних досліджень показників якості дизельного палива і рослинної олії електричним методом/ П. Столярчук, О. Шпак, Р. Янович // Вимірювальна техніка та метрологія. (Stolyarchuk P.G., Shpak O.I., Yanovich R.R. Results of experimental research of diesel fuel and vegetable oil quality indicators by an electric method. Lviv. National University «Lviv Polytechnic» Publ.), — 2012, N 73, с/р. 136—142 (in Ukrainian).
8. Электрохимический импеданс / Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова Стойнова Б., Елкин В.В. — М.: Наука (Stoynov Z.B., Grafov B.M., Savova Stoynova B.Z., and Yolkin V.V. Electrochemical impedance. Moscow, Nauka Publ.), — 1991. — 336 с/р.
9. Пінчук, В.А. Исследование электрических свойств водугольной суспензии/ В. Пінчук, А. Должанский // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: Збірник наукових праць. — Вип. 5. — Дніпропетровськ: ЛИРА ЛТД (Pinchuk V.A., Dolzhanskiy A.M. Investigation of water bearing suspension electrical properties. Technical thermophysics and industrial thermal power engineering: Collection of scientific works. Dnipropetrovsk, LIRA Ltd Publ., (in Russian)), — 2013. — С. 171 — 180.
10. Мартинович, Н.В. Використання імітансного методу для контролю твердості води/ Н. Мартинович. Є. Походило // Методи та прилади контролю якості. — Івано Франківськ: ІФНТУНГ (Martynovich N.V, Pokhodilo Ye.V. Using the imitative method for controlling water hardness. Methods and Devices of Quality Control. Ivano Frankivsk, Ivano Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUOG) Publ. (in Ukrainian)). — 2011. — № 26. — С/Р. 45—48.
11. Походило Є.В. Дослідження об'єктів кваліметрії не електричної природи як дипольників/ Є. Походило, О. Антонюк // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомчий науково технічний збірник. — Львів: Вид. Національного університету «Львівська політехніка» (Pokhodilo Ye.V., Antonyuk O.O. Investigation of the qualimetric properties of non electric nature as bipolar. Measurement technology and metrology. Lviv. National University «Lviv Polytechnic» Publ. (in Ukrainian)). — 2010. — № 71. — С/Р. 152—156.
12. Author links open overlay panel [Anna Nakonieczna, Bartosz Paszkowski, Andrzej Wilczek Agnieszka Szypłowska, and Wojciech Skierucha. Electrical impedance measurements for detecting artificial chemical additives in liquid food products]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont> (дата доступу 04.01.2016).
13. Загальна та неорганічна хімія: Підручник для студентів вишів (у 2 х частинах)/ О.М. Степаненко, Л.Г. Рейтер, В.М. Ледовських, С.В. Іванов. — Частина 1. Київ, Вид. Педагогічна преса (Stepanenko O.M., Reyter L.G., Ledovskikh V.M. and Ivanov S.V. General and Inorganic Chemistry: Test book for university students (in 2 parts). Part 1. Kyiv, Pedagogichna Presa Publ.). — 2002. — 520 с/р.
14. Sajt [Website] Two Channels Frequency Generator. Режим доступу: <http://twochannelsfrequencygenerator.soft32.com> (дата доступу 25.07.2010). 📄

Отримано / received: 06.06.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.н., проф. В.О. Лебединцем (Україна).
Prof. V.O. Lebedynets, D. Sc. (Pharm.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307 2180(4)2019.55 61

УДК 006.91

ЗВТ, ПОВ'ЯЗАНІ З ВИМІРЮВАННЯМ МАСИ У СФЕРІ ТА ПОЗА СФЕРОЮ ЗАКОНОДАВЧО РЕГУЛЬОВАНОЇ МЕТРОЛОГІЇ

The Means of Measuring Equipment Related to the Measurement of Mass in and Outside the Area of Legally Regulated Metrology

(cc) BY-SA

Т. Ільницька, кандидат технічних наук,
начальник калібрувальної лабораторії,
e mail: kl tw@ukr.net

Х. Василюха, кандидат технічних наук,
інженер з метрології,
e mail: lad tw@ukr.net

ТзОВ Науково виробниче підприємство «Техноваги»,
м. Львів, Україна

Т. Ільницька, candidate of technical sciences,
head of calibration laboratory,
e mail: kl tw@ukr.net

Kh. Vasylykha, candidate of technical sciences,
engineer in metrology,
e mail: lad tw@ukr.net

LLC Scientific Production Enterprise «Technowagy»,
Lviv, Ukraine

Розглянуто особливості застосування вимог нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» до засобів виміральної техніки, які вводяться в експлуатацію та використовуються у сфері та поза сферою законодавчо регульованої метрології.

На прикладі ЗВТ, пов'язаних з вимірюванням маси, описано порядок проведення оцінки відповідності вимогам технічних регламентів, які застосовуються до них. Подано переліки нормативних документів, відповідність яким надає приладам різних типів презумпцію відповідності суттєвим вимогам відповідних Технічних регламентів. Наведено інформацію щодо необхідності періодичної повірки після проведення процедур оцінки відповідності та по завершенню терміну міжповірочного інтервалу, а також вимоги щодо проведення калібрування.

In the article the peculiarities of applying the requirements of the new edition of the Law of Ukraine «On metrology and metrological activity» to the means of measuring equipment, which are put into exploitation and used in and outside the area of legally regulated metrology are considered. The means of measuring equipment which are put into circulation, placed on the market or put into exploitation and used in the area of legally regulated metrology shall comply with the requirements of all applicable Technical Regulations (Directives for EU) applicable to them.

On the example of the measuring instruments related to the measurement of mass describes the

procedure for assessing compliance with the requirements of the Technical Regulations applicable to them. The list of normative documents that corresponds to the instruments of different types for presumption of conformity with the essential requirements of the relevant Technical Regulations are submitted.

The information on the need for periodic verification of measuring equipment after conducting the conformity assessment procedure with the requirements of the Technical Regulations and after the end of the verification interval, which is established by the normative legal act of Ukraine is provided.

The requirements for voluntary calibration of means of measuring equipment, which are used in and / or outside the area of legally regulated metrology in accordance with the Law of Ukraine «On metrology and metrological activity» are considered. The enterprise must calibrate their standards and the means of measuring equipment to use to conduct their activities and / or to check the conformity of products and services to the established requirements. Because, the introduction of a certified quality management system in the enterprise requires compliance with the requirements of traceability and uncertainty of measurements.

Conformity assessment bodies, including testing and calibration laboratories, scientific metrology centers, metrology centers and verification laboratories, shall also calibrate their standards and means of measuring equipment with the intercalibration intervals set solely by the user, taking into account the guidelines specified in the regulations.

Ключові слова: законодавчо регульована метрологія, засіб виміральної техніки, калібрування, маса, оцінка відповідності, повірка.

Keywords: legislatively regulated metrology, means of measuring equipment, calibration, mass, conformity assessment, verification.

Відповідно до введеної в дію у січні 2016 р нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] (ЗУ «Про метрологію...») змінилися вимоги до введення в експлуатацію та використання засобів виміральної



Т. Ільницька



Х. Василюха

техніки (ЗВТ) у сфері та поза сферою законодавчо регульованої метрології.

У ст. 3 ЗУ «Про метрологію...» [1] сферою законодавчо регульованої метрології є визначені 13 видів діяльності (у таблиці 2 подано види діяльності, які відносяться до ЗВТ, пов'язаних з вимірюваннями маси), щодо яких, з метою забезпечення єдності вимірювань та простежуваності, здійснюється державне регулювання стосовно вимірювань, одиниць вимірювання та ЗВТ. Відповідно до ст. 8 [1], якщо ЗВТ використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології (ЗР ЗВТ), то вони повинні відповідати ЗУ «Про метрологію...», Технічним регламентам, іншим нормативно правовим актам, що містять вимоги до таких засобів вимірювальної техніки.

Прийнятий ЗУ «Про метрологію...» [1] гармонізує метрологічну практику в Україні з міжнародною. Але у підприємств виробників та користувачів ЗВТ виникає значна кількість питань та плутанина щодо необхідності проведення оцінки відповідності, повірки та калібрування ЗВТ. Тому у цій статті, на прикладі ЗВТ, пов'язаних з вимірюванням маси, подано необхідні роз'яснення.

ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ ВИМОГАМ ТЕХНІЧНИХ РЕГЛАМЕНТІВ

Відповідно до ст. 16 ЗУ «Про метрологію...» [1] та ст. 11 Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» (ЗУ «Про технічні регламенти...») [2] введені в обіг, надані на ринок або введені в експлуатацію ЗР ЗВТ повинні відповідати вимогам усіх чинних технічних регламентів, які застосовуються до них.

Відповідно до Закону України «Про технічні регламенти...» [2] «оцінка відповідності — процес доведення того, що визначені вимоги, які стосуються продукції, процесу, послуги, системи, особи чи органу, були виконані».

Також, відповідно до ст. 11 ЗУ «Про технічні регламенти...» [2], «технічним регламентом може бути передбачено, що відповідність продукції, пов'язаних з нею процесів або методів виробництва чи інших об'єктів національним стандартам, перелік яких затверджений відповідним центральним органом виконавчої влади, або їх частинам надає презумпцію відповідності такої продукції, пов'язаних з нею процесів або методів виробництва чи інших об'єктів вимогам зазначеного технічного регламенту, які охоплюються цими стандартами або їх частинами та визначені в технічному регламенті».

Згідно з частинами першою та другою ст. 25 ЗУ «Про технічні регламенти...» [2] оцінка відпо

відності вимогам технічних регламентів здійснюється у випадках і шляхом застосування процедур оцінки відповідності, визначених у таких технічних регламентах. Процедури оцінки відповідності вимогам технічних регламентів застосовуються виробниками, а у випадках, в яких, згідно з відповідними технічними регламентами, обов'язки виробників покладаються на імпортерів або розповсюджувачів, — імпортерами або розповсюджувачами. Виробники та інші особи застосовують процедури оцінки відповідності вимогам технічних регламентів самостійно, а у випадках, визначених у технічних регламентах чи передбачених ними процедурах оцінки відповідності, — із залученням відповідних органів з оцінки відповідності.

Неавтоматичні зважувальні прилади (ваги) під час уведення в експлуатацію повинні пройти оцінку відповідності вимогам Технічного регламенту щодо неавтоматичних зважувальних приладів (ТР НЗП) [3], якщо ваги використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології та/або які призначені для використання у категоріях застосування, зазначених у пп. 1—6 п. 2 цього ТР НЗП [3], а саме:

«1) визначення маси під час проведення комерційних операцій;

2) визначення маси з метою обчислення мита, тарифу, податку, знижки, штрафу, винагороди, відшкодування або аналогічного виду плати;

3) визначення маси з метою застосування законів, інших нормативно правових актів або висновку експерта, виданого в ході судового провадження;

4) визначення маси у медичній практиці для зважування пацієнтів під час медичного огляду, діагностування та лікування;

5) визначення маси для виготовлення ліків за рецептом в аптеках та визначення маси під час проведення аналізу в медичних і фармацевтичних лабораторіях;

6) визначення ціни на основі маси для цілей прямого продажу товарів населенню та фасування товарів».

Відповідно до п. 37 ТР НЗП [3] відповідність ваг суттєвим вимогам за вибором виробника може бути підтверджена шляхом проведення однієї з таких процедур оцінки відповідності, що визначені у додатку 2 ТР НЗП [3]:

- модуля *B* (перевірка типу) з подальшим застосуванням модуля *D* (відповідність типу шляхом забезпечення якості виробничого процесу) або модуля *F* (відповідність типу за результатами перевірки приладів);

- модуля *G* (відповідність за результатами перевірки кожного окремого приладу).

Як правило, модуль G застосовують або для унікальних ваг, розроблених в єдиному екземплярі, або для модернізованих ваг зі суттєвими змінами конструкції ваги, які виходять за межі опису типу, поданого в сертифікаті перевірки типу, і змінюють нормовані метрологічні характеристики ваг.

Згідно з наказом Мінекономрозвитку № 1048 від 29.06.2016 [4] відповідність ваг національному стандарту ДСТУ EN 45501:2016 «Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів» [5] (з 2019 р в Україні чинний ДСТУ EN 45501:2017 [6]), що є ідентичним гармонізованому європейському стандарту, надає вагам презумпцію відповідності суттєвим вимогам ТР НЗП [3].

Прилади автоматичні для зважування дорожніх транспортних засобів у русі та вимірювання навантажень на вісь (автомобільні динамічні ваги), призначені для застосування у сфері законодавчо регульованої метрології, під час уведення в експлуатацію повинні пройти оцінку відповідності вимогам Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки (ТР ЗР ЗВТ) [7]. Відповідно до додатку 1 ТР ЗР ЗВТ [7] до автомобільних динамічних ваг застосовують процедури оцінки відповідності $B + D$, або $B + F$, або G , опис яких подано в додатку 3 ТР ЗР ЗВТ [7].

Згідно з наказом Мінекономрозвитку № 717 від 23.04.2019 [8] відповідність автомобільних динамічних ваг національному стандарту ДСТУ OIML R 134 1:2010 «Прилади автоматичні для зважування дорожніх транспортних засобів у русі та вимірювання навантажень на вісь. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» [9], що є ідентичним гармонізованому європейському стандарту, надає автомобільним динамічним вагам презумпцію відповідності суттєвим вимогам ТР ЗР ЗВТ [7].

У випадку використання гир у сфері законодавчо регульованої метрології, гирі повинні також пройти оцінку відповідності вимогам ТР ЗР ЗВТ [7]. Процедури оцінки відповідності аналогічні автомобільним динамічним вагам, тобто модулі $B + D$, або $B + F$, або G . Згідно з наказом [8] презумпцію відповідності надає національний стандарт ДСТУ OIML R 111 1:2008 «Гирі класів точності $E1, E2, F1, F2, M1, M1 2, M2, M2 3$ і $M3$. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» [10].

Під час введення в експлуатацію оцінку відповідності вимогам Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки (ТР ЗВТ) [11] повинні пройти автоматичні зважувальні прилади, перелік яких наведено у додатку 8 ТР ЗВТ [11] (автоматичні прилади для зважування розділених вантажів; автоматичні вагові до-

затори дискретної дії; автоматичні ваги дискретної дії для сумарного обліку (бункерні ваги для сумарного обліку); ваги безперервної дії для сумарного обліку; залізничні платформні ваги), які призначені для застосування у сфері законодавчо регульованої метрології.

Згідно з п. 11 додатка 8 ТР ЗВТ [11] відповідність автоматичних зважувальних приладів (для електронних систем або систем, що містять програмний продукт) суттєвим вимогам за вибором виробника може бути підтверджена шляхом проведення процедур оцінки відповідності, поданих в додатку 2 ТР ЗВТ [11]: модулі $B + D$, або модулі $B + F$, або модуль G , або модуль $H1$ (відповідність на основі цілковитого забезпечення якості з експертизою проекту).

Переліки посилань на нормативні документи Міжнародної організації законодавчої метрології... [12], розміщені на сайті Мінекономрозвитку, дають посилання на міжнародні стандарти, відповідність яким надає презумпцію відповідності автоматичним зважувальним приладам вимогам ТР ЗВТ [11], а саме:

- автоматичним приладам для зважування розділених вантажів — на міжнародний стандарт OIML R 51 1:2006 [13] (в Україні чинний ДСТУ OIML R 51 1:2010 «Прилади для зважування розділених вантажів автоматичні. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» [14]);

- автоматичним ваговим дозаторам дискретної дії — на OIML R 61 1:2004 [15] (видано нову редакцію OIML R 61 1:2017 [16]) (ДСТУ OIML R 61 1:2008 «Дозатори дискретної дії вагові автоматичні. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» [17]);

- автоматичним вагам дискретної дії для сумарного обліку (бункерним вагам для сумарного обліку — на OIML R 107 1:2007 [18] (ДСТУ OIML R 107 1:2015 «Ваги дискретної дії для сумарного обліку автоматичні бункерні. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» [19]) та OIML D 11:2004 [20] (ДСТУ OIML D 11:2012 «Метрологія. Засоби вимірювання електронні. Загальні технічні вимоги» [21]);

- вагам безперервної дії для сумарного обліку на OIML R 50 1:1997 [22] (видано нову редакцію OIML R 50 1:2014 [23]) (ДСТУ OIML R 50 1:2017 «Ваги автоматичні безперервної дії для сумарного обліку (ваги стрічкові). Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги» [24]) та OIML D 11:2004 [20];

- залізничним платформним вагам — на OIML R 106 1:1997 [25] (видано нову редакцію OIML R 106 1:2011 [26]) (ДСТУ OIML R 106 1:2017 «Ваги залізничні платформні автоматичні. Частина 1. Загальні технічні вимоги. Методи випробування» [27]).

Таблиця 1. Маркування ЗР ЗВТ відповідно до технічних регламентів

Table 1. Marking of the means of measuring equipment used in the field of regulated metrology in accordance with the technical regulations

Технічний регламент	Маркування ЗВТ
Технічний регламент щодо неавтоматичних зважувальних приладів	
Технічний регламент законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки	
Технічний регламент засобів вимірювальної техніки	

де

- ♦ в додатковому метрологічному маркуванні MXX, XX: XX — дві останні цифри року нанесення;
- ♦ в ідентифікаційному номері органу з оцінки відповідності UA.TR.YYY: YYY — цифри органу з оцінки відповідності, що проводив процедури оцінки відповідності за модулем F чи модулем D;
- ♦ в UA.TR.XXX XXX XX rev.X: UA.TR.XXX XXX XX — номер сертифіката перевірки типу, rev.X — версія сертифіката

Після проходження процедури оцінки відповідності виробник наносить на вагу знак відповідності технічним регламентам (Постанова КМУ № 1184 від 30.12.2015 [28]) та додаткове метрологічне маркування, передбачені відповідними технічними регламентами [3, 7, 11] (табл. 1), та складає письмову декларацію про відповідність за формою, поданою у відповідному додатку технічного регламенту.

У випадку, якщо ЗР ЗВТ підпадають під дію інших технічних регламентів, то ЗР ЗВТ також повинні пройти процедури оцінки відповідності, передбачені цими технічними регламентами. Наприклад, вага, призначена для статичного зважування автомобілів, що використовується у вибухонебезпечному середовищі, підпадає під дію двох технічних регламентів: Технічного регламенту щодо неавтоматичних зважувальних приладів [3] і Технічного регламенту обладнання та захисних систем, призначених для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах [29], — і повинна пройти процедури оцінки відповідності, зазначені в обох цих технічних регламентах.

Потрібно зауважити, що ЗВТ, пов'язані з вимірюванням маси, які використовуються поза сферою законодавчо регульованої метрології та не підпадають під дію ТР НЗП [3], ТР ЗР ЗВТ [7], ТР ЗВТ [11], мо-

жуть підпадати під дію інших технічних регламентів. Наприклад, автоматичні зважувальні прилади повинні пройти процедури оцінки відповідності суттєвим вимогам Технічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання [30] та/або Технічного регламенту безпеки машин [31].

ЗР ЗВТ, що перебувають в експлуатації, підлягають періодичній повірці після проведення процедур оцінки відповідності вимогам Технічних регламентів по завершенню терміну міжповірочного інтервалу, встановленого нормативно правовим актом України.

ПОВІРКА

Відповідно до ЗУ «Про метрологію...» [1] «повірка ЗВТ — сукупність операцій, що включає перевірку та маркування та/або видачу документа про повірку ЗВТ, які встановлюють і підтверджують, що зазначений засіб відповідає встановленим вимогам».

Відповідно до ст. 17 ЗУ «Про метрологію...» [1] ЗР ЗВТ, що перебувають в експлуатації, підлягають періодичній повірці та повірці після ремонту, окрім тих, що застосовуються:

* органами з оцінки відповідності (у тому числі випробувальними та калібрувальними лабораторіями), акредитованими національним органом України з акредитації чи національними органами з акредитації інших держав, для провадження діяльності, стосовно якої їх було акредитовано;

* науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами та калібрувальними лабораторіями, які проводять калібрування засобів вимірювальної техніки відповідно до част. 2 ст. 27 цього Закону, стосовно ЗВТ, що використовуються ними при калібруванні».

Такі ЗВТ, у тому числі вторинні та робочі еталони, підлягають калібруванню.

Постановою Кабінету Міністрів України № 374 від 04.06.2015 [32] встановлено категорії ЗР ЗВТ, що підлягають періодичній повірці. Міжповірочні інтервали ЗР ЗВТ визначено у наказі Мінекономрозвитку України № 1747 від 13.10.2016 [33], й їх треба обов'язково дотримуватися. Для ЗР ЗВТ, пов'язаних з вимірюванням маси, категорії, види діяльності та міжповірочні інтервали, відповідно до зазначених вище нормативно правових документів [32, 33], подано у таблиці 2.

Відповідно в інших випадках для ЗВТ, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології та перебувають в експлуатації, на добровільних засадах може проводитися повірка або калібрування.

Таблиця 2. Категорії ЗР ЗВТ, пов'язаних з вимірюванням маси, що підлягають періодичній повірці, види діяльності щодо сфери законодавчо регульованої метрології та міжповірочні інтервали

Table 2. Categories of the means of measuring equipment related to mass measurement, which are subject to periodic verification, activities in the field of regulated metrology and the verification interval

Найменування категорій ЗР ЗВТ, що підлягають періодичній повірці	Види діяльності, що належать до сфери законодавчо регульованої метрології	Міжповірочний інтервал
1. Автоматичні зважувальні прилади: ▶ ваги безперервної дії для сумарного обліку; ▶ ваги дискретної дії та бункерні ваги для сумарного обліку; ▶ ваги для зважування розділених вантажів; ▶ вагові дозатори дискретної дії; ▶ прилади автоматичні для зважування дорожніх транспортних засобів у русі та вимірювання на вантажівку на вісь; ▶ залізничні платформні ваги; ▶ контрольні ваги	7) торговельно комерційні операції та розрахунки між покупцем (споживачем) і продавцем (постачальником, виробником, виконавцем), у тому числі під час надання транспортних, побутових, комунальних, телекомунікаційних послуг, послуг поштового зв'язку, постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної й теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів тощо); 8) обчислення сум податків і зборів, податковий та митний контроль	1 рік
25. Гирі	2) контроль якості та безпечності харчових продуктів і лікарських засобів; 3) контроль стану навколишнього природного середовища; 7) торговельно комерційні операції та розрахунки між покупцем (споживачем) і продавцем (постачальником, виробником, виконавцем), у тому числі під час надання транспортних, побутових, комунальних, телекомунікаційних послуг, послуг поштового зв'язку, постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів тощо); 12) роботи, що виконуються за дорученням органів досудового розслідування, органів прокуратури та судів; 13) реєстрація національних і міжнародних спортивних рекордів	1 рік, окрім гирь загального призначення класу точності M_1 та 4—6 класів точності до 20 кг, для яких встановлено міжповірочний інтервал 2 роки
50. Неавтоматичні зважувальні прилади	1) забезпечення захисту життя та охорони здоров'я громадян; 2) контроль якості та безпечності харчових продуктів і лікарських засобів; 3) контроль стану навколишнього природного середовища; 7) торговельно комерційні операції та розрахунки між покупцем (споживачем) і продавцем (постачальником, виробником, виконавцем), у тому числі під час надання транспортних, побутових, комунальних, телекомунікаційних послуг, послуг поштового зв'язку, постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів тощо); 8) обчислення сум податків і зборів, податковий та митний контроль; 12) роботи, що виконуються за дорученням органів досудового розслідування, органів прокуратури та судів; 13) реєстрація національних і міжнародних спортивних рекордів	1 рік, окрім неавтоматичних зважувальних приладів механічних до 50 кг, для яких встановлено міжповірочний інтервал 1,5 роки

КАЛІБРУВАННЯ

Відповідно до ЗУ «Про метрологію...» [1] калібрування ЗВТ визначено як «сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами (ЗВТ, що калібрують) з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу».

Калібрування ЗВТ використовується у міжнародній практиці для усунення технічних бар'єрів у торгівлі на основі взаємного визнання результатів вимірювання.

Відповідно до ст. 27 ЗУ «Про метрологію...» [1] «калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології».

Разом із тим, у національних стандартах ДСТУ ISO/IEC 17025 [34] та ДСТУ ISO серії 9000 [35, 36] встановлено вимоги щодо простежуваності та невизначеності вимірювань:

- ▶ ланцюг простежуваності до національних еталонів повинен бути продемонстрований;
- ▶ невизначеність результатів вимірювання повинна бути оцінена.

ДСТУ ISO 10012 [37] вимагає, щоби «вимірювальне обладнання мало належний статус калібрування перед його метрологічним підтвердженням».

І тому підприємства, в яких система управління якістю відповідає ДСТУ ISO/IEC 17025 [34] або ДСТУ ISO 9001 [36] та/або впроваджено вимоги ДСТУ ISO 10012 [37], повинні калібрувати свої еталони та ЗВТ, що використовують для провадження своєї діяльності та/або для перевіряння відповідності продукції та послуг встановленим вимогам.

Як зазначалося вище, еталони та ЗВТ, що застосовують у своїй діяльності органи з оцінки відповідності,

у тому числі випробувальні та калібрувальні лабораторії, наукові метрологічні центри, метрологічні центри та повірочні лабораторії, повинні бути калібровані з дотриманням міжкалібрувальних інтервалів.

Тому, як еталони та робочі еталони, підлягають калібруванню всі гири, окрім тих, що використовуються у видах діяльності щодо сфери законодавчо регульованої метрології, поданих у таблиці 2. Але, оскільки майже всі ваги, що використовуються, є електронними, а не механічними, то гири все менше використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології.

Ваги, що належать підприємствам з сертифікованою системою управління якістю та установам, зазначеним у ст. 17 ЗУ «Про метрологію...» [1], підлягають калібруванню. У випадку, якщо ці ваги використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології (табл. 2), то вони підлягають ще й періодичній повірці. Наприклад, аналітичні ваги, що використовує фармацевтичне підприємство у своїй випробувальній лабораторії, підлягають калібруванню. Але, якщо аналітичну вагу використовують і для досліджень, і для складання рецептурного препарату для клієнта, то ді вага підлягає і періодичній повірці, калібруванню.

Міжкалібрувальні інтервали встановлюються виключно користувачем ЗВТ. Загальні настанови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів подано в національному стандарті

ДСТУ *ILAC G 24/OIML D 10* [38]. Також під час визначення міжкалібрувальних інтервалів можна керуватися ДСТУ *OIML D 23* [39] та міжнародним документом *RP 1* [40].

За результатами калібрування ЗВТ видається сертифікат (свідоцтво) про калібрування із зазначенням відхилень показів ЗВТ від значень, реалізованих застосовним еталоном, і розширеної невизначеності вимірювання під час калібрування.

Сертифікати калібрування, видані акредитованими калібрувальними лабораторіями, які отримали дозвіл на використання Комбінованого Знаку *ILAC MRA*, визнаються у більш ніж 80 країнах — підписантах Угоди про взаємне визнання *ILAC*, наприклад, у країнах ЄС.

ВИСНОВКИ

Отже, зважаючи на сучасні вимоги:


- ▲ засоби вимірювальної техніки, які використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, під час введення в обіг, надання на ринок або введення в експлуатацію повинні пройти оцінку відповідності вимогам усіх чинних технічних регламентів, які застосовуються до них;

- ▲ періодична повірка проводиться виключно для засобів вимірювальної техніки, які використовуються у сфері законодавчо регульованої метрології та вже перебувають в експлуатації;

- ▲ усі інші засоби вимірювальної техніки, а особливо еталони, потрібно калібрувати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

2. Про метрологію та метрологічну діяльність [Електронний ресурс]: Закон України [прийнято Верхов. Радою 05 червня 2014 р. № 1314 VII]. — Режим доступу (Access mode): <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1314.18>.
2. Про технічні регламенти та оцінку відповідності [Електронний ресурс]: Закон України [прийнято Верхов. Радою 15 січня 2015 р. № 124 VIII]. — Режим доступу (Access mode): <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/124.19>.
3. Технічний регламент щодо неавтоматичних зважувальних приладів [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 16 грудня 2015 р. № 1062]. — Режим доступу (Access mode): <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1062.2015.%D0%BF>.
4. Про встановлення національного стандарту, що є ідентичним гармонізованому європейському стандарту та надає презумпцію відповідності приладів суттєвим вимогам Технічного регламенту щодо неавтоматичних зважувальних приладів [Електронний ресурс]: наказ [прийнято Мінекономрозвитку 29 червня 2016 р. № 1048]. — Режим доступу (Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1048731.16#n7>.
5. ДСТУ *EN 45501:2016* Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів (*EN 45501:2015, IDT*) (DSTU *EN 45501: 2016* Metrological aspects of non automatic weighing instruments (*EN 45501: 2015, IDT*)).
6. ДСТУ *EN 45501:2017* Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів (*EN 45501:2015, IDT*) (DSTU *EN 45501: 2017* Metrological aspects of non automatic weighing instruments (*EN 45501: 2015, IDT*)).
7. Технічний регламент законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 13 січня 2016 р. № 94] (Technical Regulation of Legally Regulated Measuring Instruments [Electronic Resource]: Resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine on January 13, 2016 No. 94]). — Режим доступу (Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94.2016.%D0%BF>.
8. Про затвердження Переліку національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності засобів вимірювальної техніки суттєвим вимогам Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки [Електронний ресурс]: наказ [прийнято Мінекономрозвитку 23 квітня 2019 р. № 717] (On approval of the List of national standards, compliance with which provides a presumption of conformity of measuring instruments with the essential requirements of the Technical Regulation of Legislative Instruments of Measuring Instruments [Electronic resource]: Order [adopted by the Ministry of Economic Development on April 23, 2019, No. 717]). — Режим доступу (Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0622731.18>.
9. ДСТУ *OIML R 134 1:2010* Прилади автоматичні для зважування до рухомих транспортних засобів у русі та вимірювання навантажень на вісь. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (*OIML R 134 1:2006, IDT*) (DSTU *OIML R 134 1: 2010* Automatic devices for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads. Part 1. General technical requirements and test methods (*OIML R 134 1: 2006, IDT*)).
10. ДСТУ *OIML R 111 1:2008* «Гири класів точності *E1, E2, F1, F2, M1, M1 2, M2, M2 3* і *M3*. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» (*OIML R 111 1:2004, IDT*) (DSTU *OIML R 111 1: 2008* «Throats of precision classes *E1, E2, F1, F2, M1, M1 2, M2, M2 3* and *M3*. Part 1: General Technical Requirements and Test Methods» (*OIML R 111 1: 2004, IDT*)).
11. Технічний регламент засобів вимірювальної техніки [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 24 лютого 2016 р. № 163] (Technical regulation of measuring instruments [Electronic resource]: resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine on February 24, 2016, No. 163]). — Режим доступу (Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163.2016.%D0%BF>.
12. Переліки посилань на нормативні документи Міжнародної організації законодавчої метрології (їх частини), що сформовані на основі відповідних посилань і переліків, опублікованих в Офіційному віснику

- Європейського Союзу, відповідність яким надає презумпцію відповідності засобів вимірювальної техніки вимогам Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 24.02.2016 № 163 [Електронний ресурс]: — Режим доступу (Lists of references to normative documents of the International organization of legal metrology (their parts), formed on the basis of relevant references and lists published in the Official Journal of the European Union, the conformity of which provides a presumption of conformity of the measuring equipment with the requirements of the Technical Regulation of Measuring Instruments, approved by the Cabinet decision Ministers of Ukraine dated February 24, 2016, No. 163 [Electronic resource]: — Access mode): <http://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk&id=d315ab41f92345f7bb897808b1181b2e&title=PerelikiPosilanNaNormativniDokumentiMizhnarodnoiOrganizatsiiZakonodavchoiMetrologiiikhChastiniSchoSformovaniNaOsnoviVidpovidnikhPosilanIPerelikivOpublikovanikhVOfitsiinomuVisnikuvropeiskogoSoiuzuVidpovidnistYaKimNadaPrezumptsiuuVidpovidnostiZasobivVimiriuvalnoiTekhnikiVimogamTekhnichnogoReglamentuZasobivVimiriuvalnoiTekhnikiZatverdzenomuPostanovoiuKabinetuMinistrivUkrainiVid24022016163>.
13. OIML R 51 1:2006 Automatic catchweighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements — Tests [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r0511e06.pdf
 14. ДСТУ OIML R 51 1:2010 Прилади для зважування розділених вантажів автоматичні. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (OIML R 51 1:2006, IDT) (DSTU OIML R 51 1: 2010 Devices for weighing separated cargoes are automatic. Part 1. General technical requirements and test methods (OIML R 51 1: 2006, IDT)).
 15. OIML R 61 1:2004 Automatic gravimetric filling instruments. Part 1: Metrological and technical requirements — Tests [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r0611e04.pdf
 16. OIML R 61 1:2017 Automatic gravimetric filling instruments. Part 1: Metrological and technical requirements.
 17. ДСТУ OIML R 61 1:2008 Дозагори дискретної дії вагової автоматичні. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (OIML R 61 1:2004, IDT) (DSTU OIML R 61 1: 2008 Batchers of discrete weight automatic. Part 1. General technical requirements and test methods (OIML R 61 1: 2004, IDT)).
 18. OIML R 107 1:2007 Discontinuous totalizing automatic weighing instruments (totalizing hopper weighers) Part 1: Metrological and technical requirements — Tests [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r1071e07.pdf.
 19. ДСТУ OIML R 107 1:2015 Ваги дискретної дії для сумарного обліку автоматичні бункерні. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (OIML R 107 1:2007, IDT).
 20. OIML D 11:2004 General requirements for electronic measuring instruments [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d011e04.pdf.
 21. ДСТУ OIML D 11:2012 Метрологія. Засоби вимірювання електронні. Загальні технічні вимоги (OIML D 11:2004, IDT) (DSTU OIML D 11: 2012 Metrology. Means of electronic measuring. General Technical Requirements (OIML D 11: 2004, IDT)).
 22. OIML R 50 1:1997 Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers). Part 1: Metrological and technical requirements — Tests [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r0501e97.pdf.
 23. OIML R 50 1:2014 Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers). Part 1: Metrological and technical requirements [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r0501e14.pdf.
 24. ДСТУ OIML R 50 1:2017 Ваги автоматичні безперервної дії для сумарного обліку (ваги стрічкові). Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги (OIML R 50 1:2014, IDT) (DSTU OIML R 50 1: 2017 Automatic continuous weighing scales for total accounting (tape weights). Part 1. Metrological and technical requirements (OIML R 50 1: 2014, IDT)).
 25. OIML R 106 1:1997 Automatic rail weighbridges. Part 1: Metrological and technical requirements — Tests [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r1061e97.pdf.
 26. OIML R 106 1:2011 Automatic rail weighbridges. Part 1: Metrological and technical requirements — Tests [Electronic Resource]. — Mode of access: <https://www.metast.com/dam/data/metast/Fachbereiche/KraftDruck/r1061e11.pdf>.
 27. ДСТУ OIML R 106 1:2017 Ваги залізничні платформні автоматичні. Частина 1. Загальні технічні вимоги. Методи випробування (OIML R 106 1:2011, IDT) (DSTU OIML R 106 1: 2017 Balance rail platform automatic. Part 1. General technical requirements. Test methods (OIML R 106 1: 2011, IDT)).
 28. Про затвердження форми, опису знака відповідності технічним регламентам, правил та умов його нанесення [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 30 грудня 2015 р. № 1184]. — Режим доступу (On approval of the form, description of the mark of conformity with the technical regulations, rules and conditions for its application [Electronic resource]: the resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine December 30, 2015, No. 1184]. — Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11842015%D0%BF>.
 29. Технічний регламент обладнання та захисних систем, призначених для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 28 грудня 2016 р. № 1055]. — Режим доступу (Technical regulation of equipment and protective systems intended for use in potentially explosive environments [Electronic resource]: resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine on December 28, 2016, No. 1055]. — Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/10552016%D0%BF>.
 30. Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 16 грудня 2015 р. № 1077]. — Режим доступу (Technical regulations on electromagnetic compatibility of equipment [Electronic resource]: resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine December 16, 2015, No. 1077]. — Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/10772015%D0%BF>.
 31. Технічний регламент безпеки машин [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 30 січня 2013 р. № 62]. — Режим доступу (Technical Rules of Machinery Safety [Electronic Resource]: Resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine on January 30, 2013 No. 62]. — Access mode): <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/622013%D0%BF>.
 32. Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 4 червня 2015 р. № 374]. — Режим доступу (On Approval of the List of Categories of Legally Regulated Measuring Instruments Subject to Periodic Verification [Electronic Resource]: Resolution [adopted by the Cabinet of Ministers of Ukraine June 4, 2015 No. 374]. — Access mode): <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/3742015%D0%BF>.
 33. Про затвердження міжповірочних інтервалів законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, за категоріями [Електронний ресурс]: наказ [прийнято Міністерством розвитку 13 жовтня 2016 р. № 1747]. — Режим доступу (On approval of inter taps intervals of legally regulated means of measuring equipment in operation, by categories [Electronic resource]: an order [adopted by the Ministry of Economic Development on October 13, 2016, No. 1747]. — Access mode): <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z141716>.
 34. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT) (DSTU ISO / IEC 17025: 2017 General requirements for the competence of test and calibration laboratories (ISO/IEC 17025: 2017, IDT)).
 35. ДСТУ ISO 9000:2015 Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2015, IDT) (DSTU ISO 9000: 2015 Quality management systems. Basic Terms and Glossary (ISO 9000: 2015, IDT)).
 36. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) (DSTU ISO 9001: 2015 Quality management systems. Requirements (ISO 9001: 2015, IDT)).
 37. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT) (DSTU ISO 10012: 2005 Measuring control systems. Requirements for measuring and measuring processes (ISO 10012: 2003, IDT)).
 38. ДСТУ IAC G 24/OIML D 10:2013 Метрологія. Наставови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (IAC G 24/OIML D 10:2007, IDT) (DSTU IAC G 24 / OIML D 10: 2013 Metrology. Guidelines for determining intercalibration intervals for measuring instruments (IAC G 24 / OIML D 10: 2007, IDT)).
 39. ДСТУ OIML D 23:2008 Метрологія. Принципи метрологічного контролю обладнання для повірки (OIML D 23:1993, IDT) (DSTU OIML D 23: 2008 Metrology. Principles of Metrological Control of Verification Equipment (OIML D 23: 1993, IDT)).
 40. RP 1: 2010 Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. 

Отримано / received: 25.06.2019.

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

DOI: 10.33955/2307_2180(4)2019.62_67

УДК628.9

ОПТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА

Optical System for Led Luminaire

(cc) BY-SA

А. Колесник, асистент кафедри «Світлотехніка і джерела світла», Харківський Національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна, e mail: Atay1791@gmail.com

A. Kolesnyk, assistant of the Department of Light Engineering and Light Sources, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e mail: Atay1791@gmail.com

Світлотехнічні пристрої є важливим елементом великого числа технічних систем, що включають дорожнє, житлове, промислове та інше освітлення. Розглянуто один із важливих компонентів світлодіодного приладу — оптичні системи. Проаналізовано особливості застосування вторинних оптичних елементів у виді лінз для отримання різних діаграм просторового розподілу сили світла світлодіодів. Розглянуто особливості та проблеми використання вторинних оптичних систем.

Lighting devices are an important element of a large number of technical systems, including road, living, industrial lighting, lighting systems of vehicles. It is known that the light instrument must fulfill two basic lighting tasks: to redistribute the light source of light source in the right way and to limit its dazzling effect. The introduction of light-emitting diodes (LEDs) for lighting necessitated a completely new quality in the construction of luminaires. The different production technology required new methods and designing tools. It also challenged designers with new problems to solve. LEDs are light sources emitting in one hemisphere, which requires a special approach to designing an LED lighting unit. However, for the illumination of premises with high spans or streets,

roads such a light distribution is not suitable. For luminaires with solid-state light sources, other materials and new technology must be used; moreover, light distribution needs to be formed using different methods.

This paper presents the design process of a LED luminaire from concept to implementation, exemplified by road lighting, and describes the methods and procedures used by the designer. Also, technological problems influencing the quality of the above lighting are addressed. Optical systems for LEDs are considered. The peculiarities of the use of secondary optical elements in the form of lenses for purpose of obtaining different diagrams of the spatial distribution of light intensity of light-emitting diodes are analyzed. Features and problems of calculation of secondary optical systems are considered. Massive collimators do not have to be elements that focus a narrow beam of light. They are able to form a beam in accordance with any accepted distribution that is appropriate for a given application. They are also able to form a beam in a specific way that is required for outdoor lighting luminaires. The stages of a project for designing a road luminaire require the application of the knowledge and experience gained in various research projects. The design methods described in this paper have been developed designing activity and are also to be used successfully in lighting production.

Ключові слова: світлодіод (СД), світильник, крива сили світла, лінза, оптика.
Keywords: LED, lamp, intensity curve, lens, optics.

Технологія виробництва випромінювальних діодів не передбачає зміни їх оптичної схеми: кристал зверху закритий первинною лінзою. Тобто, скоригувати її під конкретні умови експлуатації можна лише за допомогою вторинних елементів, наприклад, використовуючи світлодіодний світильник з відбивачем або лінзою. За використання допоміжних елементів, один і той же світильник повністю задовольнятиме вимогам освітленості одного об'єкта і разом із тим повністю не відповідатиме іншому. Наприклад, прилади, які добре зарекомендували себе за умов офісних, житлових, виробничих приміщень, аж ніяк не підходять для роботи як вуличні або туNELЬНІ прожектори. Щоби оцінити їх оптичну ефективність вводиться поняття кривої сили світла (КСС). Світлодіод має косинусний світлорозподіл: КСС типу Д з кутом розкриття світлового потоку 120°.

Окремі короткі цикли розроблення компонентів світлодіодного освітлення пред'являють у подальшому високі вимоги до процесу розроблення закінчених систем



© Колесник А., 2019

освітлення. Кількості ітерацій проекту, конструкцій і перевірок прототипу повинно бути якомога менше, що може бути досягнуто тільки за допомогою моделювання з оптичним елементом. Для цієї процедури застосовуються методи розрахунку геометричної оптики і, в окремих випадках, методи хвильової оптики [1]. Для досягнення мети є ряд високопродуктивних програмних засобів, заснованих на алгоритмах трасування променів. Однак, для проектування освітлювальних пристроїв необхідний програмний комплекс, що дозволяє повністю автоматизувати розроблення світильників, у тому числі з різними типами світлорозподілу. Для цього зручно використовувати заздалегідь заготовлені оптичні системи, тобто завантажувати їх з бази даних і варіювати їх для певних приладів із заданими КСС під певні умови експлуатації. Такої практики немає, тому на базі Науково дослідного центру світлотехнічних вимірювань ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, було виконано моделювання просторового світлорозподілу методом підбору вторинної оптичної системи для виготовленого світлодіодного світильника, світлотехнічні характеристики якого описано в статті [2].

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Першим параметром, за яким здійснюється підбір вторинної оптики для вирішення того чи іншого завдання, є кут світлового пучка, що формується оптичним елементом. Найчастіше це значення є кутом половинної яскравості, який визначається як кут, за якого сила світла у цьому напрямку зменшується на 50 % від максимального значення.

Якщо йдеться стосовно вуличного освітлення, то практика і досвід у проектуванні дорожнього освітлення вимагають, щоби світильники були обрані з дуже специфічним розподілом сили світла у відповідності з нормами. Зважаючи на характер зорової задачі водіїв, вимоги до освітлення європейського стандарту EN 13 201 для більшості ситуацій керуються визначенням яскравості. У міжнародній класифікації за типом накладення обмежень на силу світла під великими кутами визначають три типи кривих: обмежені, напівобмежені й необмежені. Застосування світильників з обмеженою КСС повністю виключає сліпучу дію, але при цьому домогтися рівномірного розподілу яскравості складніше й економічно невигідно. Тому в зовнішньому освітленні найчастіше застосовуються світильники з напівобмеженою КСС з регламентованими значеннями сили світла. Отже, формування кривої сили світла світильника зовнішнього освітлення, що вимагається, є нетривіальним завданням. Домогтися необхідного

розподілу можна дуже складним шляхом, розраховуючи оптичну частину самостійно; або скориставшись продукцією компаній, що спеціалізуються на виробництві вторинних оптичних елементів; або інформацією стосовно фотометричних даних світильника, що міститься в IES файлі, де дані упорядковано записано в текстовий файл у кодуванні ASCII (рис. 1).

Виходячи із викладеного вище, було отримано формулу, яка пов'язує інтенсивність світла світильника у напрямку будь якої обраної точки на дорожньому покритті, причому інтенсивність світла спрямована до точки, розташованої симетрично до неї, — відносно поперечної осі розрахунку, прийняту яскравість і коефіцієнт яскравості для даного типу поверхні у цих точках. Для розрахунку використовувалася формула із визначення сили світла:

$$I(i, j) = (L \times H^2) / r_{eq}, \quad (1)$$

$$r_{eq} = r_A(i, j) + r_B(i, j) \times \frac{r_B(m-i, n-j) - r_A(i, j)}{r_B(i, j) - r_A(m-i, n-j)}, \quad (2)$$

де $I(i, j)$ — інтенсивність світла світильника у напрямку обраної точки обчислення i, j ;

L — яскравість поверхні дороги;

H — висота світлової точки світильника;

r_{eq} — результувальний коефіцієнт яскравості до дорожнього покриття;

i — число рядка / номер рядка;

j — число стовпця / номер стовпця;

m — загальна кількість рядків;

n — загальна кількість стовпців;

r_A — коефіцієнт яскравості дорожнього покриття для світильника на початку розрахункової секції;

r_B — коефіцієнт яскравості дорожнього покриття для світильника в кінці розрахункової секції.

Інтенсивність світла, розрахована у такий спосіб, характеризується дуже гострими межами світла і тіні на краю області освітлення (таблиця 1). Під час проектування світильника з таким розподілом світла потрібно пам'ятати, що градієнт світла може мати дуже обмежені значення завдяки параметрам використовуваних матеріалів і прийнятих розмірів оптичної системи. Конструкція оптичної системи для світильників, зокрема, масивних коліматорів, передбачає визначення розташування поверхонь і орієнтацій оптичних елементів, що взаємодіють з випромінюванням, яке генерується джерелом світла.

Розташування визначаються відносно обраної точки, зазвичай центра джерела світла. Процес проектування може здійснюватися різними способами. Одним із них є графічний метод, де в комп'ютерному

Таблиця 1. Регламентовані значення сил світла світильників для освітлення вулиць і доріг у зоні кутів (75—90)°

Table 2. Regulated values of the luminous intensity of luminaires for illuminating streets and roads in the area of corners (75—90)°

α, град	Сила світла, кд, не більше
75	200
80	80
85	25
90	20

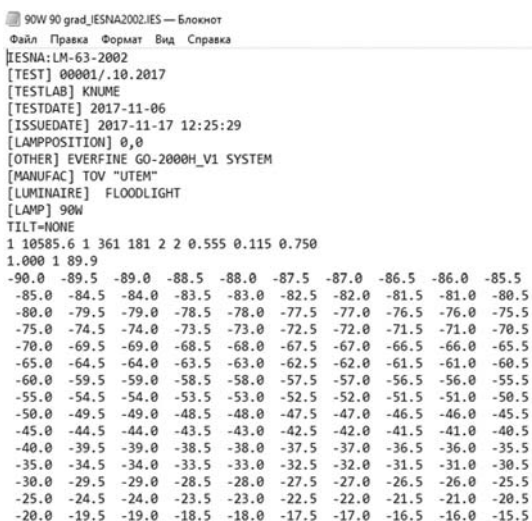


Рис. 1. Інформація стосовно фотометричних даних світильника (IES файл)

Fig. 1. Information on the photometric data of the Luminaire (IES file)

графічному середовищі використовуються прості геометричні інструменти для зображення поліліній, які є профілями активних поверхонь. Усі операції в 3D просторі приводяться до 2D площини, де містяться як падаюча, так і відбита або заломлена балки. Цей метод було обрано для використання у цьому дослідженні. Отже, розроблена модель уводиться в програму моделювання, за якою розраховується розподіл потоку та розподіл інтенсивності освітлення в окремих областях. Результати моделювання (рис. 2, 3) надалі можуть бути перенесені в програму розрахунку освітлення, що дозволить оцінити можливі наслідки використання світильників. У разі незадовільного результату робота повертається до початку проектування, і всі кроки повторюються до виконання вимог. Світлова ефективність мультилінзи за результатами моделювання склала 89 %. Таке значення світлової ефективності є близьким до теоретичного максимуму в 92 %, оскільки мінімум по 4 % світлового потоку втрачається на кожній межі розділу середовищ внаслідок

френелівських втрат (навіть у разі нормального падіння променів) [3]. При цьому середньоквадратичне відхилення необхідного розподілу від формованого елементом, склало не більше за 7,5 % [4]. Отже, об'єднання оптичних елементів у єдину мультилінзу має істотний вплив на ефективність вирішення і на вид формованого світлового розподілу.

Детально розроблення оптичної активної форми поверхні лінзи було виконано на основі додаткового припущення. Згідно з припущенням, вхідна поверхня елемента (через яку світло надходить без посередньо від джерела в оптичний елемент), разом із відбивними поверхнями, відповідає за обмеження світла за межами дорожньої області й за формування розподілу світла у площині, поперечній дорозі, тоді як вихідна поверхня відповідає за формування пучка світильника вздовж дороги. За таких умов вхідна поверхня і відбивні поверхні є фрагментами ротаційно симетричної площини, а вихідна поверхня має форму криволінійного фрагмента.

Для моделювання характеру зміни КСС СД від вторинної оптики було прийнято рішення використовувати інженерний метод розрахунку в програмі Microsoft Office Excel. Під час розрахунку необхідно враховувати, що фотони, які припадають на другу чверть в діаграмі розподілу світлового потоку СД і падають на дзеркальну поверхню, будуть від неї відбиватися і тим самим посилювати силу світла

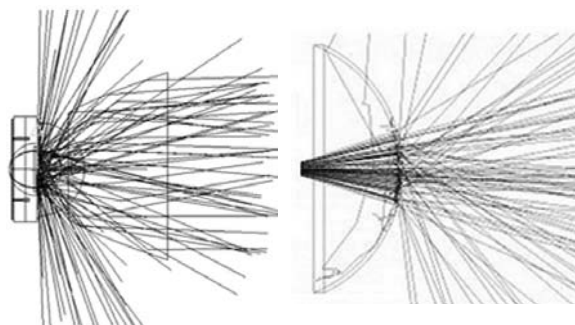


Рис. 2. Трасування променів
Fig. 2. Ray tracing



Рис.3. Тривимірне моделювання світлотехнічного елемента як закінченого об'єкта, форми
Fig.3 Three dimensional modeling of the lighting element, as a completed object, form

у першій чверті діаграми. Алгоритм розрахунку в декартовій системі координат такий:

- у перший стовпець вносяться значення кутів від 0 до 180° з кроком 10°;

- у другій стовпець вносяться дані розподілу сили світла СД, отримані за фотометрування на гоніофотометрі, враховуючи, що кут 90° відповідає ГО СД;

- у наступних стовпцях, за кількістю рівних в п.2, відповідно проводиться підсумовування значень сил світла відбитих променів, враховуючи перекриті дзеркальною поверхнею кути;

- за отриманими в п.3 результатами будується КСС СД із вторинної оптикою (рис. 4).

Проектування і виробництво сучасних оптичних систем потребує моделювання складних фізичних явищ. Моделі поширення світла у світлорозсіювальних елементах є частиною систем оптичного моделювання. Розрахунок і моделювання вторинної оптики світлодіодів є одним із найбільш складних завдань, що виникають у світлотехніці.

Випробовуваний світильник засвідчив значно вищий (на 22,7 % більший) світловий потік, ніж той, який передбачався під час моделювання. Форма розподілу кривої сили світла, зменшена до одиниці світлового потоку, вона трохи змінюється. Розміри, які були актуальні для освітлення дороги, що міститься між площинами C0 і C45, C135 і C180 інтенсивностей світла у напрямках, описаних малими кутами γ (нижчими від 25°), були меншими від 0 до приблизно 8 %, ніж ті, що розраховані раніше; тоді як у напрямках, описаних великими кутами γ (вищими за 25°), вони були вищими від 0 до приблизно 20 %, ніж розраховані раніше. Результати фотометрії відформатовано у файл, сумісний з IESNA 2002 [5], а далі застосовано для розрахунку освітленості на зразках доріг. Разом із тим отримане фотометричне тіло порівнювалося з фотометричними результатами розрахунків з іншими лінзами. Пряме порівняння виявило значні відмінності в деяких зразках лінз. Проте результати розрахунку освітлення були принаймні задовільними і відповідали всім нормам освітлення.

Для вуличних світильників із СД виготовляються лінзи з асиметричним світлорозподілом (широким у поперечній площині й концентрованим боковим у поздовжній). Сімейство лінійних лінз міс-

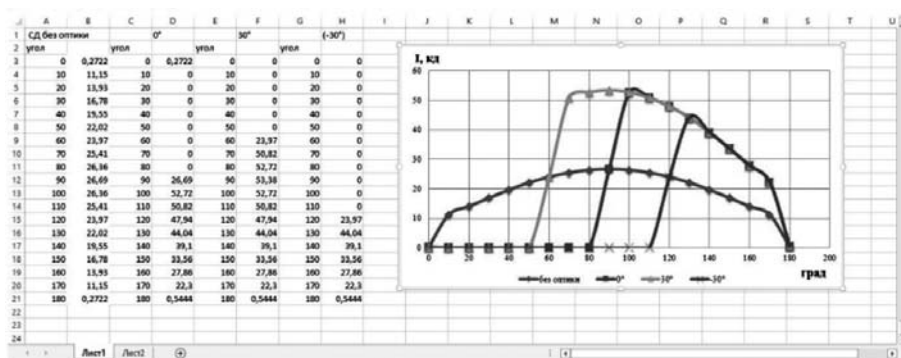


Рис. 4. Скріншот фрагмента програми для розрахунку КСС
Fig. 4. Screenshot of a program fragment for calculating the Intensity curve

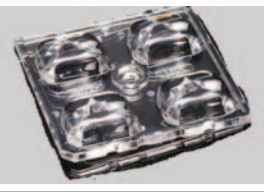



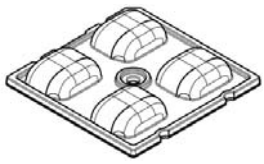
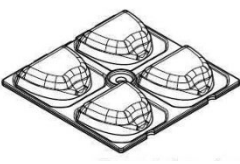
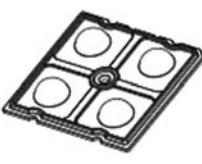
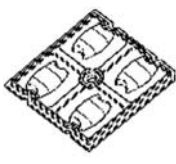
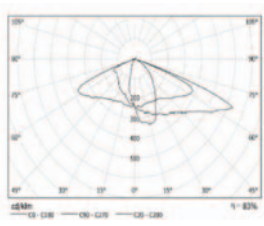
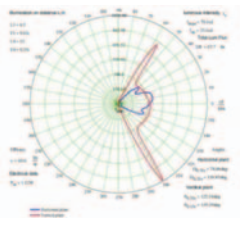
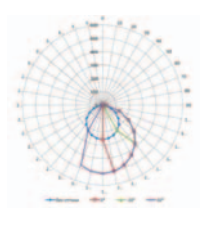
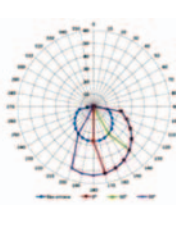
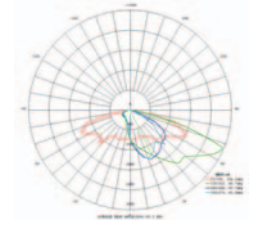
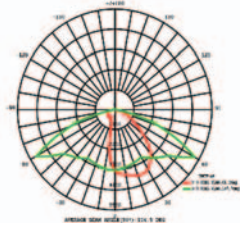
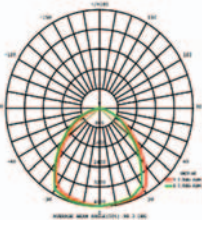
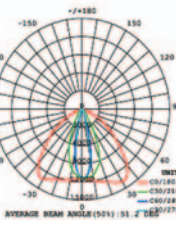
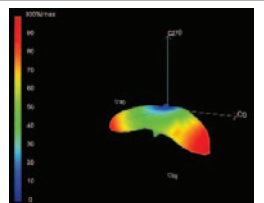
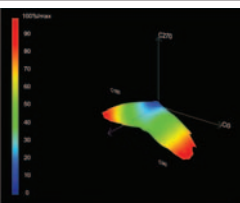
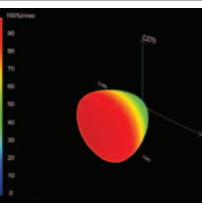
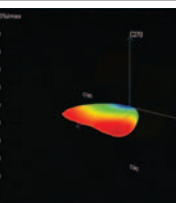
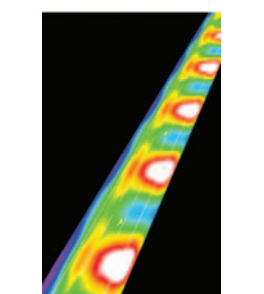

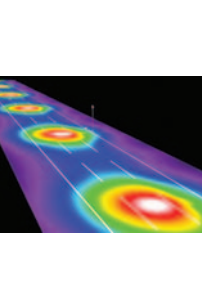
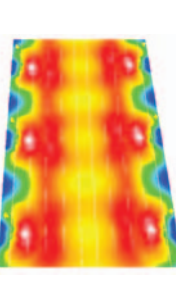
тять позиції, які розрізняються формою діаграми спрямованості і кутом розкриття. У таблиці 2 представлено всі обрані лінзи зі зазначенням результатів дослідження. Зрозуміло, що форми і кути розкриття діаграм відрізнятимуться за використання різних типів світлодіодів. Під час моделювання світильника із різними оптичними системами було враховано такі вимоги, які одночасно пред'являються до оптичних елементів: забезпечення високої світлової ефективності; мінімальна відстань від світлодіода до освітлюваної області за максимального куту того розміру освітлюваної області; висока рівномірність формованого розподілу освітленості [6].

У ході виконання роботи отримала подальшого розвитку методика проектування макетного зразка з різними типами оптичної системи для вуличного освітлення. За основу оптичних лінз було взято лінзи сталого розміру фірми LEDiL. Після проведення моделювання та фотометрування зразків було обрано єдиний зразок світильника з оптичною системою і відповідними значеннями світлового потоку та найвигіднішою кривою сили світла. На основі даних оптимізації та моделювання було виготовлено дослідний зразок [2]. Для ефективної роботи світлодіодного джерела було підбрано систему електричного живлення у виді драйвера, що стабілізує струм. Для відводу тепла було здійснено розрахунок теплового режиму, виходячи з електротехнічних і теплових характеристик, на основі чого вибрано запропонований радіатор. Проведено експериментальні дослідження світлорозподілу світлодіодного пристрою. Дослідження проводилися у світлотехнічній лабораторії на поворотному гоніофотометрі класу G02000 [7] для визначення і порівняння просторового розподілу сили світла світлового приладу модельованої оптичної системи із реальною.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Вторинна оптика розраховується під певний тип


Таблиця 2. Результати дослідження оптичних систем для світлодіодного світильника
 Table 2. Results of research of optical systems for an LED Luminaire

Назва	Лінза з асиметрією	Лінза з кутом розкриття 165*35	Лінза з кутом розкриття 90*90	Лінза з кутом розкриття 109*30
Фото				
2 D моделювання				
Вид				
Для моделювання характеру зміни КСС СД від вторинної оптики використано інженерний метод розрахунку в програмі Microsoft Office Excel				
КСС (модель)				
Експериментальна перевірка запропонованих моделей лінз, розрахунок КСС проводився на гоніофотометрі G02000				
КСС (вимірювання)				
Фотометричне тіло у форматі IESNA 2002, а потім файл застосований для розрахунку освітленості на зразках доріг				
Просторовий світловий розподіл				
Результати моделювання в програмі Dialux. Різноманітність типів доріг, правила та вимоги, вуличні світильники вимагають різної оптики з різним розподілом світла				
Візуалізація				

світлодіода і заданий світлорозподіл. З іншими світлодіодами вона не забезпечуватиме необхідної ширини пучка світла. Окрім того, освітлювана область може бути нерівномірною, і можлива поява додаткових кілець. Тому з появою на ринку нових світлодіодів виникає задача розрахунку і моделювання вторинної оптики, сумісної з ними. Використання світлодіодів у системах освітлення потребує засто-

сування вторинної оптики: лінзової і відбивної, — яка дозволяє змінити світлорозподіл світлодіода, підвищує ефективність світлотехнічного пристрою в цілому, формує необхідний розподіл освітленості. Актуальною є задача розрахунку і моделювання світлотехнічних характеристик світлодіодів та світлодіодних модулів на стадії проектування світлових приладів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ/REFERENCES

1. S. Wendel, (2014) *Freiform Optiken im Nahfeld von LEDs*, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific Publishing.
2. Колесник А.І. (2018) Результати випробування світлодіодного приладу згідно з методикою вимірювання світлотехнічних параметрів / А.І. Колесник, Д.О. Усиченко, Л.А. Назаренко // *Метрологія та прилади* (Kolesnyk A.I. (2018) Rezul'taty vyprobuvannya svitlodiodnoho pryladu z hidno z metodykoju vymiryuvannya svitlotekhnichnykh parametriv / A.I. Kolesnyk, D.O. Usichenko, L.A. Nazarenko // *Metrolohiya ta prylady*). — № 6. — С/С. 3—8.
3. Jaworski, M. (2012) Applying simulation to optimize plastic molded optical parts / M. Jaworski, A. Bakharev, F. Costa, C. Fried / *Proceedings of SPIE*. — Vol. 8489. — 848906.
4. Колесник А.І. (2019) Спектральні і фотометричні методи контролю параметрів світлодіодних джерел випромінювання / А.І. Колесник, Д.О. Усиченко, Л.А. Назаренко // *Журнал nano та електронної фізики* (Kolesnyk A.I. (2019) Spektral'ni i fotometrychni metody kontrolyu parametriv svitlodiodnykh dzherel vyprominyuvannya / A.I. Kolesnyk, D.O. Usichenko, L.A. Nazarenko // *Zhurnal nano ta elektronnoyi fizyky*). — № 1(11). — С/С. 01002 1—01002 6.
5. IESNA, «File format for electronic transfer of photometric data,» LM 63 1995.
6. V. Jacobs, J. Audenaert, J. Bleumers, G. Durinck, P. Rombauts and P. Hanselaer, (2015) «Rayfiles including spectral and colorimetric information,» *Optics Express*, vol. 23(3). pp. 2240—2251.
7. IES LM 75 01, «Goniophotometer Types and Photometric Coordinates,» 2001. 

Отримано / received: 29.07.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.П. Тимофеевим (Україна).
Prof. Ye.P. Tymofeiev, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(4)2019.68-72

УДК 519.23+519.25

ВАЛІДАЦІЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КУТА ПОПЕРЕЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТРАКТОРІВ І СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Validation for the Method Measuring Lateral Stability Angle Belonging Tractors and Agricultural Machines

CC BY-SA

А. Коробко, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут прогнозування і випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого, Харківська філія, м. Харків, Україна, e mail: ak82andrey@gmail.com

A. Korobko, Candidate of Technical Sciences, leading researcher, «Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute for Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production», Kharkiv branch, Kharkiv, Ukraine, e mail: ak82andrey@gmail.com

Наведено результати валідації методу вимірювання кута поперечної стійкості тракторів, причепів і сільськогосподарських машин, розробленого випробувальною лабораторією Харківської філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування і випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого». Розроблений метод базується на вимірюванні маси машини за бортами у горизонтальному і нахиленому положеннях. Оцінка поперечної стійкості здійснюється через непрямий показник — відношення мас борту машини у горизонтальному положенні й нахиленому. Застосування розробленого методу не потребує визначення координат центра мас машини і використання платформених стендів, а передбачає лише вимірювання маси машини у горизонтальному положенні й під кутом за підйому одного із бортів. Наведено методу розрахунку метрологічних характеристик запропонованого методу. Похибка вимірювання кута поперечної стійкості запропонованим методом складається із похибки вимірювання маси машини і невпевності у вимірюванні кута підйому борту машини. Ці величини є незалежними і некорельованими. Похибку вимірювання кута поперечної стійкості визначено для діапазону реальних значень мас машини і кута, на який можна підняти її борт за умов безпеки. У результаті валідації встановлено, що метод вимірювання кута поперечної стійкості машин шляхом послідовного зважування її бортів є придатним до застосування з такими параметрами: вимоги до точності засобів вимірювальної техніки: похибка вимірювання кута нахилу машини — не більша за $\pm 0,1^\circ$, похибка вимірювання маси машини — не більша за ± 4 кг; сумарна абсолютна похибка методу: за маси машини (2000)—(2300) кг — не більша за $1,5^\circ$, за маси машини (2300)—(10000) кг — $1,0^\circ$, за маси машини 10000 кг і більше — $0,5^\circ$. Діапазон вимірюваних значень кута поперечної стійкості — $(25—45)^\circ$. Кут, на який піднімається борт машини, — $(5—15)^\circ$. Сфера застосування методу: трактори, причепа, машини сільськогосподарські.

The article presents the results of validation for the method of measuring the lateral stability in tractors, trailers and agricultural machines. The method was developed in the testing laboratory of the State Scientific Institution «Leonid Pogorelyy Ukrainian Research Institute for Forecasting and Testing Equipment and Technologies for Agricultural Production», Kharkov branch. The method developed for measuring the angle of lateral stability is based on measuring the mass of the machine on boards in a horizontal and inclined position. Evaluation of lateral stability is carried out through an indirect indicator — the ratio of the mass of the machine bead in a horizontal position and inclined. The application of the developed method does not require determination of the coordinates of the center of mass of the machine and the use of platform stands, but provides only for measuring the mass of the machine in a horizontal position and at an angle when lifting one of the sides. A method for calculating the metrological characteristics of the proposed method is given. The error in measuring the angle of transverse stability of the proposed method consists of the error in measuring the mass of the machine and the uncertainty in measuring the angle of elevation of the machine's edge. These values are independent and uncorrelated. The measurement error of the lateral stability angle is determined for the range of the real values masses of the machines and the angle at which they can be lifted aboard in safety conditions. As a result, validation is established. The method of measuring the lateral stability of a machine by successively weighing its sides is suitable for use. Its following characteristics. Requirements for the accuracy of measuring instruments: the measurement error of the angle of inclination of the machine — no more than $\pm 0,1^\circ$; measurement error of the mass of the machine — no more than ± 4 kg. The total absolute error of the method: when the mass of the machine is (2000)—(2300) kg — not more than $1,5^\circ$; with a mass (2300)—(10000) kg — $1,0^\circ$; with a mass of 10,000 kg or more — $0,5^\circ$. The range of measured values of the lateral stability angle is $(25—45)^\circ$. The angle at which the machine climbs is $(5—15)^\circ$. The scope of application of the method: tractors, trailers, agricultural machines. Table — 4. Figure — 4. References — 10.

Ключові слова: валідація, кут поперечної стійкості, метод, похибка, вимірювання.
Keywords: validation, lateral stability angle, method, error, measurement.

Відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 [1] кожний метод перед його застосуванням повинен бути оцінений на його придатність для конкретного застосування. Тобто метод повинен бути валідованим. Валідація — це процедура доказу того, що вимоги конкретного застосування продукту, послуги чи системи задоволені [2]. У контексті [1] валідація — це перевірки можливості до конкретного



© Коробко А., 2019

застосування методу, розробленого лабораторію або стандартизованого за його модифікації або зміни. Якщо вносяться зміни до валідованого методу, вплив таких змін повинен бути визначений; і там, де вони впливають на початкову валідацію, повинна бути проведена нова валідація методу. Робочі характеристики валідованих методів, використовуваних за призначенням, повинні відповідати потребам за мовників та бути сумісними з визначеними вимогами. Робочі характеристики можуть включати (але не обмежуватися): діапазон вимірювань, точність, невизначеність результатів вимірювання, межі виявлення, межі кількісного визначення, вибірковість методу, лінійність, повторюваність або відтворюваність, стійкість до зовнішніх впливів або перехресної чутливості до впливу матриці зразка чи об'єкта випробування та зміщення вимірювання.

У статті наведено результати валідації методу вимірювання кута поперечної стійкості тракторів, причепів і сільськогосподарських машин (машин), розробленого випробувальною лабораторією Харківської філії Державної наукової установи «Український науково дослідний інститут прогнозування і випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» [3—7].

1. ВИКОНАННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КУТА ПОПЕРЕЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Розроблений метод вимірювання кута поперечної стійкості базується на вимірюванні маси машини за бортами у горизонтальному і нахиленому положеннях. Оцінка поперечної стійкості здійснюється через непрямий показник — відношення мас борту машини у горизонтальному положенні і нахиленому.

Метод виконується у такий спосіб:

1. Об'єкт випробувань зважується окремо за бортами у горизонтальному положенні (рис. 1 а). За наявності нерівномірності розподілу маси за бортами, поперечна координата центра мас буде зсунута від центра у бік більш навантаженого борту. Під час перекидання машини більш небезпечним (менший кут поперечної статичної стійкості) є випадок перекидання дання через більш навантажений борт.

2. Зважується машина за бортами за підйому менш навантаженого борту на довільний кут α_2 (рис. 1 б). Спосіб підйому може бути різним, і залежить він від технічних можливостей випробувальної лабораторії [6, 7].

3. Розраховується значення приросту маси (1) або (2):

$$\Delta m_{\alpha_2} = m_{н\alpha_2} - m_{нr} \tag{1}$$

$$\Delta m_{\alpha_2} = m_{в} - m_{в\alpha_2} \tag{2}$$

де $m_{н\alpha_2}, m_{в\alpha_2}$ — маси борту машини, що містяться нижче або вище, відповідно, за підйому машини на кут α_2 , кг;

$m_{н}$ — маса борту машини розташованого нижче за схилом, вимірена за горизонтального положення машини, кг.

4. Вимірюється кут поперечного нахилу машини.

5. За (3) розраховується кут поперечної статичної стійкості

$$\alpha_{cc} = (\Delta m_{\alpha_2} / m_{в})^{-1} \alpha_2. \tag{3}$$

Для реальних машин, що експлуатуються, значення кута статичної стійкості може міститися у межах від 25 до 45° (відповідно до [8] кут статичної стійкості сільськогосподарських машин повинен бути не меншим від 25° для самохідних зернозбиральних машин і не меншим від 35° для тракторів тягового класу 0,9 і вище). А кут, на який можна підняти борт машини під час випробувань, без застосування складного стендового обладнання і з забезпеченням безпечних умов випробувань, складає від 5 до 15°. Із зазначених вище умов, з використанням виразу (3), знайдемо значення множника в дужках за виконання наведених вище умов. Результати представлено у таблиці 1.

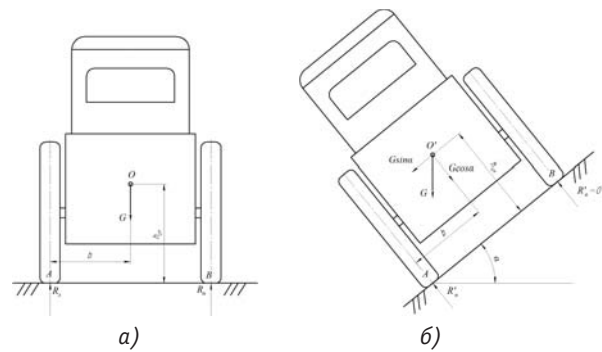


Рис. 1. Схема зважування трактора при випробуваннях

Figure 1. Test tractor weighing scheme

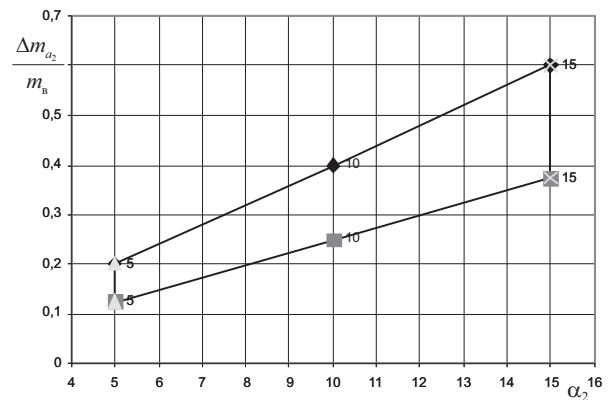


Рис. 2. Поле можливих значень складників рівняння (3)

Figure 2. The field of possible values of the components for the equation (3)

Таблиця 1. Зона можливих значень складових формули (3) для реальних машин

Table 1. The zone of possible values of the constituent of formula (3) for real machines

α_2	α_{cc}	$\frac{\Delta m_{\alpha_2}}{m_b}$	$\left(\frac{\Delta m_{\alpha_2}}{m_b}\right)^{-1}$
5	25	0,2	5
5	40	0,125	8
10	25	0,4	2,5
10	40	0,25	4
15	25	0,6	1,67
15	40	0,375	2,67

На рис. 2 подано графічну інтерпретацію поля можливих значень складників рівняння (3) — лінія 5 5 15 15.

Для вимірювання кута поперечної стійкості до статньо окремо вимірити множники рівняння (3) — значення маси і приросту маси та кута α_2 . А для визначення значення кута α_{cc} — застосувати заздалегідь проведені розрахунки з урахуванням умов, наведених у таблиці 1.

Результати зручно представити у виді таблиці (таблиця 2).

У таблиці 2 в рядках наведено значення відношення мас, а в стовпчиках — величини кута, на який здійснюється підйом машини під час випробувань. Прочерки в окремих чарунках таблиці свідчать, що за певного співвідношення множників у виразі (3) значення кута статичної стійкості виходять за межі реальних значень (центр тяжіння машини міститься нижче від точки опори). Градацію вхідних даних у таблиці 2 можна змінити і розрахунки проводити для кожного конкретного завдання.

Таблиця 2. Розрахункові значення кута статичної стійкості

Table 2. Estimated values for the angle of static stability

$\alpha,$ град	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,15	33,3	40,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	–	–	–	–	–	–
0,25	–	–	28,0	32,0	36,0	40,0	44,0	–	–	–	–
0,3	–	–	–	26,7	30,0	33,3	36,7	40,0	43,3	–	–
0,35	–	–	–	–	25,7	28,6	31,4	34,3	37,1	40,0	42,9
0,4	–	–	–	–	–	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5
0,45	–	–	–	–	–	–	–	26,7	28,9	31,1	33,3
0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	26,0	28,0	30,0
0,55	–	–	–	–	–	–	–	–	–	25,5	27,3
0,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	25,0

2. МЕТРОЛОГІЧНА ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ КУТА ПОПЕРЕЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Ураховуючи викладене вище, оціночним показником кута поперечної стійкості машин буде відношення мас у виразі (3) з урахуванням (2):

$$\alpha_{cc} \rightarrow (m_b - m_{b\alpha_2}) / m_b \tag{4}$$

Тому похибка вимірювання кута поперечної статичної стійкості методом послідовного зважування складається із похибки вимірювання мас бортів машини за їх підйому на різні кути (множник в дужках у (3)) і непевності похибки вимірювання кута, на який піднімається борт машини. Для визначення цих похибок використаємо диференціальну формулу визначення похибки:

$$\epsilon_{\alpha_{cc}} = \epsilon_m + \epsilon_{\alpha_2} \tag{5}$$

де ϵ_m — абсолютна похибка вимірювання мас машини (множник в дужках у (8));

ϵ_{α_2} — абсолютна похибка вимірювання кута підйому борту машини α_2 .

Величини ϵ_m і ϵ_{α_2} є двома незалежними, некорельованими величинами.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ НЕПЕВНОСТІ У ВИМІРЮВАНІ КУТА ПІДЙОМУ БОРТУ МАШИНИ

Уведемо таке для моделювання: похибка вимірювання кута α_2 $\epsilon_{\alpha_2} = \pm 0,1^\circ$ (кутомір ухиломір *Multi Digit Pro*).

Обчисливши за (3), з урахуванням похибки вимірювання, можливі значення кута α_2 , отримаємо значення абсолютної похибки вимірювання кута поперечної статичної стійкості від непевності у вимірюванні кута α_2 (таблиця 3). Графічну інтерпретацію поля можливих похибок від непевності у вимірюванні кута α_2 показано на рис. 3.

Як видно із таблиці 3 і рис. 3, найбільший вплив від похибки вимірювання кута нахилу машини ставиться за найменшого кута підйому машини і найменшого значення відношення мас. Потрібно зауважити, що таке співвідношення зазначених параметрів майже не зустрічається для реальних машин. Зі збільшенням кута підйому машини і зі збільшенням її маси абсолютна похибка вимірювання кута поперечної стійкості зменшуватиметься. Зі збільшенням кута підйому похибка зменшується за експоненціальним законом.

4. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ МАС МАШИНИ

У рівнянні (4) похибки вимірювання мас є незалежними і випадковими [9, 10]. Усі складові вимірюються незалежно, і у 50 % випадків недооцінка

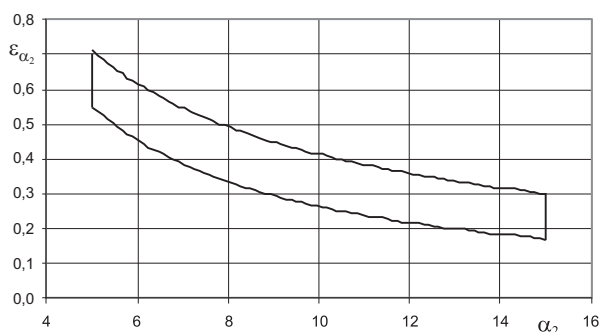


Рис. 3. Поле можливих значень похибок від невпевненості у вимірюванні кута α_2
Figure 3. Field of possible values of errors due to uncertainty in the measurement of the angle α_2

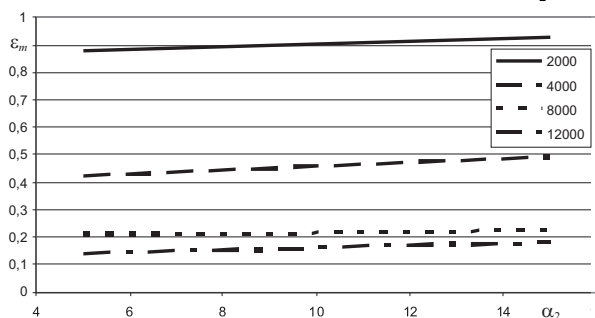


Рис. 4. Абсолютна похибка вимірювання мас машини
Figure 4. Absolute error of measurement for machine masses

похибки вимірювання однієї складової може компенсуватися переоцінкою іншої і навпаки. Як наслідок, значення $\delta_{\Delta m_{\alpha_2}/m_b} \approx \delta_{\Delta m_{\alpha_2}} + \delta_{m_b}$ переоцінювати неможливу похибку. Проте така умова визначати не максимально можливу похибку.

Похибка вимірювання відношення мас у (4) [10]

$$\delta_{\Delta m_{\alpha_2}/m_b} \approx 2\epsilon_m/\Delta m_{\alpha_2} + \epsilon_m/m_b. \quad (6)$$

Таблиця 3. Абсолютна похибка вимірювання кута поперечної статичної стійкості від невпевненості у вимірюванні кута α_2

Table 3. Absolute error of measuring the angle of transverse static stability from uncertainty in angle measurement α_2

α_2	$\epsilon_{\alpha_2 \max}$	$\epsilon_{\alpha_2 \min}$
5	0,7	0,5
6	0,7	0,5
7	0,5	0,4
8	0,5	0,3
9	0,5	0,3
10	0,4	0,3
11	0,4	0,3
12	0,3	0,2
13	0,3	0,2
14	0,3	0,2
15	0,3	0,2

Таблиця 4. Сумарна абсолютна похибка вимірювання кута поперечної стійкості

Table 4. Total absolute error for measurement of the angle transverse stability

α_2	ϵ_{α_2}	$\epsilon_{\alpha_{sc}}$			
		2000	4000	8000	12000
5	0,7	1,53	1,10	0,88	0,81
6	0,7	1,53	1,10	0,81	0,81
7	0,5	1,38	0,94	0,65	0,65
8	0,5	1,38	0,94	0,65	0,65
9	0,5	1,38	0,94	0,65	0,65
10	0,4	1,30	0,85	0,55	0,55
11	0,4	1,30	0,85	0,55	0,55
12	0,3	1,25	0,79	0,49	0,49
13	0,3	1,25	0,79	0,49	0,49
14	0,3	1,27	0,80	0,49	0,49
15	0,3	1,23	0,76	0,44	0,44

Для моделювання прийємо можливі значення мас сільськогосподарських машин і тракторів: 2000, 4000, 8000, 12000 кг. Абсолютна похибка вимірювання маси $\epsilon_m = \pm 4$ кг (ваги автомобільні електронні ВАПО 15); маса борту машини $m_b = 1100$ кг; маса борту машини $m_b = 1500$ кг;

Результати моделювання наведено на рис. 4.

Сумарна похибка вимірювання кута поперечної стійкості визначається за (5).

У результаті моделювання встановлено межі абсолютної похибки вимірювання кута поперечної стійкості залежно від маси машини (таблиця 4).

ВИСНОВКИ

Метод вимірювання кута поперечної стійкості машин шляхом послідовного зважування її бортів є придатним до застосування з такими параметрами:

* вимоги до точності засобів виміральної техніки:

вимірювання кута нахилу машини — не більша за $\pm 0,1^\circ$;

вимірювання маси машини — не більша за ± 4 кг;


* сумарна абсолютна похибка методу:
маса машини, кг похибка, не більша за
2000—2300 $1,5^\circ$
2300—10000 $1,0^\circ$
10000 — і більше $0,5^\circ$

* діапазон значень кута поперечної стійкості, що вимірюються, — $25\text{—}45^\circ$;

* кут, на який піднімається борт машини, — $5\text{—}15^\circ$.

* сфера застосування: трактори, причепи, машини сільськогосподарські.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017, IDT): DSTU ISO/IEC 17025:2017. — [Чинний від 2018 01 01]. — К.: Департамент технічного регулювання (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017, IDT): DSTU ISO/IEC 17025:2017. — [Acting on 2018 01 01]. — К.: Department of Technical Regulation), 2017. — VI, 26 с/р. — (Національний стандарт України / National Standard of Ukraine).
2. Валидация (Validation) — это (Validation (Validation) — this) : http://economicdefinition.com/Laws/Validaciya_Validation_eto.html (Електронний ресурс / Electronic resource).
3. Коробко А.І. (2016) Експериментально аналітичний метод вимірювання кута поперечної статичної стійкості колісних машин / Коробко А.І., Подригало М.А., Назарько О.О., Радченко Ю.А. // Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць (Korobko A.I. (2016) Method of measuring angle of lateral static stability experimental and analytical of wheeled vehicle / Korobko A.I., Podrygalo M.A., Nazarko O.O., Radchenko Yu.A. // Perspective technologies and devices. Collected scientific papers). — № 9(2). — С/Р. 49—52.
4. Коробко А. (2017) Удосконалення методу вимірювання кута поперечної стійкості машин / А. Коробко // Метрологія та прилади. Науково виробничий журнал. (Korobko A. (2017) Improving the method of measuring the angle of transverse stability of machines / A. Korobko // Metrology and devices. Scientific and production magazine). — № 4(66). — С/Р. 32—35.
5. Пат. UA 119256, МПК G01M 17/007, G01M 17/06 (2006.01). Спосіб вимірювання кута поперечної стійкості тягово транспортних причіпних машин / Коробко А.І., Лебедев А.Т., Лебедев С.А., Назарько О.О., Подригало М.А., Радченко Ю.А.; власник Державна наукова установа «Український науково дослідний інститут прогнозування і випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» Харківська філія. — № у 2016 12010; за явл. 28.11.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18 (Pat. UA 119256, IPC G01M 17/007, G01M 17/06 (2006.01). Method of measuring the angle of transverse stability of traction transport trailer machines / Korobko A.I., Lebedev A.T., Lebedev S.A., Nazarko O.O., Podrygalo M.A., Radchenko Yu.A.; owner State Scientific Institution «Leonid Pogorily Ukrainian Research Institute for forecasting and testing of technology and technologies for agricultural production» Kharkiv branch. — No. u 2016 12010; stated. 28.11.2016; published Sep 25, 2011, Bul. No. 1).
6. Пат. UA 122871, МПК G01M 1/00, G01M 17/00 (2017.01), G01B 5/24 (2006.01). Стенд для вимірювання кута поперечної стійкості машин методом послідовного зважування / Коробко А.І., Лебедев А.Т., Лебедев С.А., Подригало М.А.; власник Державна наукова установа «Український науково дослідний інститут прогнозування і випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» Харківська філія. — № у 2017 08976; за явл. 08.09.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2 (Pat. UA 122871, IPC G01M 1/00, G01M 17/00 (2017.01), G01B 5/24 (2006.01). Stand for measuring the angle of transverse stability of machines by the method of successive weighing / Korobko A.I., Lebedev A.T., Lebedev S.A., Podrygalo M.A.; owner State Scientific Institution «Leonid Pogorily Ukrainian Research Institute for forecasting and testing of technology and technologies for agricultural production» Kharkiv branch. — No. u 2017 08976; stated. 09/08/2017; published 01/25/2018, Byul. No. 2).
7. Пат. UA 122872, МПК G01M 1/00, G01M 17/00 (2017.01), G01B 5/24 (2006.01). Стенд для вимірювання кута поперечної стійкості машин, що рухаються, методом послідовного зважування / Коробко А.І., Лебедев А.Т., Лебедев С.А., Подригало М.А.; власник Державна наукова установа «Український науково дослідний інститут прогнозування і випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» Харківська філія. — № у 2017 08979; за явл. 08.09.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2 (Pat. UA 122872, IPC G01M 1/00, G01M 17/00 (2017.01), G01B 5/24 (2006.01). Stand for measuring the angle of transverse stability of moving machines by the method of successive weighing / Korobko A.I., Lebedev A.T., Lebedev S.A., Podrygalo M.A.; owner State Scientific Institution «Leonid Pogorily Ukrainian Research Institute for forecasting and testing of technology and technologies for agricultural production» Kharkiv branch. — No. u 2017 08979; stated. 09/08/2017; published 01/25/2018, Byul. No. 2).
8. ГОСТ 12.2.019 86 ССБТ Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности (GOST 12.2.019 86 SSBT Tractors and self propelled agricultural machines. General safety requirements). — 1991, 26 с/р.
9. Дж. Тейлор (1985) Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. М.: Мир (J. Taylor (1985) Introduction to the theory of errors. Per. from english M.: World). — 272 с/р.
10. Шчиголев В.М. (1962) Математическая обработка наблюдений. Издание 2 е. Стереотипное. М.: Государственное издательство физико математической литературы (Shchigolev V.M. (1962) Mathematical processing of observations. Edition 2 Stereotyped M.: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature). 344 с/р. 

Отримано / received: 18.04.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А.Т Лебедевим (Україна).
Prof. A.T. Lebedev, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.