

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 5(79), 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 «Укрметргестстандарт»),
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.
Коломієць 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 №9 від 24.10.2019)

Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Рижівська, 11, к. 2;
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 12.11.2019.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 47.

© «Метрологія та прилади», 2019

Журнал зареєстровано
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
ICV 2018 = 56,77

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
ICV 2018 = 56,77

Co-founders:

Kharkiv National University
of Radio Electronics (KNURE);
Public Organization
«Academy of Metrology of Ukraine»;
State Enterprise «Ukrainian State
Research and Production Centre
for Standardisation, Metrology,
Certification and Consumers
Rights Protection»
(SE «Ukrmetrtteststandart»);
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:

Kolomyiets 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.
Surdu 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 9 dated 24.10.2019)

Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;
tel.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net
<https://www.amu.in.ua/journal1>
<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 12.11.2019
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 47.

ISSN (print) 2307-2180
ISSN (online) 2663-9564
DOI: 10.33955/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2019

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИВолодарский Е., Кошева Л., Потоцкий И.

Особенности, возможности и применение контрольных карт накопленных сумм. Часть 2. Численный метод оценки разлаженности технологического процесса..... 3

МІЖЛАБОРАТОРНІ ПОРІВНЯННЯВеличко О., Довгань В., Нікітенко Д., Брезицький Я.

Другий раунд міжлабораторних порівнянь результатів калібрування мір електричного опору постійному струму 8

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІПістун Є., Роман В., Матіко Ф.

Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореного потоку із застосуванням багатоядерних функцій *Salami* 14

Купко О.

Аналіз зв'язку невизначеностей спектральних та колірних величин 20

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯШевченко А.

Обратная задача теплопроводности для полуограниченного стержня 27

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯДобровольський Ю., Прохоров Г., Ащеулов А.

Неселективний магнітоелектричний приймач теплового випромінювання на основі антимоніду кадмію 32

ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИКричевець О.

Формування функцій перетворення похибок вхідних даних обчислювальних компонентів вимірювальних систем на базі теорії кінцевих автоматів 37

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИКГригоренко І., Григоренко С., Носова І.

Розроблення та дослідження системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення халви 41

ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯІгнаткін В., Сарагтов О.

Оцінка спектра потужності сигналу в спрямованих приймальних системах 49

ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬЛісовець С., Барилко С., Зенкін А., Здоренко В.

Контроль поверхневої густини текстильних матеріалів шляхом використання автоматизованої сканувальної системи 52

ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯСеріков Я.

Проблеми розвитку та впровадження ультразвукового імпульсного методу в завданні вимірювання параметрів для визначення фізико-механічних характеристик бетону експлуатованих будинків і споруд 56

ХІМІЧНА МЕТРОЛОГІЯКалинюк М., Ісакова С., Пузрина Л.

Аналізування металевих порошоків на вміст домішок кисню, азоту, водню 62

ВІТАЄМО ЮВІЛЯРІВ

До 70-річчя Сергія Віталійовича Проненка 70

СЕМІНАРИ, КОНФЕРЕНЦІЇ, З'ЇЗДИ

XI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми обліку теплоти та води» 71

METHODS AND PROCEDURESVolodarsky E., Kosheva L., Pototsky I.

Features, Opportunities and Application of Control Cards Accumulated Sum. Part 2. Numerical Method for Assessing the Disorder of a Technological Process

INTER-LABORATORY COMPARISONVelichko O., Dovgan V., Nikitenko D., Brezitsky J.

Interlaboratory Comparisons of Calibration Results of the Measures of Electrical Resistance of Direct Current

ERRORS AND UNCERTAINTYPistun Ye., Roman V., Matiko F.

Investigating the Ultrasonic Flowmeter Error in Conditions of Distorted Flow Using Multipeaks Salami Functions

Kupko O.

Analysis of the Relationship Between Spectral and Color Uncertainty

THEORETICAL STUDIESShevchenko O.

Reverse Task of Heat Conductivity for the Semilimited Bar

EXPERIMENTAL RESEARCHESDobrovolsky Yu., Prokhorov G., Ascheulov A.

Non-Selective Magnetolectric Thermal Radiation Receiver Based on Cadmium Antimonide

MEASURING SYSTEMSKrichevets O.

Formation of the Convergence Functions of Errors of Input Data of Measurement Systems Computing Components on the Basis of the Finite Automatics Theory

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS CONTROLHrihorenko I., Hrihorenko S., Nosova I.

Development and Research of Measurement Parameters of Manufacture of Halva Technological Process

PROCESSING OF MEASUREMENTIgnatkin V., Saragtov O.

Evaluation of the Signal Power Spectrum in Directional Receiving Systems

QUALITY AND EFFICIENCYLisovets S., Barilko S., Zenkin A., Zdorenko V.

Control of Surface Density of Textile Materials Using Automated Scanning System

APPLICATION AND EXPLOITATIONSerikov Ya.

Problems of Development and Implementation of Ultrasonic Pulse Method in the Problem of Measurement of Parameters for Determination of Physical-Mechanical Characteristics of Concrete Maintained Buildings and Constructions

CHEMICAL METROLOGYKalyniuk M., Isakova S., Puzrina L.

Analyze of Metallic Powders on Content of the Oxygen, Nitrogen, Hydrogen Admixture

WELCOME**SEMINARS, CONFERENCES, CONGRESSES**

XI International Scientific and Practical Conference «Problems of Heat and Water Accounting»

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.3-7

УДК 616. 07:519.248

ОСОБЕННОСТИ, ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ НАКОПЛЕННЫХ СУММ. ЧАСТЬ 2. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАЗЛАЖЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Features, Opportunities and Application of Control Cards Accumulated Sum. Part 2. Numerical Method for Assessing the Disorder of a 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

Продолжено рассмотрение возможности поддержания технологического процесса в состоянии статистической управляемости с применением контрольных карт накопленных сумм. Рассмотрен численный метод оценки статистической управляемости процесса с помощью схемы интервалов принятия решений, основанный на вычислительном алгоритме. Показана эквивалентность графического и численного методов теоретически и на числовом примере.

Продовжено розгляд можливості підтримки технологічного процесу в стані статистичної керованості із застосуванням контрольних карт накопчених сум. Розглянуто чисельний метод оцінки статистичної керованості процесу за допомогою схеми інтервалів прийняття рішень, заснований на обчислювальному алгоритмі.

Контрольні карти накопчених сум можуть забезпечити виявлення виходу технологічного процесу з-під контролю і, на відміну від звичайної карти Шухарта, дозволяють швидко і точно визначити сферу змін процесу, а також момент, коли необхідно введення коригувальних дій. На відміну від графічного методу із застосуванням V-маски, коли необхідна обов'язкова присутність оператора для забезпечення контролю стану технологічного процесу, чисельний метод оцінки із застосуванням схеми інтервалів прийняття рішень може бути автоматизовано і надавати відповідні сигнали без участі оператора.

Метод, що розглядається, дозволяє виявити момент часу, коли зміна процесу не може бути зумовлена тільки впливом випадкових причин, тобто, присутній істотний систематич-

ний вплив, розладність процесу і зміщення первинного рівня настроювання. Застосування ж V-маски дозволяє вирішити зворотню задачу: за фіксації моменту розладу технологічного процесу встановити, в який час ця подія відбулася.

За побудови V-маски її «кут розкриття» безпосередньо пов'язаний з граничним допустимим зміщенням процесу і, зважаючи на вимоги до якості технологічного процесу, необхідно мати сукупність (набір) таких V-масок. За застосування чисельного методу така проблема не виникає.

Показано еквівалентність графічного і чисельного методів теоретично і на числовому прикладі, що, враховуючи певні безсумнівні переваги останнього, доводить перспективність його застосування.

The article continues to consider the possibility of maintaining the technological process in a statistical control state with the use of cumulative sum charts. A numerical method for estimating the statistical controllability of a process using a scheme of decision intervals based on a computational algorithm is considered.

Cumulative sum charts can provide an out-of-control process detection and, unlike a regular Shewhart charts, allow determine quickly and accurately the process change area, as well as when corrective action is required. Unlike the graphical method using the V-mask, when the mandatory presence of an operator is required to monitor the state of the process, the numerical estimation method using the decision interval scheme can be automated and provide appropriate signals without operator involvement.

The method under consideration reveals a point in time when a change in process cannot be caused



Е. Володарский



Л. Кошечая



И. Потоцкий

solely by the influence of random causes, that is, there is a significant systematic influence, a disorder of the process and a shift in the primary level of adjustment. The use of the same V-mask allows to solve the opposite problem: when fixing the moment of disorder of the technological process to determine what time this event took place.

When constructing a V-mask, its «opening angle» is directly related to the maximum permissible displacement of the process and,

Ключевые слова: технологический процесс, контрольные карты, критерии, кумулятивная сумма, выборка, опорное значение, численная оценка, вычислительный алгоритм.

Ключові слова: технологічний процес, контрольні карти, критерії, кумулятивна сума, вибірка, опорне значення, чисельна оцінка, обчислювальний алгоритм.

Keywords: technological process, control cards, criteria, cumulative sum, sample, reference value, numerical estimation, computational algorithm.

Разлаженность процесса — это быстрое, по сравнению с шагом дискретизации, изменение его параметров [1]. При статистическом управлении технологическим процессом, как правило, момент его разлаженности заранее неизвестен. Он может характеризоваться случайной величиной с некоторым распределением или просто неизвестным параметром. При этом свойства полученных данных предполагаются либо постоянными, либо медленно изменяющимися. Существует множество различных критериев раннего выявления разлаженности процесса, однако алгоритмы оценивания хорошо работают для медленных изменений [2, 3].

Как было отмечено в части 1 статьи [4], контрольные *Cusum*-карты могут обеспечить выявление выхода технологического процесса из-под контроля и, в отличие от обычной карты Шухарта, позволяют быстро и точно определить область изменений процесса, а также момент, когда необходимо введение корректирующих действий [5–8].

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

- метод графической оценки с помощью, так называемой, *V*-маски, предложенный *Barnard* [9];
- 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 технологического процесса.

Использование графического метода *V*-маски требует «присутствия» оператора, тяжело поддается автоматизации. Широкое применение микропроцессорной техники, обладающей достаточным объемом памяти и быстродействием, позволяет эффективно использовать численный метод при исследовании стабильности процесса.

based on the requirements for the quality of the technological process, it is necessary to have an aggregate (set) of such V-masks. When applying the numerical method, this problem does not occur.

The article shows the equivalence of graphical and numerical methods theoretically and numerically, which, given the certain undoubted advantages of the latter, proves the prospect of its application.

В связи с этим, рассматривается подход, который заключается в использовании вычислительного алгоритма и обеспечивает эквивалентность результатов, при определенных условиях, как графическим, так и численным методами.

СУТЬ МЕТОДА ОБРАБОТКИ *CUSUM*-КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМЫ ИНТЕРВАЛОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Для реализации данного метода вместо Y_i вводятся две величины:

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^i (\bar{X}_{jn} - \mu_0 - K), \quad (1)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^i (\bar{X}_{jn} - \mu_0 + K), \quad (2)$$

где \bar{X}_{jn} — среднее значение j -ой выборки, содержащей n элементов; μ_0 — заданное/опорное значение; K — постоянная величина (ее выбор рассмотрен ниже).

Для возрастающих накопленных сумм вводятся границы принятия решений (+ H), для убывающих — (минус H), с которыми соответственно сравниваются реализации S_i^+ и S_i^- . При этом, пока выполняется условие:

$$(\bar{X}_{jn} - \mu_0 - K) \leq 0 \quad (3)$$

или

$$(\bar{X}_{jn} - \mu_0 + K) \geq 0, \quad (4)$$

контрольная карта не заполняется — считается, что изменения S_i^+ и S_i^- обусловлены влиянием случайных величин.

Если же условие (3) не выполняется, т. е. при $(\bar{X}_{jn} - \mu_0 - K) > 0$, подсчитывается сумма S_i^+ , а при $(\bar{X}_{jn} - \mu_0 + K) < 0$ — сумма S_i^- . Если же на каком-либо этапе выполняется условие (3) или (4), счет прекращается и начинается с момента, когда эти неравенства не выполняются.

Как только значение одной из накопленных сумм S_i^+ или S_i^- достигнет соответственно верхней (+ H) или нижней (– H) границы интервала принятия решений, то отклонение уровня настройки исследуемого процесса от требуемого (заданного) значения μ_0 с момента времени j ($j \leq i$) считается существенным.

Его нельзя объяснить влиянием только случайных величин и следует вмешаться в процесс для его корректировки.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ГРАФИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МЕТОДОВ

При определении эквивалентности метода обработки карт с использованием интервалов принятия решений (EIS) и ранее рассмотренного графического метода с использованием V-маски [4] было установлено, что выход процесса из состояния статистической управляемости начинается с момента, когда граничные лучи, разделяющие области принятия решений, начнут пересекать кривую изменения Y_t . Таким образом, пока эта кривая находится между граничными лучами, т.е. скорость изменения $(y_t - \mu_0)$ Cusum-значений на интервале $(t - 1)$ и t будет меньше $\text{tg } \theta$, процесс проходит нормально.

Как уже отмечалось, при применении схемы интервального принятия решения процесс считается в норме, если

$$(y_t - \mu_0) < K, \quad t = 1, 2, \dots$$

Исходя из приведенных выше неравенств (3) и (4), можно сделать вывод, что эквивалентность двух методов обработки Cusum-карт обеспечивается при

$$K = \text{tg } \theta. \quad (5)$$

С учетом коэффициента f , который зависит от масштаба по осям ординат и абсцисс в V-маске, получим:

$$K = f \cdot \text{tg } \theta. \quad (6)$$

Как уже отмечалось, применение прямонаправленного последовательного LQ-критерия [4] позволяет выявить момент времени t_0 , когда изменение процесса не может быть объяснено только влиянием случайных причин, а наличием существенного систематического воздействия, т.е. разлаженностью процесса и смещением первоначального уровня настройки.

Применение же V-маски позволяет решить обратную задачу: при фиксации момента разлаженности технологического процесса установить, в какое время t_0 это событие произошло. Допустим, что через m шагов Cusum-карта выявила разлаженность процесса, т.е. в момент $t_e = t_0 + m$.

Следовательно, в момент t_e , в соответствии с правилом применения V-маски [4], необходимо вмешиваться в ход процесса, поскольку

$$\sum_{j=t_0}^{t_0+m} (y_j - \mu_0) \geq (d + m) \text{tg } \theta. \quad (7)$$

Это объясняется тем, что в момент времени t_e нарастающая кривая, отображающая накопленную

сумму, пересечет верхний граничный луч V-маски. Слагаемое в правой части неравенства (7) можно представить как

$$m \cdot \text{tg } \theta = \sum_{t_0}^{t_0+m} \text{tg } \theta.$$

Таким образом, с учетом коэффициента масштабирования, получим:

$$K = f \cdot \text{tg } \theta, \quad (8)$$

$$\sum_{j=t_0}^{t_0+m} (y_j - \mu_0 - \text{tg } \theta) \geq d \cdot \text{tg } \theta. \quad (9)$$

С другой стороны, при применении метода интервалов принятия решения имеем:

$$\sum_{j=t_0}^{t_0+m} (y_j - \mu_0 - K) \geq H. \quad (10)$$

Сравнивая выражения (9) и (10), с учетом коэффициента масштабирования, получим:

$$H = d \cdot f \cdot \text{tg } \theta \text{ или } H = f \cdot b/c \cdot c = b \cdot f. \quad (11)$$

При выборе K и H в соответствии с выражениями (8) и (11) применение обоих методов обработки Cusum-карт эквивалентно.

Однако следует заметить, что при построении V-маски «угол раскрытия» ее непосредственно связан с предельным допустимым смещением процесса Δ_0 и, исходя из требований к качеству технологического процесса, необходимо располагать совокупностью таких V-масок. При применении численного метода такая проблема не возникает. Более того, можно довольно просто изменять уровень настройки α , чего нельзя сделать при графическом анализе.

ЧИСЛОВОЙ ПРИМЕР

Рассмотрим тот же пример, что и в [4], применяя численный метод, построенный на основе схемы интервалов принятия решений EIS. Первоначально необходимо вычислить параметры K и H , используя выражения (8) и (11). Константа K определяется как:

$$K = f \cdot \text{tg } \theta = 7,5 \cdot 0,667 = 5,005.$$

Границы принятия решений определяются как:

$$H = d \cdot f \cdot \text{tg } \theta = 8,48 \cdot 7,5 \cdot 0,667 = 42,4212,$$

с которыми сравниваются S_t^+ и S_t^- , вычисляемые на основании выражений (1) и (2).

В таблице в графе 2 представлены выборочные средние при отсутствии смещения (разлаженности). При этом рассеивание результатов определяется только влиянием случайных величин. В графе 7 представлены выборочные средние для случая, когда в момент $t = 11$ появляется смещение $\Delta = +10$ ед. Значения S_t^+ и S_t^- (при $t = 1, 2, \dots$) для технологического процесса без смещения и со смещением (при $t = 11$) представлены соответственно в графах 4, 6 и 9, 11.

Выборочные значения технологического процесса
Selective process values

№ п\п	Нормальный ход процесса					Смещение на $\delta = +0,5$				
	\bar{x}_j	$\bar{x}_j - 100 - K$	S_t^+	$\bar{x}_j - 100 + K$	S_t^-	\bar{x}_j	$\bar{x}_j - 100 - K$	S_t^+	$\bar{x}_j - 100 + K$	S_t^-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	91,4	-13,6025		-3,5975	-3,5975	91,4	-13,6025		-3,5975	-3,5975
2	97,2	-7,8025		2,2025	-1,395	97,2	-7,8025		2,2025	-1,395
3	92,8	-12,2025		-2,1975	-3,5925	92,8	-12,2025		-2,1975	-3,5925
4	107,8	2,7975	2,7975	12,8025		107,8	2,7975	2,7975	12,8025	
5	110	4,9975	7,7950	15,0025		110	4,9975	7,7950	15,0025	
6	97,2	-7,8025		2,2025		97,2	-7,8025		2,2025	
7	112,4	7,3975	7,3975	17,4025		112,4	7,3975	7,3975	17,4025	
8	103	-2,0025	5,3950	8,0025		103	-2,0025	5,3950	8,0025	
9	95,6	-9,4025		0,6025		95,6	-9,4025		0,6025	
10	95,2	-9,8025		0,2025		95,2	-9,8025		0,2025	
11	103,2	-1,8025		8,2025		113,2	8,1975	8,1975	18,2025	
12	95,8	-9,2025		0,8025		105,8	0,7975	8,995	10,8025	
13	91	-14,0025		-3,9975	-3,9975	101	-4,0025	4,9925	6,0025	
14	94,6	-10,4025		-0,3975	-4,395	104,6	-0,4025	4,59	9,6025	
15	109	3,9975	3,9975	14,0025		119	13,9975	18,5875	24,0025	
16	102	-3,0025	0,9950	7,0025		112	6,9975	25,585	17,0025	
17	105	-0,0025	0,9925	10,0025		115	9,9975	35,5825	20,0025	
18	109,6	4,5975	5,5900	14,6025		119,6	14,5975	50,18	24,6025	
19	106,6	1,5975	7,1875	11,6025		116,6	11,5975	61,7775	21,6025	
20	92,8	-12,2025		-2,1975	-2,1975	102,8	-2,2025	59,575	7,8025	

Графики изменения этих величин представлены на рисунке.

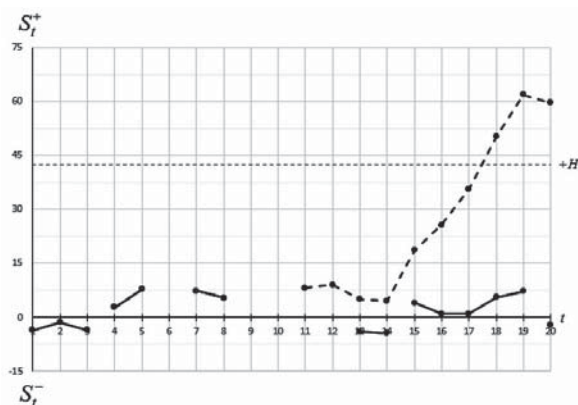


График обработки Cusum-карты (схема EIS) для нормального хода процесса и разлаженности уровня настройки на $\delta = 0,5$ при $t = 11$ (пунктирная линия)
Cusum-card processing schedule (EIS scheme) for the normal process flow and the setup level is disordered by $\delta = 0,5$ at $t = 11$ (dashed line)

ОПИСАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА

Реализации S_t^+ и S_t^- для j -ой точки ($j = 1, 2, 3, \dots$) сравниваются с интервалами принятия решения ($-H$) и ($+H$). Построение контрольных карт производится следующим образом. При выполнении условия $\bar{x}_j - \mu_0 - K \leq 0$ подсчет суммы S_t^+ не производится. Начиная с $\bar{x}_j - \mu_0 - K > 0$ подсчитывается сумма S_t^+ . Эта сумма увеличивается или уменьшается в зависимости от значения и знака новых слагаемых. Если на j -ом этапе сумма становится меньше или равной нулю, т. е. $S_t \leq 0$, процесс подсчета прекращается. В графах 3 и 4 таблицы приведены значения $(\bar{x}_j - 100 - K)$ и S_t^+ для $t = 1, 2, \dots$ Как следует из приведенных данных, от момента $t = 1$ до $t = 3$ $(\bar{x}_j - 100 - K) < 0$, поэтому графа для S_t^+ не заполняется, а на графике, представленном на рисунке, этому интервалу соответствует ось времени. В момент времени $t = 4$ значение $(\bar{x}_j - 100 - K)$ становится положительным, начинается подсчет S_t^+ , и на графике откладывается соответствующая

ордината. Процедура накопления S_t^+ , а следовательно, построения графика продолжается до $t = 5$. В этот момент времени $S_t^+ > 0$. Аналогично процедура подсчета суммы S_t^+ продолжается для всех имеющихся результатов. График для значений S_t^+ располагается выше оси абсцисс.

При подсчете накопления суммы S_t^- (графа б таблицы), исходят из знака выражения $(\bar{x}_j - 100 + K)$. Если выражение в скобках меньше нуля, начинается подсчет сумм S_t^- . Эта сумма может также уменьшаться или увеличиваться на каждом последующем шаге. Если она становится равной или больше нуля, процесс счета прекращается. Процесс снова начинается с момента, когда $(\bar{x}_j - 100 + K)$ станет меньше нуля. Так, при налаженном процессе подсчет S_t^- начинается с момента $t = 1$ и заканчивается при $t = 4$; снова начинается при $t = 13$. Данная ситуация отображена в нижней полуплоскости рисунка.

Исходные данные при смещении уровня настройки с момента $t = 11$ на $\Delta = +10$ ед. приведены в графе 7 таблицы, результаты расчетов представлены в графах 8 и 9 этой же таблицы. Расчет значений величины S_t^- с момента $t = 11$ при смещении уровня настройки на $\delta = +0,5$ не проводится, поскольку

$(\bar{x}_j - 100 + K)$ для $t = 11, \dots, 20$ будет больше нуля. На рисунке пунктирной линией приведен график, отображающий изменение накопленной суммы S_t^+ с момента $t = 11$, т. е. начиная с момента разладки процесса.

Как видим, результаты, полученные с применением V-маски и схемы интервалов принятия решения идентичны.

Анализ скорости изменения кривой (рисунок) при наличии разладки процесса и данных, приведенных в колонке 9 таблицы, позволяют на 2—3 шаге выявить эту разладку, что во многих случаях является весьма существенным.

ВЫВОДЫ

Численный метод оценки разладности технологического процесса с применением контрольных карт накопленных сумм позволяет на раннем этапе выявить момент выхода процесса из статистически управляемого состояния. Он учитывает требования к качеству процесса (его смещение) и позволяет легко и оперативно перестраивать уровни принятия решения о вмешательстве в ход процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Ширяев А.Н. (2016) Стохастические задачи о разладке. — М.: МЦНМО (Shiryaev A. N. (2016) Stochastic tasks on breakdown. — М.: MCNMO). — 392 с.
2. Volodarsky E., Kosheva L., Warsza Z., Idzkowski A. Precautionary statistical criteria in the monitoring quality of technological process // Recent Advances in Systems, Control and Information: International Conference SCIT 2016, — May 20—21, 2016. — Warsaw, Poland. — Technology ISBN 978-3-319-48923-0, 2017, Springer, — pp. 740—750.
3. Volodarsky E., Kosheva L., Warsza Z., (2017) Nowe statystyczne kryteria ostrożności do monitorowania jakości procesów technologicznych // Przemysł chemiczny. — 96/2. — p. 336—338. — DOI: 10.15199/62.2017.2.21.
4. Володарский Е.Т. (2019) Особенности, возможности и применение контрольных карт накопленных сумм. Часть 1. Метод графической оценки разладности технологического процесса / Е.Т. Володарский, Л.А. Кошечкина, И.А. Поточкий // Метрологія та прилади (Volodarsky E., Kosheva L., Potockiy I. (2019) Osobennosti, vozmozhnosti i primeneniye kontrolnykh kart nakoplennykh summ. Chast 1. Metod graficheskoy ocenki razlazhennosti tehnologicheskogo processa // Metrologiya ta priladi). — № 4, С/С. 24—30.
5. ISO 7870-4:2011 «Control charts — Part 4: Cumulative sum charts».
6. Мердок Дж. (1986) Контрольные карты / Дж. Мердок. — М.: Финансы и статистика (J. Murdoch. (1986) Control charts / J. Murdoch. — Moscow: Finance and statistics). — 150 с.
7. Douglas C. (2009) Montgomery. Introduction to Statistical Quality Control, 6th edition, John Wiley & Sons, New York.
8. Шишкин Б.В. (2016) Контрольные карты // Международный журнал экспериментального образования (Shishkin B.V. (2016) Kontrolnyye karty // Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya). — № 6-1. — С/С. 129—130.
9. Jonhson N., Leone F. (1977) Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences, vol. 1, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
10. Horst Rinne, Hans-Joachim Mittag (1995) Statistische Methoden der Qualitätssicherung, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, München, Wien.

Отримано / received: 03.10.2019.

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(5)2019.8-13

УДК 621.317.1

ДРУГИЙ РАУНД МІЖЛАБОРАТОРНИХ ПОРІВНЯНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРУВАННЯ МІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ПОСТІЙНОМУ СТРУМУ

Interlaboratory Comparisons of Calibration Results of the Measures of Electrical Resistance of Direct Current



О. Величко, доктор технічних наук,
директор науково-виробничого інституту,
В. Довгань, заступник начальника
науково-виробничого відділу,
Д. Нікітенко, начальник
науково-виробничого відділу,
Я. Брезицький, інженер 1 категорії,
ДП «Укрметрестстандарт», м. Київ, Україна,
e-mail: velychko@ukrcsm.kiev.ua

O. Velychko, doctor of engineering,
dyrector of the research and production institute,
V. Dovgan, deputy head of research
and production department,
D. Nikitenko, head of research and production
department,
J. Brezitskiy, 1st category engineer,
SE «Ukrmetrteststandart», Kyiv, Ukraine,
e-mail: velychko@ukrcsm.kiev.ua

Представлено результати другого раунду міжлабораторних порівнянь результатів калібрування мір електричного опору номіналів 1, 10 та 100 Ом на постійному струмі. Референтною лабораторією здійснено дослідження мір електричного опору як засобу порівняння, визначено опорні значення порівняння з розрахунком їх розширених невизначеностей. Порівняння результатів вимірювань, отриманих під час калібрування мір електричного опору п'ятьма лабораторіями відбувалося за радіальною схемою протягом 2018—2019 років. Визначені відхилення отриманих результатів кожною лабораторією та оцінені їх коректності з урахуванням невизначеності вимірювань за допомогою одного із критеріїв за статистикою функціонування для обраних номіналів електричних опорів. Проведено аналіз міжлабораторних порівнянь результатів калібрування мір електричного опору лабораторій, які брали участь у першому та другому раундах.

For the accredited calibration laboratories in Ukraine, a second round of inter-laboratory comparisons (ILC) of the results of calibration of electrical resistance measures of direct current was conducted. It is important to conduct such rounds of ILC of results with the involvement of an increasing number of calibration laboratories. This

will, accordingly, establish the competence of an increasing number of calibration laboratories, which is quite relevant today. The article presents the results of the first round of ILC of the measures of electrical resistance 1 Ohm, 10 Ohm and 100 Ohm on a direct current. As an comparison examples by reference laboratory measurement of electrical resistance of direct current P321 and P331, which were already used in the first round of ILC, were selected. The reference laboratory has research the measures of electrical resistance as a means of comparison, defined the reference values of comparison with the calculation of their extended uncertainties according to the measurement model. The comparison of the results of measurements obtained during the calibration of the measures of electrical resistance of eight laboratories took place according to the radial scheme from 2018 to 2019. The deviations of the results obtained by each laboratory were determined and their correctness was evaluated taking into account the uncertainty of measurements by one of the criteria for performance statistics for the selected electrical resistance ratings. The obtained En values show that for all laboratories participating satisfy the set criterion, except for the result of one laboratory for electrical resistance of 10 Ohms. A comparative analysis of the results of the calibration of resistance measures for laboratories that took part in the first and second rounds was carried out.

Ключові слова: міра електричного опору, міжлабораторні порівняння, національний метрологічний інститут, невизначеність вимірювань, сила постійного струму.

Keywords: measure of electrical resistance, inter-laboratory comparisons, national metrology institute, measurement uncertainty, direct current.

Стратегічною метою розвитку системи технічного регулювання є забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної продукції з поступовою інтеграцією економіки країни до ринку Європейського Союзу (ЄС). Це сприятиме подоланню технічних бар'єрів у торгівлі між Україною та ЄС і зміцненню її позицій на світовому ринку в результаті визнан-

ня національної системи технічного регулювання на європейському та міжнародному рівнях.

Важливим напрямом реалізації «Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 р.» (Стратегії), прийнятої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 844-р, від 19.08.2015 є забезпечення визнання виданих Національним

агентством України з акредитації (НААУ) атестатів про акредитацію на європейському та міжнародному рівнях, що неможливо без адаптації законодавства України у сфері технічного регулювання до законодавства ЄС. Окрім того, Стратегією визначено завдання щодо підготовки до запровадження в Україні систем міжлабораторних порівнянь (МПП) і професійного тестування та акредитації провайдерів таких систем.

Відповідно до стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025 [1], з метою підтвердження компетентності калібрувальних та випробувальних лабораторій у сфері акредитації, періодично необхідно проводити МПП. Програму МПП розробляють з урахуванням вимог національних стандартів ДСТУ ISO/IEC 17025 [1], ДСТУ EN ISO/IEC 17043 [2] та ДСТУ ISO 13528 [3]. Питання організації та проведення МПП є достатньо актуальним для акредитованих НААУ калібрувальних та випробувальних лабораторій.

В Україні ще з 1998 року функціонує Державний первинний еталон одиниці електричного опору (ДЕТУ 08-02-98), який відтворює та зберігає одиниці електричного опору 1 Ом і 100 Ом. Еталон має середньоквадратичний відхил результату вимірювань, менший від $3 \cdot 10^{-8}$, невилучену систематичну похибку, меншу від $3 \cdot 10^{-7}$. За допомогою цього еталона калібруються міри електричного опору постійному струму найвищої точності.

Для акредитованих НААУ калібрувальних лабораторій в Україні вже проведено перший раунд МПП калібрування мір електричного опору постійному струму [4]. Важливим є проведення інших раундів аналогічних МПП із залученням все більшої кількості калібрувальних лабораторій і, відповідно, встановлення компетентності все більшої кількості калібрувальних лабораторій, що на сьогодні є достатньо актуальним.

Мета дослідження — перевірка якості калібрування засобів вимірювальної техніки у калібрувальних лабораторіях-учасницях МПП під час виконання вимірювань одиниці електричного опору постійному струму відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025 [1].

За ініціативою Національного метрологічного інституту України ДП «Укрметртестстандарт» як референтної лабораторії було організовано й проведено другий раунд МПП калібрування мір електричного опору постійному струму для калібрувальних лабораторій, які відбулися за радіальною схемою з 2018 по 2019 рік. У цьому раунді МПП взяли участь п'ять калібрувальних лабораторій (у тому числі референтна лабораторія), а координувальні функції виконувало ДП «Укрметртестстандарт».

Усі лабораторії мали дотримуватися правил роботи з мірами електричного опору відповідно до експлуатаційної документації під час проведення вимірювань. Програму МПП реалізовано відповідно до вимог стандартів ДСТУ EN ISO/IEC 17043 [2] і ДСТУ ISO 13528 [3]. Калібрувальним лабораторіям-учасницям МПП пропонувалося за п'ять календарних днів провести всі необхідні дослідження зразків порівняння згідно з власними методиками та надати ДП «Укрметртестстандарт» відповідні протоколи калібрування.

За результатами проведеного МПП калібрування мір електричного опору постійному струму необхідне опрацювання референтною лабораторією отриманих первинних даних від лабораторій-учасниць МПП з урахуванням опорних значень з їх розширеними невизначеностями, оцінювання нею отриманих лабораторіями-учасницями МПП результатів за допомогою одного із критеріїв за статистичною функціонування для обраних номіналів електричних опорів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Методи дослідження

Як зразок порівняння референтною лабораторією — ДП «Укрметртестстандарт» — обрано міри електричного опору постійному струму: P321 номіналом 1 Ом, P321 номіналом 10 Ом і P331 номіналом 100 Ом, які вже використовувалися у першому раунді МПП. Зовнішній вид мір електричного опору — зразків порівняння в МПП наведено на рис. 1.

Міри електричного опору P321 і P331 мають класи точності 0,01 і призначені для калібрування чи періодичної повірки робочих мір електричного



Рис. 1. Зовнішній вид мір електричного опору P321 (1 Ом), P321 (10 Ом) і P331 (100 Ом)
Fig. 1. The general view of the measures of electrical resistance P321 (1 Ом), P321 (10 Ом) and P331 (100 Ом)

опору в колах постійного струму, а також робочих засобів вимірювальної техніки.

Основні характеристики мір електричного опору P321 і P331:

- номінальне значення опору: 1, 10 і 100 Ом;
- значення номінальної потужності: 0,1 Вт;
- значення максимальної потужності: 1 Вт;
- робочий діапазон температур: від 15 до 30 °С;
- діапазон температур зберігання: від 10 до 40 °С;
- робочий діапазон відносної вологості повітря:

від 0 до 80 %;

- лінійні розміри корпусу: 170 мм (висота) і 110 мм (діаметр);

- маса: 1 кг.

Калібрування виконувалися у точках 1, 10 і 100 Ом (не менше 22 вимірювань у кожній точці) за таких умов навколишнього середовища та параметрів мережі живлення:

- температура навколишнього повітря: (20,0 ± 0,1) °С;

- відносна вологість повітря: (55 ± 25) %;

- атмосферний тиск: (100 ± 6) кПа;

- напруга мережі живлення: (220 ± 10) В;

- частота мережі живлення: (50 ± 0,2) Гц.

Відхилення результатів вимірювання лабораторій визначалося за формулою:

$$D_{lab} = x_{lab} - X_{ref}, \quad (1)$$

де x_{lab} — значення виміреного учасником відносного відхилення електричного опору постійному струму;

X_{ref} — дійсне значення електричного опору постійного струму, визначене як середнє арифметичне значення із значень вимірювань, виконаних референтною лабораторією.

Оцінка результатів кожного учасника проводилася за допомогою критерію за статистикою функціонування — числового показника E_n , який визначався за формулою:

$$E_n = \frac{x_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}, \quad (2)$$

де U_{lab} — розширена невизначеність вимірювань за визначення значення електричного опору постійному струму учасником;

U_{ref} — розширена невизначеність вимірювань за визначення дійсного значення електричного опору постійному струму, яка визначається як

$$U_{ref} = 2 \cdot \sqrt{u^2(X_{ref}) + u^2(X_{stab})}, \quad (3)$$

де $u(X_{ref})$ — стандартна невизначеність, отримана під час калібрування мір електричного опору P321 і P331 референтною лабораторією для відповідного номіналу (1, 10 і 100 Ом);

$u(X_{stab})$ — стандартна невизначеність від нестабільності мір електричного опору P321 і P331 як зразків порівняння за час проведення порівнянь:

$$u(X_{stab}) = \Delta X_{max} / \sqrt{3}. \quad (4)$$

При цьому, якщо:

$|E_n| \leq 1$ — результат не потребує заходів коригування або реагування;

$|E_n| > 1$ — результат потребує заходи коригування або реагування.

2. Дослідження зразка порівняння, визначення опорного значення та його розширеної невизначеності

Референтна лабораторія визначала характеристики нестабільності зразка порівняння до і після проведення його досліджень у лабораторіях-учасницях МПР.

Модель вимірювання під час калібрування мір електричного опору в абсолютній формі (Ом) як відхилення вимірюваної величини від опорного значення має такий вид:

$$R_x = R_{nom} + \Delta R_x + \Delta R_c + \Delta R_{res} + \Delta_s + \Delta_{dr}, \quad (5)$$

де: R_x — середнє значення результату вимірювання електричного опору;

R_{nom} — номінальне значення електричного опору;

ΔR_x — відхилення виміреного значення електричного опору від номінального;

ΔR_c — складова невизначеності, яка виникає за вимірювання електричного опору;

ΔR_{res} — складова невизначеності яка виникає за вимірювання електричного опору через кінцеву роздільну здатність;

Δ_s — невизначеність еталонної міри;

Δ_{dr} — невизначеність, зумовлена дрейфом міри (річна нестабільність).

Бюджети невизначеностей для опорних значень МПР калібрування мір електричного опору 1, 10 і 100 Ом наведено у табл. 1.

Референтною лабораторією встановлені такі опорні значення з відповідними розширеними невизначеностями ($k = 2$) для електричних опорів, що регламентуються Програмою проведення МПР:

$X_{ref1-R} = (1,000029 \pm 0,00000097)$ Ом — для електричного опору 1 Ом;

$X_{ref2-R} = (9,99942 \pm 0,0000187)$ Ом — для електричного опору 10 Ом;

$X_{ref3-R} = (99,9983 \pm 0,000364)$ Ом — для електричного опору 100 Ом.

3. Дослідження зразка порівняння лабораторіями-учасницями

У табл. 2 і на рис. 2 наведено результати калібрування мір електричного опору (мір опору

Таблиця 1. Бюджети невизначеностей для опорних значень МПР калібрування мір електричного опору
 Table 1. Budget of uncertainty for references values inter-laboratory comparison of results of the calibration of measures of electrical resistance

Вхідна величина, X_i	Оцінка вхідної величини, x_i , Ом	Стандартна невизначеність, $u(x_i)$, Ом	Закон розподілу	Коефіцієнт чутливості, c_i	Внесок у невизначеність, $u_i(y)$, Ом
Електричний опір 1 Ом					
R_x	1,000000				
ΔR_x	0,000029				
ΔRc	0	0,000000221	рівномірний	1,0	0,000000221
$\Delta Rres$	0	0,00000029	рівномірний	1,0	0,00000029
Δs	0	0,00000015	нормальний	1,0	0,00000015
Δdr	0	0,00000087	рівномірний	1,0	0,00000087
R_x	1,000029				0,00000097
Електричний опір 10					
R_x	10,00000				
ΔR_x	-0,00058				
ΔRc	0	0,000000256	рівномірний	1,0	0,000000256
$\Delta Rres$	0	0,000000289	рівномірний	1,0	0,000000289
Δs	0	0,000000450	нормальний	1,0	0,000000450
Δdr	0	0,00001730	рівномірний	1,0	0,0000173
R_x	9,99942				0,0000187
Електричний опір 100					
R_x	100,0000				
ΔR_x	-0,0017				
ΔRc	0	0,000000238	рівномірний	1,0	0,000000238
$\Delta Rres$	0	0,000000289	рівномірний	1,0	0,000000289
Δs	0	0,000000400	нормальний	1,0	0,000000400
Δdr	0	0,00003464	рівномірний	1,0	0,00003464
R_x	99,9983				0,00003640

P321 і P331) для електричного опору 1, 10 і 100 Ом лабораторіями-учасницями МПР (отримане значення електричного опору R_x , відхилення результату вимірювання лабораторій D_{lab} , їх розширені невизначеності U_{lab} і значення показника E_n), які позначені відповідно Ref і Lab i ($i = 1..4$).

Для аналізу отриманих результатів МПР і формування висновків щодо лабораторій-учасниць МПР калібрування мір електричного опору всіх визначених номіналів використано показник E_n (рис. 3), який визначався за виразом (2). Отримані значення свідчать, що для всіх лабораторій-учасниць МПР вони задовольняють установленому критерію, окрім результату лабораторії Lab 1 для електричного опору 10 Ом ($E_n = -1,51 < 1,0$).

Дослідження референтної лабораторії засвідчили, що лабораторії-учасниці МПР застосовували власні методи вимірювання та власні робочі еталони. Лабораторії Ref, Lab 1, використовували однакові робочі еталони і метод порівняння з мірою за допо-

могою компаратора. Лабораторія Lab 2 використовувала як робочий еталон високоточний мультиметр, лабораторія Lab 3 — як робочі еталони калібратор і вольтметр і лабораторія Lab 4 використовувала як робочі еталони міри електричного опору і міст постійного струму.

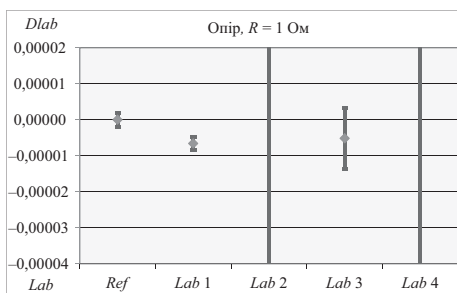
Аналіз порівняння результатів лабораторій Lab 3 і Lab 4, які брали участь як у першому [4], так і другому раундах МПР, засвідчив таке:

* лабораторія Lab 3 отримала задовільні результати під час калібрування мір електричного опору для номіналів 10 і 100 Ом, однак їй необхідно застосувати більш точні методи вимірювань і робочі еталони, які мають меншу невизначеність вимірювань;

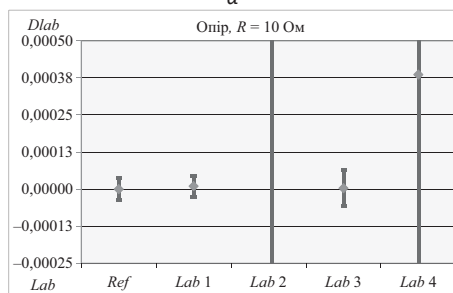
* лабораторія Lab 4 показала більш точні результати вимірювань у другому раунді МПР, порівняно з першим раундом, під час калібрування мір електричного опору для всіх номіналів, однак для отримання меншої невизначеності вимірювань їй необхідно застосувати більш точні методи вимірювань і робочі еталони.

Таблиця 2. Результати калібрування мір електричного опору
Table 2. Results of the calibration measures of electrical resistance

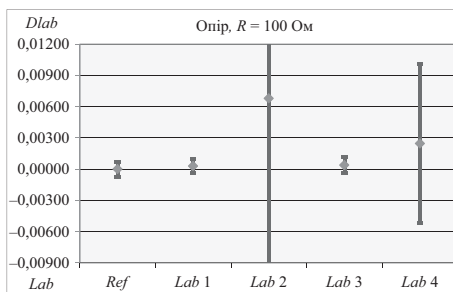
Лабораторія	Ref	Lab 1	Lab 2	Lab 3	Lab 4
Електричний опір 1 Ом					
R_x	1,000029	1,000022	1,001500	1,000024	1,000265
D_{lab}	0,000000	-0,000007	0,001471	-0,000005	0,000236
U_{lab}	0,000002	0,000002	0,027500	0,000009	0,007440
E_n		-1,51	0,05	-0,55	0,03
Електричний опір 10 Ом					
R_x	9,999420	9,999430	10,001600	9,999423	9,999806
D_{lab}	0,000000	0,000010	0,002180	0,000003	0,000386
U_{lab}	0,000037	0,000036	0,033500	0,000061	0,007583
E_n		0,12	0,07	0,03	0,05
Електричний опір 100 Ом					
R_x	99,99830	99,99860	100,00510	99,99869	100,00076
D_{lab}	0,00000	0,00030	0,00680	0,00039	0,00246
U_{lab}	0,00071	0,00070	0,05100	0,00079	0,00760
E_n		0,22	0,13	0,37	0,32



а

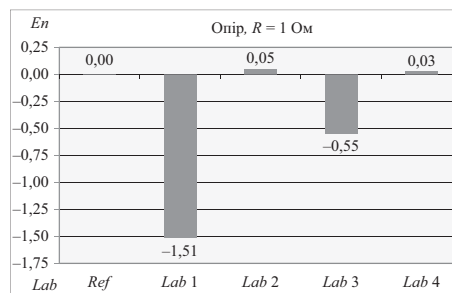


б

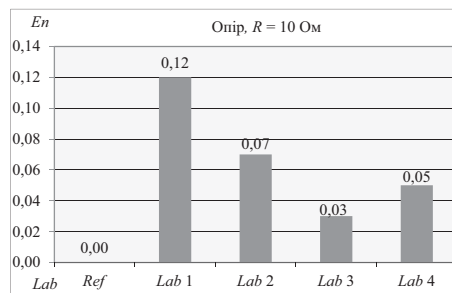


в

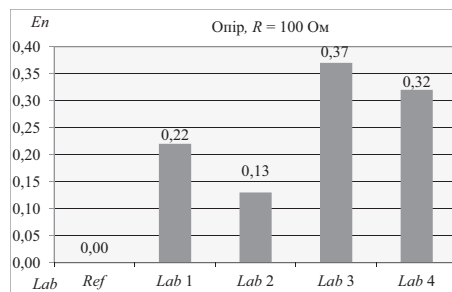
Рис. 2 Результати калібрування зразка порівняння лабораторіями-учасницями МІПР для електричного опору: а) 1 Ом; б) 10 Ом; в) 100 Ом
Fig. 2. Calibration results of sample comparison for participating laboratories of inter-laboratory comparison of results for electrical resistance: а) 1 Ом; б) 10 Ом; в) 100 Ом



а



б



в

Рис. 3. Значення показника E_n для лабораторій-учасниць МІПР для електричного опору: а) 1 Ом; б) 10 Ом; в) 100 Ом
Figure 3. Values of E_n -index for participating laboratories of inter-laboratory comparison of results for electrical resistance: а) 1 Ом; б) 10 Ом; в) 100 Ом

ВИСНОВКИ

У цілому, результати другого раунду МПР засвідчили достатній рівень компетентності калібрувальних лабораторій і підтвердили кваліфікацію лабораторій-учасниць під час виконання ними калібрування відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025, за деякими винятками.

Лабораторії *Lab 2*, *Lab 3* і *Lab 4* задовольняють встановленим вимогам для критерію E_n для всіх номіналів електричного опору, що підтверджує їх кваліфікацію під час виконання калібрування відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025. Однак рекомендовано лабораторіям *Lab 2* і *Lab 4* застосовувати більш точні методи калібрування зазначених мір електричного опору.

Результати калібрування лабораторії *Lab 1* задовольняють встановленим вимогам для критерію

E_n для номіналів опору у 10 і 100 Ом, однак не задовольняють вимогам цього критерію для номіналу 1 Ом. При цьому розширена невизначеність калібрування не відповідає результату вимірювання, тому цій лабораторії рекомендовано внести корективи до методики калібрування у частині обчислення необхідних поправок під час вимірювання електричного опору.

Порівняння результатів лабораторій *Lab 3* і *Lab 4*, які брали участь як у першому, так і другому раундах МПР, засвідчив задовільні результати для цих двох раундів. Однак цим лабораторіям рекомендовано референтною лабораторією для отримання меншої невизначеності вимірювань застосовувати більш точні методи вимірювань і робочі еталони.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT) [Текст]. — Київ: Держспоживстандарт України (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories [Text]. — К.: Derjspoivstandart of Ukraine) — 2007.
2. ДСТУ EN ISO/IEC 17043:2014 Оцінка відповідності. Загальні вимоги до перевірки кваліфікації лабораторій (EN ISO/IEC 17043:2010, IDT) [Текст]. — Київ: Мінекономрозвитку України (Conformity assessment. General requirements for testing laboratory qualifications [Text]. — К.: Ministry of economic development and consumer policy of Ukraine) — 2014.
3. ДСТУ ISO 13528:2014 Статистичні методи, що застосовуються при перевірці кваліфікації лабораторії шляхом міжлабораторних порівнянь (ISO 13528:2005, IDT) [Текст]. — Київ: Мінекономрозвитку України (Statistical methods for use in proficiency testing by inter-laboratory comparisons [Text]. — К.: Ministry of economic development and consumer policy of Ukraine) — 2014.
4. Величко О., Довгань В., Нікітенко Д., Брежицький Я. Міжлабораторні порівняння результатів калібрування мір електричного опору постійному струму // Метрологія та прилади. (Velychko O., Dovgan V., Nikitenko D., Brezhitskiy Y. Interlaboratory comparisons of calibration results of the measures of electrical resistance of direct current // Metrology and instruments). — 2018. — № 2. — С. 25—30. ✎

Отримано / received: 15.08.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л.В. Коломійцем (Україна).
Prof. L.V. Kolomiets, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.14-19

УДК 681.121.89.082.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ЗА УМОВ СПОТВОРЕНОГО ПОТОКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БАГАТОЯДЕРНИХ ФУНКЦІЙ SALAMI

Investigating the Ultrasonic Flowmeter Error in Conditions of Distorted Flow Using Multi-peaks Salami Functions



Є. Пістун, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології»,
e-mail: epistun@polynet.lviv.ua

В. Роман, кандидат технічних наук,
доцент кафедри,
e-mail: roman_vitaliy@ukr.net

Ф. Матіко, доктор технічних наук, професор кафедри,
e-mail: fedir.d.matiko@lpnu.ua
Національний університет «Львівська політехніка»,
Україна

Ye. Pistun, doctor of sciences, professor,
head of department of Automation
and computer-integrated technologies,
e-mail: epistun@polynet.lviv.ua

V. Roman, philosophy doctor,
associate professor of the department,
e-mail: roman_vitaliy@ukr.net

F. Matiko, doctor of sciences, professor of department,
e-mail: fedir.d.matiko@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University,
Ukraine

Досліджено додаткову похибку ультразвукових витратомірів, зумовлену спотворенням профілю швидкості потоку. Для відтворення спотвореного профілю швидкості потоку застосовано аналітичні формули дво- та багатоядерних функцій Salami. При цьому запропоновано визначити калібрувальний коефіцієнт ультразвукового витратоміра з використанням неспотвореної складової функцій Salami. За результатами досліджень визначено необхідну найменшу кількість хордових акустичних каналів ультразвукового витратоміра, яка дає можливість зменшити досліджувану похибку до встановлених стандартами меж навіть за умов наявності складних спотворень потоку, відтворених багатоядерними функціями Salami.

Paper is devoted to the problem of improving the accuracy of ultrasonic flowmeters installed in conditions that differ from their calibration conditions. The authors highlighted high sensitivity of ultrasonic flowmeters to distortions of flow structure and large additional error of flowmeters caused by flow distortions. The computer simulations using empirically-derived functions of distorted flow velocity of professor Salami are used to investigate the additional error of flowmeters. The analytical formulas of two- and mul-

ti-peaks Salami functions are used in this work to reproduce the distorted flow velocity profile. The authors proposed to determine the calibration factor of the ultrasonic flowmeter using the undistorted component of Salami functions. The values of the calibration factor for the number of acoustic channels from 1 to 6 were calculated using four numerical integration methods: Chebyshev (equidistant location of acoustic paths), Gauss, Gauss-Jacobi, OWICS method. This made it possible to realize the flowrate equation for multi-path ultrasonic flowmeters and to determine their additional error for different location of the acoustic paths. The average flow velocity along each path is calculated based on the flow velocity profile in the pipe cross section. Six two- and multi-peaks Salami functions of velocity are used to calculate the velocity profile of the distorted flow caused by typical local resistances. According to the research results the recommendations were developed for choosing the number of the acoustic paths of the ultrasonic flowmeters and for using the methods for determining the location coordinates of the acoustic paths. We determined the required minimum number of chordal acoustic channels of the ultrasonic flowmeter, which makes it possible to reduce the investigated error to defined limits, even in the presence of complex flow distortions reproduced by Salami multi-peaks functions.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, додаткова похибка, профіль швидкості потоку, функція Salami, акустичний канал, калібрувальний коефіцієнт.

Keywords: ultrasonic flowmeter, additional error, flow velocity profile, function Salami, acoustic path, calibration coefficient.

Завдяки своїм перевагам [1—2] ультразвукові витратоміри (УЗВ) набули широкого застосування для вимірювань витрати та кількості плинних середовищ. Попри це, УЗВ притаманні й недоліки, серед яких потрібно виділити високу чутливість до відхилення параметрів потоку під час експлуатації від умов їх калібрування;



Є. Пістун



В. Роман



Ф. Матіко

зокрема це стосується спотворень структури потоку (профілю швидкості). Цей недолік має значний вплив на похибку УЗВ [1—2]. Зменшення похибки вимірювання витрати спотворених потоків досягають такими способами [1]:

1) встановленням перед УЗВ прямолінійної ділянки вимірювального трубопроводу (ВТ) достатньої довжини;

2) застосуванням спеціальних пристроїв підготовки потоку (ППП) та пристроїв кондиціонування потоку перед УЗВ;

3) збільшенням кількості акустичних каналів (АК) УЗВ та схем їх просторового взаємного розташування; саме цей спосіб досліджено у цій роботі.

Застосування функцій швидкості *Salami* для вирішення задач ультразвукової витратометрії розглянуто в багатьох вітчизняних [6—8] та закордонних [9—12] наукових працях. Зокрема, в них на базі функцій *Salami* проведено аналітичні дослідження похибки та деяких характеристик УЗВ залежно від кількості, типу та розташування АК. У роботі [3], на прикладі УЗВ з хордовою схемою розташування АК, авторами досліджено третій спосіб зменшення похибки УЗВ; як моделі спотвореного потоку було застосовано одноядерні функції швидкості *Salami*. За результатами роботи встановлено, що для УЗВ, застосованих за таких умов, наявність чотирьох АК дає можливість зменшити похибку витратоміра до значень, що містяться в регламентованих чинним стандартом [1] межах.

Мета цієї роботи — продовжити розпочаті у [3] дослідження УЗВ. Як моделі спотворення структури потоку обрано дво- та багатоядерні функції швидкості *Salami* [4].

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВОЇ ПОХИБКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА

Ультразвуковий витратомір, у якому застосовано більше ніж один АК, називають багатоканальним. Залежно від схеми просторового розташування АК УЗВ поділяють на хордові, діаметральні або комбіновані. У цій роботі досліджено найбільш поширені — хордові УЗВ. Для обчислення об'ємної витрати (q_{USM}) у таких УЗВ застосовують рівняння [11]:

$$q_{USM} = \pi R^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} w(i) u_h(i) \right), \quad (1)$$

де R — внутрішній радіус ВТ або корпусу УЗВ; $x(i)$, $w(i)$ — координата розташування та ваговий коефіцієнт i -го АК; $u_h(i)$ — середня швидкість потоку вздовж i -го АК; N — кількість АК.

Згідно з [1], значення $w(i)$ можуть бути постійними або змінними. Для реалізації формули (1) необхідно обчислити параметри $x(i)$ та $w(i)$, а також значення середньої швидкості потоку $u_h(i)$ вздовж кожного хордового АК. Очевидно, що значення $x(i)$, $w(i)$, $u_h(i)$ залежатимуть від кількості каналів N . Як і в роботі [3], в цій роботі значення $x(i)$ УЗВ обчислені за такими методами [5, 8]:

1. Класичний метод на базі ЧМІ Гауса (Гауса-Лежандра, Гауса-Якобі за $\alpha = \beta = 0$).

2. Класичний метод на базі ЧМІ Чебишева (рівновіддалене розміщення АК).

3. Класичний метод на базі ЧМІ Гауса-Якобі (Гауса-Чебишева 2-го порядку). В закордонній літературі цей метод інколи називають методом *Westinghouse* [9].

4. Удосконалений метод *OWICS* (ЧМІ Гауса-Якобі $\alpha = \beta = 0,6$) [11].

Детальну методику розрахунку $x(i)$ та $w(i)$ на базі класичних та удосконалених методів із використанням ЧМІ наведено в [11, 13]. Значення $x(i)$ та $w(i)$, обчислені за методикою [13] для кількості АК $N = 1 \dots 6$ для зазначених вище методів, представлено у [3].

Значення середньої швидкості потоку $u_h(i)$ вздовж кожного хордового АК може бути визначено на основі профілю швидкості потоку в поперечному перерізі ВТ [8]. Як вказано у [3], для побудови профілю швидкості потоку пропонується застосувати емпірично отримані аналітичні функції розподілу швидкості спотвореного потоку в перерізі ВТ — функції швидкості *Salami*. Ці функції отримані за методикою, викладеною у [4]. Згідно з нею отримано набір функцій швидкості *Salami*, зокрема дво- та багатоядерних, що описують кінематичну структуру спотвореного потоку після комбінації найпоширеніших МО типу «90° коліно» — групи колін U й S -конфігурації та складніших джерел спотворення потоку (кругових теплообмінників — *circular heat exchangers*; спарених каналів — *chimney stacks*; інших комбінацій МО) [4].

Обчислення середньої швидкості потоку вздовж i -го хордового АК УЗВ у цій роботі виконуємо за формулою [8]:

$$u_h(i) = \frac{1}{T_h(i)} \left[\int_0^{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} u_{SAL} \left(\sqrt{x(i)^2 + l^2}, \alpha + \arctg \frac{l}{x(i)} \right) dl + \int_0^{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} u_{SAL} \left(\sqrt{x(i)^2 + l^2}, \alpha - \arctg \frac{l}{x(i)} \right) dl \right], \quad (2)$$

де u_{SAL} — одна із функцій швидкості *Salami*, яка дає можливість обчислити швидкість потоку в довільній

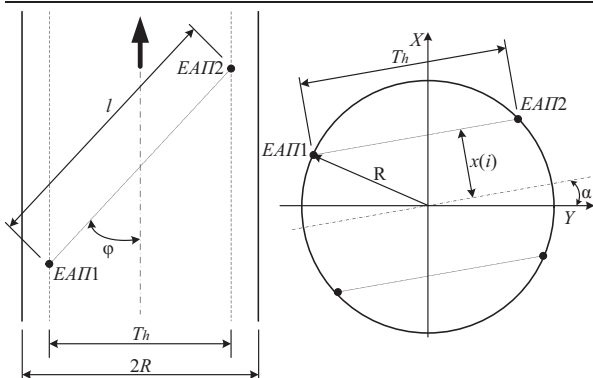


Рис.1. Спрощена схема розташування хордових АК УЗВ
Fig.1. Simplified scheme location chordal AP USM

точці перерізу ВТ; $T_h(i) = 2\sqrt{R^2 - x(i)^2}$ — ширина площини, в якій проходить i -тий хордовий АК УЗВ; l — довжина хордового АК УЗВ; α — кут повороту площини, в якій проходить хордовий АК УЗВ відносно горизонтальної площини (рис. 1). У цій роботі кут $\alpha = 0^\circ$, оскільки це найбільш типове розташування хордових УЗВ [1, 6]. Формула (2) отримана на основі схеми розташування АК УЗВ, зображеної на рис.1.

Результати обчислення витрати за рівнянням (1) на основі значень $x(i)$ й $w(i)$ та на основі середніх значень швидкості за кожним АК, отриманих за формулою (2), відрізнятимуться від витрати, обчисленої прямим інтегруванням профілю швидкості неспотвореного потоку. Це спричинено похибкою інтегрування профілю швидкості за обмеженим числом точок (швидкостей потоку за кожним АК). Під час виготовлення УЗВ цей ефект усувається шляхом отримання калібрувальної кривої — залежності калібрувального коефіцієнта від витрати (або числа Рейнольдса) [3]. У попередній статті [3] авторами запропоновано визначати калібрувальний коефіцієнт k_{cal} за формулою:

$$k_{cal} = \frac{q}{q_{USM}} = \frac{2\pi \cdot \int_0^1 (r \cdot u_{sym}) dr}{\pi R^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} w(i) u_h(i) \right)}, \quad (3)$$

де q — точне значення об'ємної витрати, отримане прямим інтегруванням профілю швидкості неспотвореного потоку; u_{sym} — симетрична, неспотворена складова функції *Salami* у виді, тотожному аналітичній формулі степеневому закону розподілу швидкості [4].

Із урахуванням калібрувального коефіцієнта рівняння (1) приймає вид:

$$q_{USM} = k_{cal} \pi R^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} w(i) u_h(i) \right) \quad (4)$$

Отже, застосування рівняння (4), для обчислення витрати УЗВ на спотвореному потоці, дозволяє оцінити додаткову похибку, яка власне виникає внаслідок спотворення швидкості потоку. Додаткову відносну похибку вимірювання витрати, зумовлену цим спотворенням структури потоку, обчислено за формулою:

$$\delta_A = \frac{q_{USM} - q_{SAL}}{q_{SAL}} \cdot 100, \quad (5)$$

де q_{SAL} — точне значення об'ємної витрати спотвореного потоку, профіль швидкості якого описаний функціями *Salami*. Для розрахунку значень q_{SAL} використовується формула виду:

$$q_{SAL} = \int_0^{2\pi} \left(\int_0^1 r \cdot u_{SAL}(r, \theta) dr \right) d\theta. \quad (6)$$

Для досліджень похибки δ_A у цій роботі використано шість функцій швидкості *Salami*: чотири двоядерні (P05, P07, P10, P16) та дві багатоядерні (P20 та P22) [4, 5]. Аналітичні вирази цих функцій та безрозмірні значення витрати q_{SAL} обчислені за формулою (6) для кожної з функцій, наведено у таблиці 1.

Дослідження похибки δ_A виконано за такою методикою:

- 1) підставляючи розраховані значення $x(i)$ та $w(i)$ [3] у рівняння (1) та (2), отримано рівняння витрати УЗВ для фіксованого значення кількості АК (N);
- 2) для отриманого за п.1 рівняння обчислено за формулою (3) значення k_{cal} , що відповідає умовам неспотвореного потоку; за розрахунку k_{cal} необхідно врахувати: а) тип функції швидкості *Salami*, який впливає на значення величини n (для функцій P5, P7 та P10 n дорівнює 9, для функції P16 n дорівнює 7, для функції P20 n дорівнює 4 [4, 5]);

Таблиця 1. Багатоядерні функції швидкості *Salami*

Table 1. *Salami* one-peak functions of speed

Функція	Аналітичний вираз функції	q_{SAL}
P05	$u = (1-r)^{1/9} + 0,6813r(1-r)^{1/9} e^{-0,10} (\sin \theta)^2$	3,1130
P07	$u = (1-r)^{1/9} + (1/\pi^2)(1-r)^{1/4} \theta(1 - (\cos \theta)^2)$	2,8974
P10	$u = (1-r)^{1/9} + (2/\pi^2)r(1-r)^{1/4} (2\pi - \theta)(\sin \theta)^2$	2,9925
P16	$u = (1-r)^{1/7} + e^{0,10} r(1-r)^{1/9} e^{-0,20} (\sin \theta)^2$	2,8237
P20	$u = (1-r)^{1/4} + (e^{0,15\pi}/2)r(1-r)^{1/9} e^{-0,30} \sin^2 5\theta$	2,544
P22	$u = (1-r)^{1/7} + (1/6\pi^2)r(1-r)^{1/9} (2\pi - \theta)^2 \theta \sin 3\theta$	2,572

Таблиця 2. Значення калібрувального коефіцієнта k_{cal}
 Table 2. Value of the calibration coefficient k_{cal}

n	Метод	k_{cal}					
		N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	N = 6
4	Чебишева	0,8889	0,9902	0,9868	0,9925	0,9948	0,9992
	Гауса	0,8889	0,9902	0,9882	0,9994	0,9975	0,9999
	Гауса-Якобі	0,8889	0,9922	0,9911	0,9991	0,9978	0,9998
	OWICS	0,8889	0,9972	0,9932	0,9998	0,9982	1,0000
7	Чебишева	0,9333	0,9752	0,9813	0,9908	0,9932	0,9970
	Гауса	0,9333	0,9752	0,9879	0,9970	0,9973	0,9991
	Гауса-Якобі	0,9333	0,9928	0,9942	0,9988	0,9985	0,9996
	OWICS	0,9333	0,9910	0,9970	1,0001	0,9992	1,0000
9	Чебишева	0,9474	0,9716	0,9799	0,9902	0,9927	0,9964
	Гауса	0,9474	0,9716	0,9877	0,9963	0,9972	0,9989
	Гауса-Якобі	0,9474	0,9938	0,9953	0,9989	0,9988	0,9997
	OWICS	0,9474	1,0016	0,9984	1,0003	0,9996	1,0001

б) кількість АК УЗВ; в) значення $x(i)$ та $w(i)$ АК УЗВ, отримані із застосуванням усіх чотирьох методів інтегрування [3, 13]. Результат розрахунку k_{cal} наведено у таблиці 2.

3) для функції *Salami*, яку вибрано для дослідження (таблиця 1), обчислено значення швидкості u_h за формулою (2);

4) за формулою (4) обчислено значення q_{USM} УЗВ для відповідних умов потоку (для відповідної функції *Salami*);

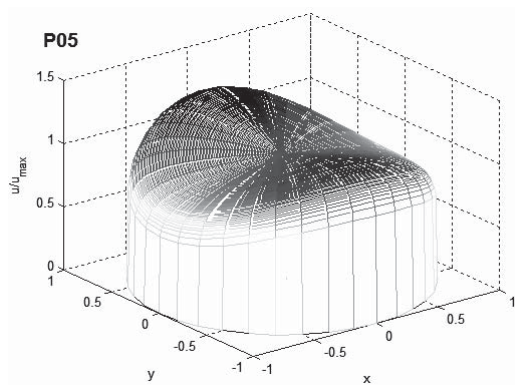
5) за формулою (5) та даними із таблиці 1 обчислено значення δ_A УЗВ із різною кількістю АК та різ-

ним їх розташуванням (для різних методів обчислення $x(i)$ та $w(i)$);

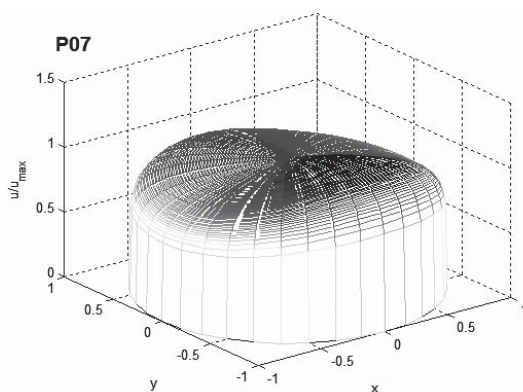
6) на основі залежності $\delta_A = f(N)$ зроблено висновки та надано рекомендації щодо потрібної кількості АК; за умов визначення мінімальної кількості АК УЗВ прийнято вимогу ISO 17089-1 [1, пп.5.9.3.2] стосовно того, що максимальна додаткова похибка, зумовлена спотворенням структури потоку, не повинна перевищувати 0,3 %:

$$|\delta_{A(N)}^{\max} - \delta_{A(N+1)}^{\max}| < 0,3 \%. \quad (7)$$

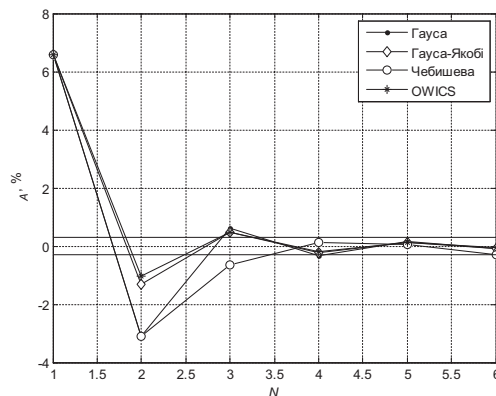
Результати дослідження похибки δ_A наведено на рис. 2.



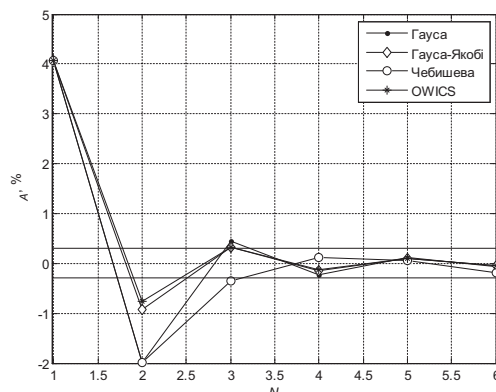
a)



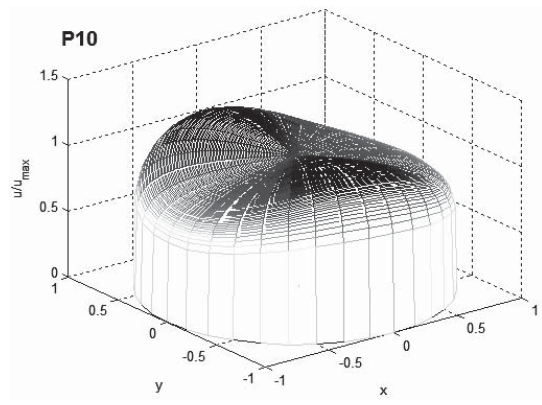
c)



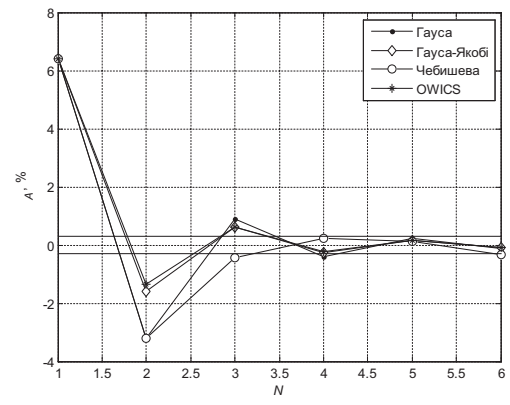
b)



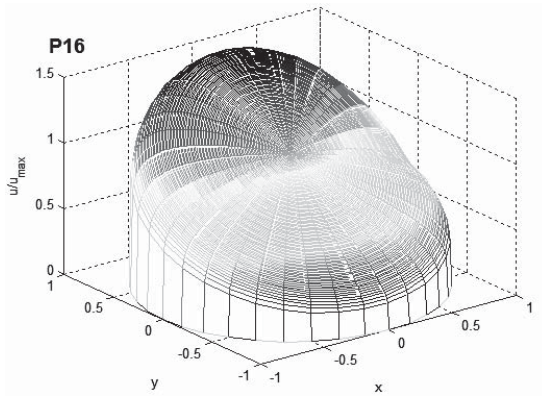
d)



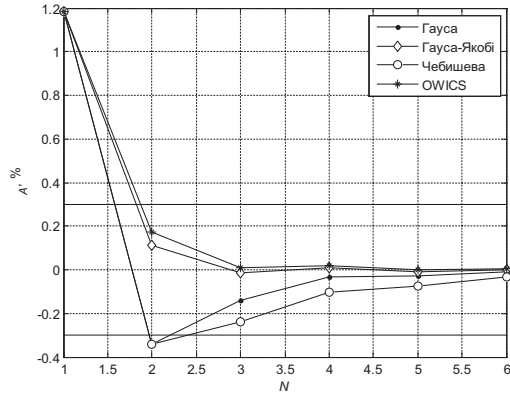
e)



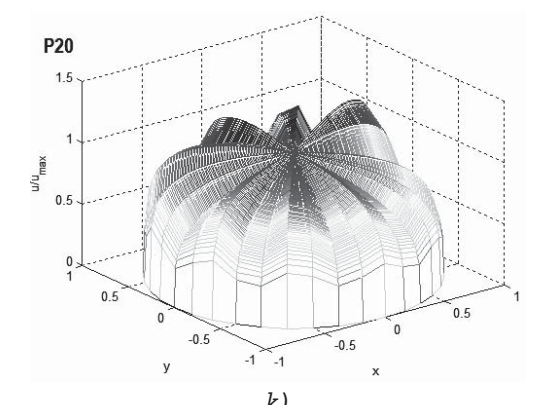
f)



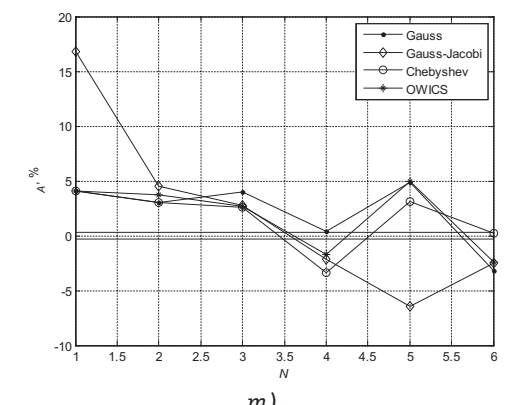
g)



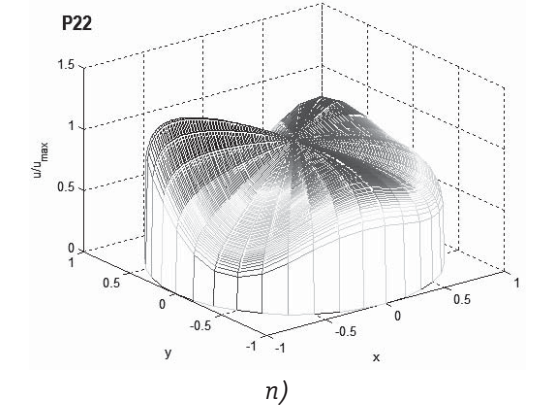
h)



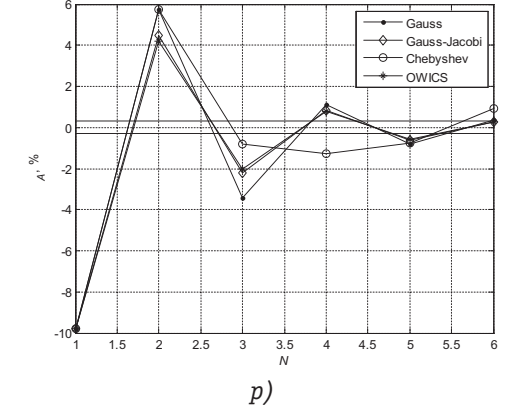
k)



m)



n)



p)

Рис. 2. Результати дослідження похибки δ_A для багатоядерних функцій Salami: a), c), e), g), k), n) 3D профілі відповідних функцій; b), d), f), h), m), p) залежності похибки δ_A від N
 Fig.2. Research results of additional error δ_A for multipeaks Salami functions: a), c), e), g), k), n) 3D profiles corresponding functions; b), d), f), h), m), p) dependence δ_A error from N

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Основними факторами впливу на похибку δ_A є: тип спотворень потоку, кількість АК УЗВ та їх розташування. Збільшення кількості АК та їх оптимальне просторове розташування дозволяють зменшити вплив спотворень профілю швидкості потоку. Проте у випадку дуже складних спотворень потоку (багатоядерних профілів) така рекомендація не є достатньо дієвою і вимагає або встановлення перед УЗВ прямолінійної ділянки ВТ достатньої довжини, або застосовувати пристрої підготовки потоку.

2. Якщо профіль потоку описуватиметься дво-ядерною функцією *Salami*, то тільки УЗВ із кількістю АК $N \geq 4$ задовольнятиме вимогу (7). Також, для таких УЗВ, вибір методу розрахунку $x(i)$ та $w(i)$ не є визначальним. Окремо треба наголосити, що збільшення кількості АК УЗВ, до більшої за 4, є у цьому випадку недоцільним (значення $\delta_{A(N > 4)} - \delta_{A(N = 4)} \approx \pm 0,1 \%$).

Однак для потоків, профіль яких відтворено багатоядерними функціями, умова (7) може бути виконана тільки для витратомірів із кількістю АК $N > 6$.

3. За кількості АК $N < 4$ вибір методу розрахунку $x(i)$ та $w(i)$ є важливим. Порівняно із результатами, отриманими для одноядерних функцій *Salami* [3], жоден із застосованих методів інтегрування не дав результатів, які дозволили б виконати вимогу (7). Для спотворень, змодельованих одноядерними функціями, вимога (7) була виконана за застосування методів інтегрування Гауса-Якобі та *OWICS*. Цей факт указує на те, що розроблення нових або вдосконалення старих методів розрахунку координат розташування АК $x(i)$ та їх ваг $w(i)$ є досі актуальним.

Застосування результатів подібних досліджень дають можливість удосконалити конструкцію УЗВ на стадії їх проектування, цим самим дозволяючи зменшити додаткову похибку вимірювання витрати УЗВ під час їх застосування за умов складних спотворень структури потоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
- GERG Project on ultrasonic gas flow meters, Phase II : technical monograph TM 11 / edit by P. Lunde, K.-E. Froyso, M. Vestheim. — Brussels : Groupe Europeen de Recherches Gazieres (GERG), 2000. — 110 pages.
- Матіко Ф.Д. (2017) Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку із застосуванням одноядерних функцій *Salami* / Ф.Д. Матіко, В.І. Роман // Метрологія та прилади (Matiko F.D. (2017) Investigation of ultrasonic flowmeter error in conditions of distortion of flow structure using one peak functions *Salami* / F.D. Matiko, V.I. Roman // Metrology and instruments). — № 3. — С/Р. 36—43. (Ukrainian).
- Salami, L.A. (1984). Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes. *Trans. Inst. Meas. Control*, 6, 197–206.
- Moore, P.L., Brown, G.J., and Stimpson, B.P. (2000). Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology. *Meas. Sci. Technol.*, 11, 1802–1811.
- Дорожовець М.М. (2004) Теоретичний аналіз просторового розподілу швидкості руху рідини за допомогою функцій *Саламі* для багатоканального ультразвукового витратоміра / М.М. Дорожовець, А.В. Семенистий // Вісник НУ«ЛП»: Автоматика, вимірювання та керування (Dorozhovets M.M. (2004) Theoretical analysis of the spatial distribution of the fluid velocity using functions *Salami* for multi-path ultrasonic flowmeter / M.M. Dorozhovets, A.V. Semenyisty // Bulletin of LPNU : Automation, measurement and control). — № 500. — С/Р. 131—134. (Ukrainian).
- Коробко І.В. (2013) Оцінка асиметрії потоку рідини при вимірюванні її витрати та кількості / І.В. Коробко, Я.В. Волинська // Вісник НТУУ«КПІ»: Серія «Приладобудування» (Korobko I.V. (2013) Assessment of fluid flow asymmetry in the measurement of flow rate and volume / I.V. Korobko, Ya.V. Volynska // Bulletin of NTUU«KPI»: Series of «Instrument engineering»). — № 45. — С/Р. 91—98. (Ukrainian).
- Маслобоев Ю.П. (2002) Характеризация возмущенных потоков на основе данных ультразвуковых измерений с использованием набора базисных функций *Салами* / Ю.П. Маслобоев, С.В. Ручкин, М.Н. Рычагов // Труды Нижегородской акустической научной сессии : ННГУ (Masloboev Ju.P. (2002) Characterization of perturbed streams based on ultrasonic measurements using a set of basis functions *Salami* / Ju.P. Masloboev, S.V. Ruchkin, M.N. Rychagov // Proceedings of the Nizhny Novgorod acoustic scientific session: UNN). — С/Р. 388—390. (Russian).
- Zanker, K.J. (1999, 25-28 October). The effects of Reynolds number, wall roughness, and profile asymmetry on single- and multi-path ultrasonic meters. Paper presented at the Proceedings of XVII International North Sea Flow Measurement Workshop, Oslo, Norway, 117—129.
- Dandan Zheng, Dan Zhao, and Jianqiang Mei. (2015). Improved numerical integration method for flowrate of ultrasonic flowmeter based on Gauss quadrature for non-ideal flow fields. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 28—35.
- Tresch, T., Gruber, P., & Staubli, T. (2006, July 30 — August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA.
- Duffell, C.J., Brown, G.J., Barton, N.A., and Stimpson, B.P. (2003, 25-28 March). Using optimization algorithms and CFD to improve performance of ultrasonic flowmeters. Paper presented at the Proceedings of II International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Роман В.І. (2014) Визначення вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів / В.І. Роман, Ф.Д. Матіко // Метрологія та прилади (Roman V.I. (2014) Definition of weighting coefficients of acoustic channels for ultrasonic flowmeters / V.I. Roman, F.D. Matiko // Metrology and instruments). — № 3(47). — С/Р. 11—20. (Ukrainian).

Отримано / received: 12.10.2018.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. Л.В. Лісовим (Україна).

D. Sc. (Techn.) L.V. Lisovy, Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.20-26

УДК 677.016.41

АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНИХ ТА КОЛІРНИХ ВЕЛИЧИН

Analysis of the Relationship Between Spectral and Color Uncertainty



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

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

Запропоновано підхід приблизної оцінки зв'язку невизначеностей спектральних і колірних вимірювань. Заснований він на заміні всієї різноманітності спектрів простими моделями: постійної за всіма довжинами хвиль величини, яскраво вираженим піком, різким зменшенням та різким зростанням. Для розрахунків застосовано метод Монте-Карло. До модельних спектрів на кожній довжині хвиль вносилися малі спотворення, розраховувалося стандартне відхилення цих спотворень, після чого проводилися розрахунки координат кольоровості в системі (x, y, Y) . Величина Y , як така, що має відношення до світлових вимірювань, надалі не аналізувалася. Як міра невизначеності вимірювань кольору використовувалося стандартне відхилення відстаней між координатами кольоровості початкового спектра та координатами кольоровості спотворених спектрів у просторі (x, y) . Відношення цих стандартних відхилень спектральних та колірних величин уважалося зв'язком невизначеностей спектральних і колірних вимірювань. Аналізувався вплив невизначеностей спектральних вимірювань, вплив спектральної ширини модельних спектрів у виді піка, різкого зменшення й різкого зростання на осі довжин хвиль. Діапазони відповідних величин обрано з урахуванням діючих документів і найбільш поширених спектрів. Розглядався вплив обраного стандартного освітлювача: всі розрахунки проведено як для джерела типу А, так і для джерела D65. Результати розрахунків, які подано у виді графіків, дозволяють до початку вимірювань приблизно визначити необхідний рівень точності спектральної апаратури, для того, щоби забезпечити необхідну невизначеність вимірювань кольоровості. Проведено аналіз отриманих результатів.

An approach is proposed for an approximate estimate of the relation between the uncertainties of spectral and color measurements. The approach is based on replacing the entire diversity of the spectra with simple models: a constant over all wavelengths, a pronounced peak, a sharp decrease and a sharp increase. The Monte-Carlo method was used for calculations. Small distortions were introduced to the model spectra at each wavelength, the standard deviation of these distortions was calculated, after which the chromaticity coordinates were calculated in the system (x, y, Y) . The value of Y , as related to light measurements, was not further analyzed. The standard deviation of the distances between the chromaticity coordinates of the initial spectrum and the chromaticity coordinates of the distorted spectra in space (x, y) was used as a measure of the uncertainty of color measurements. The ratio of these standard deviations was considered to be a link between the uncertainties of the spectral and color measurements. The influence of the uncertainties of the spectral measurements, the effect of the spectral width of the model spectra in the form of a peak, a sharp decrease and a sharp increase on the axis of the wavelengths were analyzed. The ranges of the corresponding values are chosen taking into account the valid documents and the most common spectra. The influence of a standard illuminator selected was considered: all calculations were carried out for both type A and D65 sources. The results of the calculations are provided in the form of graphs, which allow one to approximately determine the required level of accuracy of the spectral equipment before the measurements, in order to provide the necessary uncertainty of chromaticity measurements. The analysis of the results obtained.

Ключові слова: невизначеність, вимірювання, спектральні та колірні величини, якість, методи.
Keyword: uncertainty, measurements, spectral and color values, quality, methods.

Велика частина інформації сприймається людиною завдяки зору, зокрема, завдяки здатності розрізняти кольори. Спроможність реєструвати колірні відмінності важлива для забезпечення, для контролю якості харчових продуктів, текстильних виробів тощо. Питання відповідності відмінностей зорового враження та відмінностей координат кольору пов'язано з функціонуванням людського ока й розглядалося неодноразово, починаючи з [1], і, наприклад, нещодавно в [2]. Відповідність вимірюваних координат кольору зразка координатам кольору еталонного зразка забезпечується засобами колориметрії. Колориметрія, зокрема, визначення координат кольору,



заснована на спектральних вимірюваннях. Точність колірних вимірювань пов'язана з точністю спектральних вимірювань. За результатами спектральних вимірювань можна розрахувати координати кольору. Цей зв'язок достатньо складний, формули громіздкі й кількоетапні. За координатами кольору розрахувати спектральні характеристики неможливо, оскільки один і той же колір можна отримати за допомогою множини різних спектрів. Проте, якщо необхідно забезпечити задану точність визначення координат кольору, то потрібно заздалегідь знати вимоги до точності спектральних вимірювань. Спроба визначення зв'язку відмінностей зорового враження і відмінностей у координатах кольору та кольоровості раніш була здійснена у [3]. Ця робота є спробою встановити простий приблизний взаємозв'язок невизначеності спектральних вимірювань і невизначеності вимірювань кольору. Це актуальне завдання, яке почали вирішувати більше ніж за півстоліття тому [4]. Для цього застосовуються різноманітні методи, наприклад, у [5] — матричний підхід. Основна трудність полягає в тому, що зв'язок залежить від конкретного виду спектра. З урахуванням того, що однакові кольори можуть бути отримані за допомогою різних спектрів, і враховуючи різноманітність наявних кольорів, завдання є достатньо складним. Громіздкі формули, що зв'язують спектральні та колірні характеристики, ускладнюють ситуацію.

МЕТОД

Пропонується підхід, за якого вся різноманітність спектрів замінюється спрощеними моделями спектральних залежностей. Моделі характеризуються малим числом параметрів. Для кожного із набору параметрів методом математичного моделювання досліджується залежність невизначеності координат кольору від невизначеності спектральних вимірювань. Невизначеності спектральних вимірювань характеризуються одним числом. Обирається величина, яка дозволяє характеризувати невизначеності всіх координат кольору одним числом. Результати розрахунку систематизуються, і на цій основі подається лінійний зв'язок невизначеностей координат кольору від невизначеностей спектральних вимірювань. Наявність лінійної залежності невизначеності кінцевого результату від невизначеності чинника, що впливає, є загальним положенням під час оцінювання невизначеностей. Оскільки обирається лінійна залежність, то стає можливим оцінити необхідну невизначеність спектральних вимірювань для отримання необхідної невизначеності вимірювання координат кольору.

ПРИПУЩЕННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ

Для встановлення зв'язку невизначеностей координат кольору та невизначеностей спектральних вимірювань необхідно вирішити декілька проблем. Перша зумовлена різноманітністю колірних просторів, що використовуються. Існує множина колірних просторів; для вирішення поставленого завдання необхідно обрати одну. В рамках цієї роботи використовуватиметься система x, y, Y . Це зумовлено тим, що значна частина документів, що регламентують вимоги до кольору, використовує координати кольоровості x, y . Окремо координати кольоровості не дають повного уявлення відносно кольору, але величина Y з деякими обмеженнями може вважатися не колірною, а світловою характеристикою. Отже, її можна винести за межі розгляду в цій роботі, тобто уникнути використання тримірних величин без втрати інформації та використовувати двомірні величини.

Відповідно до [6] координати кольору прозорих зразків, зразків, що відбивають, та самосвітних зразків обчислюються за допомогою однакових формул. Далі під спектральними характеристиками маються на увазі: спектральний коефіцієнт пропускання для прозорих зразків; спектральний коефіцієнт відбиття для зразків, що відбивають; нормоване відношення спектральної характеристики самосвітних зразків (наприклад, спектральної сили світла або спектральної яскравості), поділене на табульовану характеристику стандартного джерела. У всіх цих випадках спектральні коефіцієнти приймають значення між нулем і одиницею. Тому далі не робитиметься відмінності між цими зразками. Різноманітність характеристик коефіцієнта відбиття також детально описана у [7]. Однозначно визначені параметри освітлення і відбиття для будь-якого зразка дозволяють однозначно визначити спектр. Наявність двох типів спостерігачів 1931 і 1964 років для приблизних розрахунків не є значною перешкодою внаслідок їх малої відмінності. Використання декількох типів спектрів стандартних джерел призводить до помітних відмінностей у координатах кольоровості, тому далі використовуватимуться тільки два: джерело типу A , як найбільш поширене і таке, що легко реалізується практично; а також джерело типу D_{65} , яке зараз найчастіше використовується.

Діапазон таких невизначеностей для спектральних вимірювань був уточнений за допомогою нормативних документів [8, 9], тобто нестатистичними методами. Тому надалі вважається, що невизначеності мають рівномірний розподіл функції ймовірності.

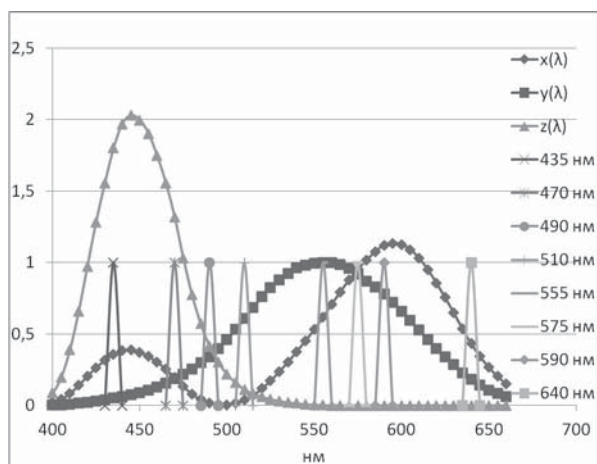


Рис. 1. Функції питомих координат кривих складання кольорів $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ та обрані для аналізу довжини хвиль спектрів, що аналізувалися

Fig. 1. Functions of the specific coordinates of the chromaticity curves $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ and selected for analyzing the wavelengths of the spectra analyzed

Основне утруднення полягає в різноманітності спектрів. У рамках цієї роботи всю різноманітність спектрів пропонується звести до декількох простих видів спектральної залежності, а саме: постійної величини, вираженого піка, різкого зменшення і різкого зростання. Інформація стосовно того, наскільки широкий пік і наскільки різке зменшення або зростання, була отримана із [10, 11]. Ширина питомих координат кривих складання кольорів $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, які використовуються для обчислення координат кольору, міститься приблизно в інтервалі від 50 до 100 нм. Ураховувалися довідкові дані щодо спектрального складу випромінювання умовно монохроматичних світлодіодів. Якщо виключити найбільш різкі зміни, характерні для стекел КС, ОС і одного виду ПС, то є логічним обмежитися характерними діапазонами змін (ширини піка, області різкого зростання або різкого зниження) від 25 до 100 нм.

Усі розрахунки координат кольору і координат кольоровості виконувалися з кроком 5 нм. Вибір найцікавіших ділянок спектра, де розміщувалися піки і ділянки різкого збільшення або зниження, зроблено на основі аналізу характерних точок поведінки питомих координат кривих складання кольорів $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ (рис. 1). Довжина хвилі 435 нм обрана на зростаючих залежностях функцій $x(\lambda)$ і $z(\lambda)$. Довжина хвилі 470 нм — це рівні $y(\lambda)$ і $x(\lambda)$ з похідними різного знаку, 490 нм — це рівні $z(\lambda)$ і $y(\lambda)$ з похідними різного знаку. Довжина хвилі 510 нм — це малі величини $x(\lambda)$ і $z(\lambda)$ порівняно з $y(\lambda)$. Довжина хвилі 555 нм — це максимум $y(\lambda)$, 575 нм — це рівні $x(\lambda)$ і $y(\lambda)$ з похідними різного знаку. Довжина хвилі 590 нм — це макси-

мум $x(\lambda)$; 640 нм — це спадаючі $x(\lambda)$ і $y(\lambda)$ з малим $z(\lambda)$. Такий вибір дозволяє характеризувати всю видиму область усього вісьмома точками на осі довжин хвиль та не отримувати несподіванок.

Розрахунки невизначеностей виконувалися за методом Монте-Карло. Для кожного спектра, що аналізується, на кожній довжині хвилі (від 380 до 780 нм з кроком 5 нм) проводився розрахунок координат кольоровості (x_0, y_0) . Після цього до спектра вносилися випадкова добавка $noise_i$ на кожній довжині хвилі (від 380 до 780 нм з кроком 5 нм). Для генерації випадкової добавки $noise_i$ використовувалася стандартна функція Excel з приблизно рівномірним розподілом імовірності. Розраховувалося середнє значення внесених добавок та їх стандартне відхилення $u_{\text{спектр}}$. Стандартне відхилення добавок уважалося мірою невизначеності спектральних вимірювань, тобто розглядалася не відносна, а абсолютна невизначеність спектральних вимірювань. Розраховувалися координати кольоровості (x_i, y_i) з урахуванням цих випадкових добавок. Процедура повторювалася 100 разів, тобто визначалася хмара розсіяння координат кольоровості (x_i, y_i) навколо (x_0, y_0) . Визначалося стандартне відхилення координат (x, y) , розраховане, відповідно до Δu_{ct} , Δy_{ct} , максимальне відхилення розрахованих координат (x_i, y_i) від (x_0, y_0) $\Delta x = (x_{\text{макс}} - x_0)$ та $\Delta y = (y_{\text{макс}} - y_0)$ відповідно; Δr — середньоквадратичне відхилення величин Δr_i розрахованих координат (x_i, y_i) від (x_0, y_0) за формулою $\Delta r_i = ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2)^{1/2}$.

Характерний вид результатів розрахунків у виді графіка подано на рис. 2.

За всіх подальших розрахунків контролювалися величини Δr_i . З'ясувалося, що для всіх використаних

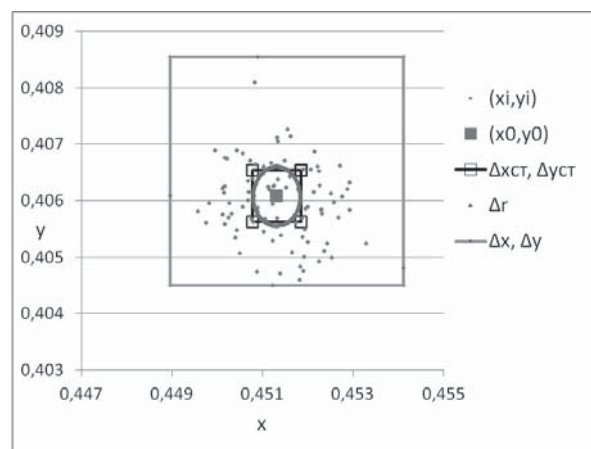


Рис. 2. Характерний вид результатів розрахунків (x_i, y_i) , (x_0, y_0) , Δx_{ct} , Δy_{ct} , $\Delta x = (x_{\text{макс}} - x_0)$, $\Delta y = (y_{\text{макс}} - y_0)$ та Δr .

Fig. 2. A characteristic view of the results of calculations (x_i, y_i) , (x_0, y_0) , Δx_{ct} , Δy_{ct} , $\Delta x = (x_{\text{макс}} - x_0)$, $\Delta y = (y_{\text{макс}} - y_0)$ and Δr .

величин u_{noise} ці величини для кожного спектра зберігали постійність у межах статистичного розкиду. Тому для характеристики зв'язків невизначеності спектральних вимірювань та невизначеності координат кольору використовували тільки одну величину $\Delta r/u_{спектр}$.

РОЗРАХУНКИ

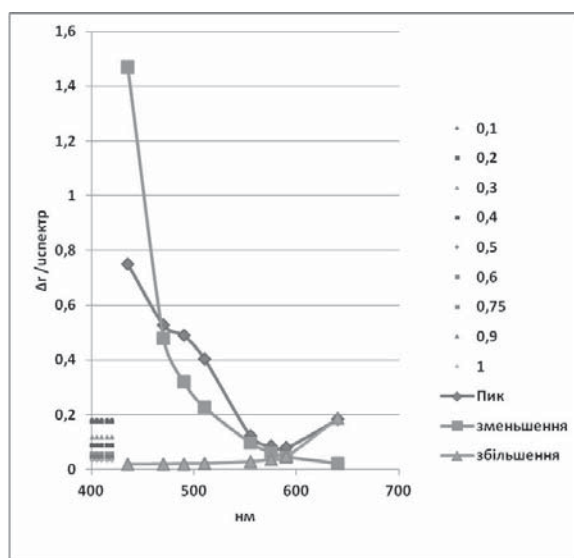
Першу серію розрахунків проведено для постійних за всім видимим спектром величин. Використовувався ряд постійних на всіх довжинах хвиль (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75; 0,9; 1). Проведено розрахунки співвідношення $\Delta r/u_{спектр}$ для неселективних спектрів за стандартних відхилень добавки $u_{спектр}$ від 0,001 до 0,015 для джерела типу А і стандартного джерела типу D_{65} .

Для всіх спектрів з постійними спектральними коефіцієнтами координати кольоровості однакової, відмінності у результатах розрахунків зумовлена тільки відмінністю в співвідношенні постійних спектральних коефіцієнтів і стандартного відхилення внесених добавок $u_{спектр}$. Проведено розрахунки для діапазону величини цієї відмінності від 7 до 630. Зрозуміло, що для малих величин спектральних величин (0,1) невизначеності найбільші, а для великих (1) найменші. Діапазон змін величини $\Delta r/u_{спектр}$

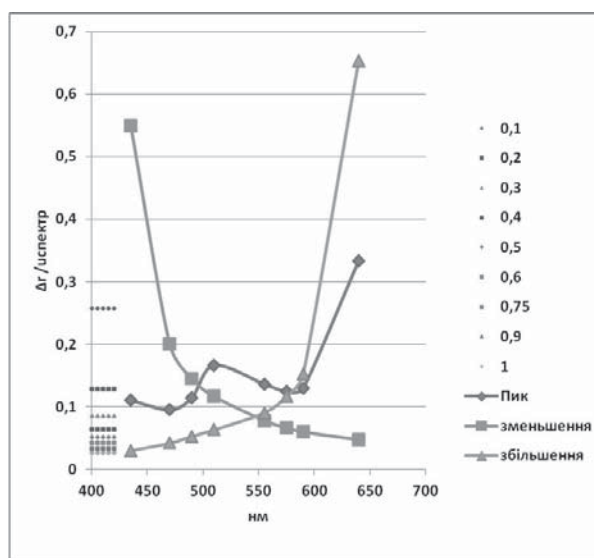
за результатами розрахунків від 0,031 до 0,21 для джерела типу А та від 0,24 до 0,27 для джерела типу D_{65} .

Подальші розрахунки виконувалися для раніше зазначених спектральних залежностей: постійної величини, вираженого піка, різкого зменшення і різкого зростання (const, gauss, erf, erfc). Послідовність розрахунків була однаковою у всіх зазначених випадках. Досліджувався вплив характерних діапазонів змін (ширини піка, області різкого зростання або різкого зниження) від 25 до 100 нм. Потім для одного діапазону (50 нм) досліджувалася залежність $\Delta r/u_{спектр}$ від $u_{спектр}$.

Спочатку було проведено розрахунок залежності $\Delta r/u_{спектр}$ від $u_{спектр}$ для піків з шириною від 25 до 100 нм з рівнем невизначеності спектральних вимірювань $u_{спектр} = 0,0023$ для стандартного джерела типу А (отримано результати в діапазоні від 0,027 до 0,73) та для стандартного джерела типу D_{65} (отримано результати в діапазоні 0,042 до 0,88). Найбільші величини спостерігалися для найвузжчих піків: для джерела типу А на довжинах хвиль 435, 490, 510 нм; для джерела типу D_{65} на довжинах хвиль 510 та 640 нм. Потім отримано результати розрахунків залежності $\Delta r/u_{спектр}$ від $u_{спектр}$ для піків з шириною 50 нм і рівнів невизначеності спектральних вимірювань $u_{спектр}$ від 0,001



а — стандартне джерело типу А



б — стандартне джерело типу D_{65}

Рис. 3. Результати розрахунку залежності $\Delta r/u_{спектр}$ від $u_{спектр}$ для нейтральних спектрів (подано зліва на початку шкали довжин хвиль) з постійними спектральними характеристиками із ряду (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75; 0,9), а також для рівнів невизначеності спектральних вимірювань $u_{спектр}$ в діапазоні від 0,1 до 1,5 % спектрів у виді піка, зменшення та збільшення з характерною шириною 50 нм для стандартного джерела типу А — а і для стандартного джерела типу D_{65} — б.

Fig. 3. Results of the calculation of the dependence of $\Delta r/u_{спектр}$ on the spectrum for neutral spectra (provided at the beginning of the scale of wavelengths) with constant spectral characteristics from a series (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75; 0,9), as well as for uncertainty levels of spectral measurements of the spectrum in the range from 0.1 to 1.5 % of spectra in the form of a peak, decrease and increase with a characteristic width of 50 nm for a standard source of type А — а and for a standard source of type D_{65} — б.

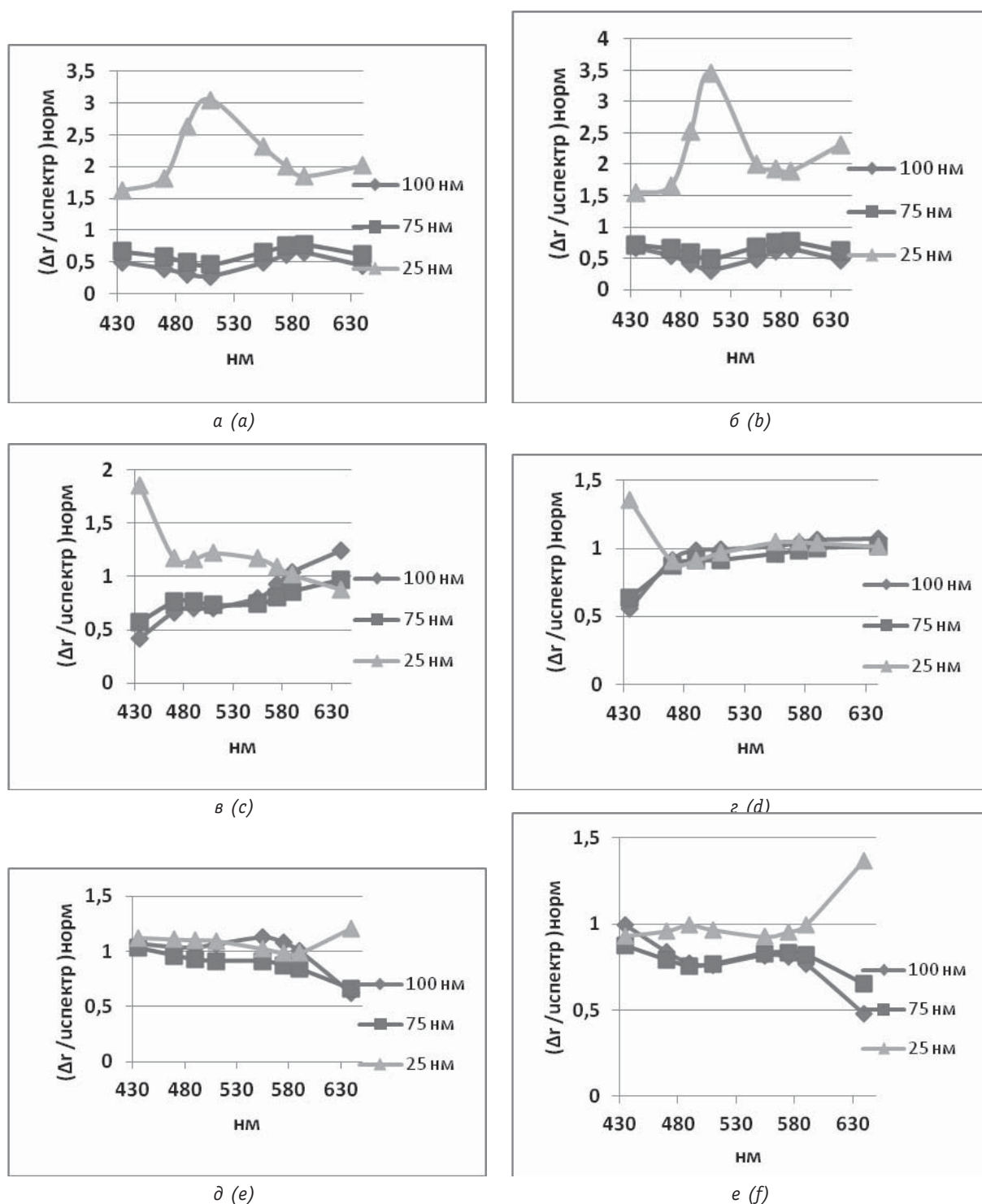


Рис. 4. Графіки значень нормованого коефіцієнта зв'язку $(\Delta r / u_{\text{спектр}})_{\text{норм}}$ для джерела типу А для ширин 100, 75 і 25 нм і джерела типу D_{65} залежно від довжини хвилі: а — пік для джерела типу А, б — пік для джерела типу D_{65} , в — зниження для джерела типу А, г — зниження для джерела типу D_{65} , д — збільшення для джерела типу А, е — збільшення для джерела типу D_{65} .

Fig. 4. Characteristics of the coupling coefficient values $(\Delta r / u_{\text{спектр}})_{\text{норм}}$ for the Type A source for the width of 100, 75 and 25 nm, and the D_{65} source, depending on the wavelength: a is the peak for the source of type A, b is the peak for the source of type D_{65} , c is the decrease for the source of type A, d is the decrease for the source of the type D_{65} , e is the increase for the source type A, f is the increase for the source D_{65} .

до 0,015 для стандартного джерела типу А (отримано результати в діапазоні від 0,036 до 0,48) та для стандартного джерела типу D_{65} (отримані результати в ді-

апазоні від 0,082 до 0,40). Найбільші величини спостерігалися для джерела типу А на довжині хвилі 435, для джерела типу D_{65} на довжині хвилі 640 нм.

Було з'ясовано істотну відмінність залежностей для джерела типу *A* і джерела типу *D₆₅* для ширини піка. Залежності від розміщення піка також значно відрізняються. Ці залежності не монотонні, не можна говорити, що вплив постійно зростає або убыває з довжиною хвилі.

Після цього проведено розрахунки залежності $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ від $u_{\text{спектр}}$ для спектрів у виді різкого зменшення з шириною від 25 до 100 нм з рівнем невизначеності спектральних вимірювань $u_{\text{спектр}} = 0,0023$ для стандартного джерела типу *A* (отримано результати в діапазоні від 0,019 до 1,99, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 435 нм) і для стандартного джерела типу *D₆₅* (отримано результати в діапазоні від 0,022 до 0,36, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 435 нм). Також проведено розрахунки залежності $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ від $u_{\text{спектр}}$ для піків з шириною 50 нм і рівнів невизначеності спектральних вимірювань $u_{\text{спектр}}$ від 0,001 до 0,015 для стандартного джерела типу *A* (отримано результати в діапазоні від 0,020 до 1,70, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 435 нм) і для стандартного джерела типу *D₆₅* (отримано результати в діапазоні від 0,025 до 0,37, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 435 нм).

Аналогічно проведено розрахунки залежності $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ від $u_{\text{спектр}}$ для спектрів у виді різкого збільшення з шириною від 25 до 100 нм для стандартного джерела типу *A* (отримано результати в діапазоні від 0,019 до 0,23, найбільші величини спостерігалися на довжинах хвиль 575 та 590 нм) і для стандартного джерела типу *D₆₅* (отримано результати в діапазоні від 0,028 до 0,95, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 640 нм) з рівнем невизначеності спектральних вимірювань $u_{\text{спектр}} = 0,0023$. Також проведено розрахунки залежності $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ від $u_{\text{спектр}}$ для піків з шириною 50 нм і рівнів невизначеності спектральних вимірювань $u_{\text{спектр}}$ від 0,001 до 0,015 для стандартного джерела типу *A* (отримано результати в діапазоні від 0,015 до 0,23, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 640 нм) і для стандартного джерела типу *D₆₅* (отримано результати в діапазоні від 0,025 до 0,77, найбільші величини спостерігалися на довжині хвилі 640 нм).

АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ

Основний висновок із отриманих результатів полягає в тому, що припущення щодо наявності лінійної залежності між невизначеностями спектральних вимірювань і невизначеностями координат кольоровості для всіх розглянутих спектральних залежностей справедливе. Це означає, що невизначенос-

ті спектральних вимірювань і невизначеності координат кольоровості для конкретного спектра в першому наближенні можуть бути пов'язані постійним коефіцієнтом, принаймні для розглянутих невизначеностей спектральних вимірювань від 0,1 до 1,5 %. Цей коефіцієнт залежить від типу обраного джерела стандартного випромінювання і довжини хвилі, на якій є характерна особливість спектра: пік, зменшення, збільшення, — а так само від спектральної ширини цієї особливості. Ураховуючи доведену постійність зв'язку між невизначеностями спектральних вимірювань і невизначеностями координат кольоровості можна об'єднати всі розглянуті залежності у загальну картину, подану на рис. 3.

Представлені на рис. 3 графіки розраховано для характерної ширини зміни спектра 50 нм. Для з'ясування загальної картини за допомогою виконаних розрахунків та графіків можна визначити наскільки сильно відрізнятимуться коефіцієнти зв'язку $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ для ширин 100, 75 і 25 нм від коефіцієнта зв'язку для 50 нм, тобто пронормувати результати розрахунку на цю величину, визначити $(\Delta r/u_{\text{спектр}})_{\text{норм}}$. Графіки результатів розрахунку $(\Delta r/u_{\text{спектр}})_{\text{норм}}$ подано на рис. 4.

Добре видно, що значення коефіцієнтів із урахованням випадкових відхилень, для ширин піків 100 і 75 нм приблизно в два рази менші, а для 25 нм приблизно в два рази більші, ніж для 50 нм. Отже, розрахунком підтверджено той загальновідомий факт, що для вимірювання вузькосмугових і швидкозмінних спектрів необхідна точніша апаратура. Зважаючи на те, що було поставлено завдання визначення приблизного зв'язку, то цих коефіцієнтів, у першому наближенні, можна не враховувати.

ВИСНОВКИ

Для розрахунків використовувалися модельні нормовані спектри, тобто максимальна величина спектра на будь-якій довжині хвилі не перевищувала одиниці. Максимальні величини координат кольоровості приблизно такої ж величини (0,73—0,83). Користуючись отриманими результатами, можна приблизно оцінити необхідну точність спектральних вимірювань. Використані середньоквадратичні величини Δr не збігаються з середньоквадратичними величинами $\Delta u_{\text{ст}}$ або $\Delta x_{\text{ст}}$. Їх відношення змінюється в діапазоні від 0,5 до 1, тобто в рамках поставленого завдання не дуже сильно. Використаний коефіцієнт $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ для прозорих зразків, для зразків, що відбивають, та самосвітних зразків є відношенням безрозмірної величини, пов'язаної з координатами кольоровості, до безрозмірної величини, що

характеризує спектр. Отже, для того, щоби приблизно оцінити необхідну невизначеність спектральних вимірювань потрібно необхідну величину невизначеності координат кольоровості поділити на величину $\Delta r/u_{\text{спектр}}$, що подано на рис. 3. Якщо вид спектра передбачено вірно, то можна очікувати, що оцінка необхідної невизначеності спектральних вимірювань є вірною з точністю до коефіцієнта порядку одиниці. Наприклад, для білих, приблизно неселективних зразків невизначеності спектральних вимірювань можуть бути у 45 (для джерела типу А) разів більшими, за необхідну невизначеність координат кольоровості. У цілому для стандартного джерела типу А вплив невизначеностей спектральних вимірювань спектрів, що змінюються, більший. Для залежностей спектрів, що зменшуються з довжиною хвилі, вимоги до невизначеностей спектральних вимірювань більші в області коротких довжин хвиль. На довжині хвилі 435 нм коефіцієнт зв'язку $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ найбільший, порядку одиниці. Для залеж-

ностей спектрів що збільшуються з довжиною хвилі, вимоги до невизначеностей спектральних вимірювань більші в області великих довжин хвиль. На довжині хвилі 630 нм коефіцієнт зв'язку $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ максимальний і складає від 0,2 (для джерела типу А) до майже 0,7 (для джерела типу D_{65}), тобто вимоги до невизначеності спектральних вимірювань стають майже такими ж, як до невизначеності координат кольоровості. Для залежностей з яскраво вираженим піком коефіцієнт зв'язку $\Delta r/u_{\text{спектр}}$ помітно залежить від ширини піка, за ширини порядку 50 нм він змінюється від приблизно 0,08 до 0,36 для джерела типу А або 0,85 для джерела типу D_{65} . Очевидно, що реальні спектри не збігаються з розглянутими, але наведені розрахунки дозволяють хоча б приблизно задалегідь оцінити вимоги до вимірювальної апаратури. Зрозуміло, що остаточний розрахунок невизначеності вимірювань кольору необхідно виконувати, використовуючи результати вже виконаних вимірювань для конкретного спектра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. MacAdam D. (1937) Projective Transformations of I.C.I. Color Specifications. Journal of the Optical Society of America, vol. 27, issue 8, pp. 294—299.
2. Створення метрики колірних просторів на базі еліпсів МакАдама— УМЖ (Stvorenniya metryky kolirnykh prostoriv na bazi elipsiv MakAdama, — UMZH), — 2019, — 1, c/s. 38—46.
3. О. Купко (2018) Кількісний метод оцінки якості кольору на екранах, Метрологія та прилади (O. Kupko (2018) Kil'kisniy metod otsinky yakosti kol'oru na ekranakh, Metrolohiya ta prylyady). — № 6. — c/s. 39—46.
4. A.R. Robertson (1967) J.of the Opt. Soc. of Am., — № 5, — v. 57, — pp. 691—698.
5. Measurement Good Practice Guide No. 95. — Uncertainties in surface colour measurements. — J.L. Gardner. — ISSN 1368-6550. — National Physical Laboratory. — Hampton Road, Teddington, Middlesex, TW11 0LW. — p. 31.
6. Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using CIE System ASTM E 308-01, p 32.
7. CIE 15.3:2004, Colorimetry. Third edition, p. 82.
8. ДСТУ 7678:2015 . Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральних, інтегральних і редукованих коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального та дифузного відбиття, в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 25,0 мкм, — К, — дійсний з 01.01.2016 ст. 11 (DSTU 7678:2015. Metrolohiya. Derzhavna povirochna skhema dlya zasobiv vymiryuvannya spektral'nykh intehral'nykh i redukovanykh koefitsiyentiv spryamovannoho propuskannya, dzerkal'noho ta dyfuznoho vidbyttya, v diapazoni dovzhyn khvyl' vid 0,2 mkm do 25,0 mkm, — K, — diysnyy z 01.01.2016 stor. 11).
9. ДСТУ 7122:2009 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральних, інтегральних і редукованих коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального та дифузного відбиття в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 25,0 мкм, — К, — дійсний з 01.01.2011, ст. 14 (DSTU 7122:2009 Metrolohiya. Derzhavna povirochna skhema dlya zasobiv vymiryuvannya spektral'nykh, intehral'nykh i redukovanykh koefitsiyentiv spryamovannoho propuskannya, dzerkal'noho ta dyfuznoho vidbyttya v diapazoni dovzhyn khvyl' vid 0,2 mkm do 25,0 mkm, — K, — diysnyy z 01.01.2011, str. 14).
10. Каталог цветного стекла, — «Машиностроение» (Kataloh kol'orovooho skla, — «Mashynobuduvannya»), — 1967, — c/s. 63.
11. Стекло оптическое цветное, — ГОСТ 9411-91, — Технические условия, — М., — Госстандарт, — дійсний з 24.12.1991, — ст. 48 (Steklo optychne kol'orove, — HOST 9411-91, — Tekhnichni umovy, — M, — Derzhstandart, — Diysnyy z 24.12.1991, — s. 48). ■

Отримано / received: 09.07.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. Г.О. Петченком (Україна).
Prof. G.O. Petchenko, D. Sc. (Phys.-Mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.27-31

УДК 536.21

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО СТЕРЖНЯ

Reverse Task
of Heat Conductivity
for the Semilimited Bar



А. Шевченко, доктор технических наук, заведующий научно-техническим отделом, Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, г.Киев, Украина
e-mail: soi_51@ukr.net

O. Shevchenko, doctor of technical sciences, head of the scientific and technical department, The Main Astronomic Observatory of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: soi_51@ukr.net

Представлены методики и формулы для расчета коэффициента температуропроводности твердых тел с использованием известных решений прямых задач теплопроводности.

При решении уравнений теплопроводности известно использование регулярных режимов 1, 2 или 3 рода, при которых окончательные формулы упрощаются до алгебраических уравнений.

В работе изложены две методики, при которых решение может быть приведено к простым алгебраическим формулам при использовании особых точек на термограммах нагревания образцов. Из этих решений алгебраическим путем можно найти достаточно простые взаимоотношения для обратных задач — нахождение теплофизических характеристик твердого тела. Приведены расчетные формулы для определения коэффициента температуропроводности двумя способами: по величине значения температуры, координаты и двух значащих моментов времени, при которых достигается эта температура. Во втором методе используются значения двух координат образца в двух разных точках, в которых одинаковая температура достигается в разные моменты времени. Для решения уравнения на конечном этапе применяются операция логарифмирования.

У статті наведені методики і формули для розрахунку коефіцієнта температуропровідності твердих тіл з використанням відомих рішень прямих задач теплопровідності. Для рішення обернених задач теплопровідності застосовуються достатньо складні методи, включаючи й гіперболічні функції, й кінцево-різничеві методи. За певних умов проведення експериментів завдання спрощується за регулярних теплових режимів 1, 2 або 3 роду. При цьому остаточні формули спрощуються до алгебраїчних рівнянь.

Можливі й інші підходи для спрощення оберненого завдання теплопровідності, в яких рішення зводиться до алгебраїчних формул. Ці методи засновані на аналізі реперних точок, нулів функції розподілу температури, точок перегину цієї функції її першої та другої похідних. У цій роботі наведені формули для розрахунку температурного поля, виходячи з рішення прямої задачі для напівобмеженого стрижня, а саме, за нагрівання зразка методом імпульсного нагрівання з подальшим перевизначенням граничних умов.

У роботі викладено дві методики, за яких рішення може бути приведені до простих алгебраїчних формул за використання особливих точок на термограмах нагрівання зразків. Із цих рішень алгебраїчним ідейом можна отримати достат-

ньо прості співвідношення для обернених задач — визначення теплофізичних характеристик твердого тіла. Наведено розрахункові формули для визначення коефіцієнта температуропровідності двома способами: за величиною значення температури, координати та двох значень моментів часу, за яких досягається ця температура.

У другому методі використовується значення двох координат зразка в двох різних точках, в яких однакова температура досягається в різні моменти часу. Для розв'язання рівняння на кінцевому етапі застосовуються операція логарифмування. Аналіз відомих методів, способів і методик засвідчує, що експериментальні методи орієнтовані на технічну реалізацію і виходять із можливостей доступного устаткування і приладів.

Наявні експериментальні методики виходять із конкретних конструкцій вимірювальних установок. Разом із тим відомі добре вирішені методи вирішення типових задач теплопровідності, викладені у фундаментальних роботах. Теоретичні методи виходять із аксіом, рівнянь і теоретичних постулатів і вирішують обернені задачі теплопровідності. У цій роботі вибрано розв'язки прямих задач із монографії О.В. Ликова «Теорія теплопровідності», як такі, що добре теоретично обґрунтовані та мають авторитет у фахівців.

Крайові умови для завдання такі: є напівобмежений тонкий стрижень, бічна поверхня якого має тепловою ізоляцію, В початковий момент часу діє миттєве джерело теплоти в перетині стрижня на деякій відстані від його кінця. Між кінцем стрижня і довкіллям відбувається теплообмін за законом Ньютона. Початкова (відносна) температура стрижня приймається рівною нулю. Теплообмін між вільним торцем стрижня і довкіллям відбувається за законом Ньютона.

The article concerns methods and formulas for the calculation of the coefficient of thermal conductivity of solid bodies using the known solutions of direct thermal conductivity tasks. The solution to the inverse problem of heat conductivity is based on the quite complicated methods including both hyperbolic functions and finite-difference methods. Under certain experimental conditions, the task is simplified at the regular thermal



modes of 1, 2, or 3 types. Thus final formulas are simplified to algebraic equations.

The simplification of the inverse problem of heat conductivity to algebraic equations is possible using other approaches. These methods are based on the analysis of the reference points, zero values of temperature distribution function, function inflection points, and its first and second derivatives. Here, we present formulas for the calculations of the temperature field on the assumption of the direct task solution for the half-bounded bar under the pulsed heating followed the re-definition of the boundary conditions.

The article describes two methods in which solutions are reduced to simple algebraic formulas when using the specified points on heating thermograms of test examples. These solutions allow algebraic deriving of simple relations for inverse problems of determination of thermophysical characteristics of solid bodies. The calculation formulas are given for the determination of the heat conductivity coefficient determination by two methods: by value of temperature, coordinate, and two moments at which this temperature is reached.

The second method uses the values of two coordinates of the test sample in two different points where the equal temperature is reached at different points in time. The final solution of the equa-

tion is logarithmic. The analysis of known methods and techniques shows that experimental methods are oriented on the technical implementation and based on facilities of available equipment and instruments.

Existing experimental techniques are based on specific constructions of measuring facilities. Simultaneously, there are well-studied methods of solution of thermal conductivity standard tasks set out in fundamental issues. The theoretical methods come from axioms, equations, and theoretical postulates, and they give the solution of inverse tasks of thermal conductivity. This work uses the solutions of direct tasks presented in the monograph by A.V. Lykov "The theory of heat conductivity". These solutions have a good theoretical background and experts' credit.

The boundary conditions of the problem are next: the half-bounded thin bar is given. The side surface of the bar has a thermal insulation. At the initial moment, the instant heat source acts on the bar in its section at some distance from its end. Heat exchange occurs between the environment and the end of the bar according to Newton's law. The initial (relative) temperature of the bar is accepted equal to zero. The heat exchange between the free end face of the bar and the environment is gone according to Newton's law.

Ключевые слова: коэффициент температуропроводности, полуограниченный стержень, импульсное тепловое воздействие, алгебраические уравнения.

Ключові слова: коефіцієнт температуропровідності, напівобмежений стрижень, імпульсна теплова дія, алгебраїчні рівняння.

Keywords: coefficient of diffusivity, semilimited bar, impulsive thermal influence, algebraic equalizations.

Для решения обратных задач теплопроводности применяются достаточно сложные методы, включающие и гиперболические функции, и конечно-разностные методы. При определенных условиях проведения экспериментов задача упрощается при регулярных тепловых режимах 1, 2 или 3 рода [1]. Возможны и другие подходы для упрощения обратной задачи теплопроводности, в которых решение сводится до алгебраических формул. Эти методы основаны на анализе реперных точек, нулей функции распределения температуры, точек перегиба этой функции и ее первой и второй производных.

В настоящей работе представлены формулы для расчета температурного поля, исходя из решения прямой задачи для полуограниченного стержня, а именно, при нагреве образца методом импульсного нагрева с последующим переопределением граничных условий. Полное решение этой прямой задачи приведено в монографии [2]. Существует несколько подходов и методик определения коэффициента температуропроводности α [3—10]. Анализ известных методов, способов и методик показывает, что экспериментальные методы ориентированы на техническую реализацию и исходят из возможностей доступного оборудования и приборов.

Существующие экспериментальные методики исходят из конкретных конструкций измерительных установок. В то же время известны хорошо изученные методы решения типовых задач теплопроводности, изложенные в фундаментальной работе [2]. Теоретические методы исходят из аксиом, уравнений и теоретических постулатов и решают обратные задачи теплопроводности. В настоящей работе

выбраны решения прямых задач из монографии [2], как такие, решения которых хорошо теоретически обоснованы и пользуются доверием у специалистов.

ИССЛЕДОВАНИЕ

Постановка и решение прямой задачи теплопроводности [2]. Дан полуограниченный тонкий стержень, боковая поверхность которого имеет тепловою изоляцию, В начальный момент времени ($\tau = 0$) действует мгновенный источник теплоты Q (Дж/м²) в сечении стержня на расстоянии x_1 от его конца. Между концом стержня и окружающей средой ($T_c = 0$) происходит теплообмен по закону Ньютона. Начальная (относительная) температура стержня принимается равной нулю $T(x, 0) = 0$.

Теплообмен между свободным торцом стержня и окружающей средой происходит по закону Ньютона. Требуется найти распределение температуры по длине стержня в любой момент времени.

Имеем [2]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial T^2(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0; 0 < x < \infty), \quad (1)$$

$$T(x, 0) = 0, \quad (2)$$

$$T(\infty, 0) = 0, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + H \cdot T(0, \tau) = 0, \quad (4)$$

где относительный коэффициент теплообмена $H = \alpha/\lambda$, $[H] = 1/\text{м}$; α — коэффициент теплоотдачи, $[\alpha] = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; λ — коэффициент теплопроводности, $[\lambda] = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; τ — время, $[\tau] = \text{с}$. Размерности обратного коэффициента теплоотдачи $1/\alpha$ и величины термического сопротивления $r = \delta/\lambda$.

одинаковы — $(m^2 \cdot K)/Вт$, где δ — толщина нагреваемой области $[\delta] = м$; x — текущая координата; a — коэффициент температуропроводности $[a] = м^2/с$.

В общем решении задачи в окончательной формуле [2] присутствует сложное выражение с H . При некоторых экспериментальных допущениях окончательное решение можно упростить. Можно приравнять $H = 0$, т. е. весь импульс потока теплоты направлен, например, от лазерного излучения или электрического нагревателя на торец полуограниченного стержня, и полностью проник в стержень. Тогда получается более простое решение для конкретной экспериментальной реализации:

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2}{4a\tau}\right], \quad (5)$$

где $b \cdot c \cdot \gamma = Q$; $b = Q/(c \cdot \gamma)$; γ — плотность тела $кг/м^3$; $[\gamma] = кг/м^3$; c — объемная теплоемкость; $[c] = Дж/(кг \cdot K)$; $[Q] = Дж/м^2$; $[b] = К \cdot м$;

Кроме того, делается такое упрощение и изменение краевых условий прямой задачи [2].

В работе [2] (глава 9, параграф 1) приведены достаточно сложные формулы для решения задачи температурного поля с мгновенным источником теплоты. Для упрощения выкладок воспользуемся этим решением с некоторыми упрощениями: плоскость, в которой выделяется теплота, перенесем на конец стержня, тогда $x_1 = 0$, т.е. $\xi = 0$ (рис. 1, [2]). Распределение температур в стержне показано на рис. 1. Физический эксперимент можно проводить путем стыковки торцами двух полуограниченных стержней. Это в том случае, когда в одном стержне трудно определить, какая часть теплоты пошла на нагрев стержня, а какая рассеивается в окружающую среду, противоположную стержню.

Решение для полуограниченного стержня можно получить из решения предыдущей задачи [2], перенеся расположение мгновенного источника с координатой $x = x_1$ в координату $x_1 = 0$ [2].

Окончательное решение после упрощений имеет вид:

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left[-\frac{x^2}{4a\tau}\right]. \quad (6)$$

Рассмотрим два варианта получения окончательного решения.

1. Первый вариант. Температура Ta в конкретной точке $x_{(1)}$ в два разные моменты времени $\tau_{(1)}$ и $\tau_{(2)}$ может быть одинаковой.

Подставив эти значения в формулу (5) получим:

$$\frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau_{(1)}}} \exp\left[-\frac{x_{(1)}^2}{4a\tau_{(1)}}\right] = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau_{(2)}}} \exp\left[-\frac{x_{(1)}^2}{4a\tau_{(2)}}\right]. \quad (7)$$

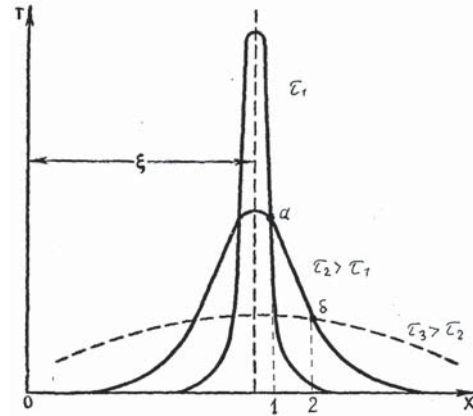


Рис. 1. Распределение температуры в полуограниченном стержне в случае действия мгновенного теплового импульса [2]
Fig. 1. Temperature distribution in a semi-restricted bar in the case of an instantaneous thermal pulse [2]

Сократив одинаковые выражения в левой и правой частях, прологарифмировав и выполнив элементарные преобразования, получим:

$$a = x_{(1)}^2 \frac{\tau_{(1)} - \tau_{(2)}}{2\tau_{(1)} \cdot \tau_{(2)} [\ln \tau_{(2)} - \ln \tau_{(1)}]}. \quad (8)$$

На графике (рис. 1) точке $x_{(1)}$ (формула 8) соответствует точка «1» на оси абсцис x . В этой точке α одинаковая температура Ta — при пересечении кривых для времён τ_1 (кривая τ_1) и τ_2 (кривая τ_2), $\tau_2 > \tau_1$. Аналогичные выкладки можно сделать и для другой точки «2», которая соответствует точке « δ » на графиках — при пересечении кривых τ_2 и τ_3 ($\tau_3 > \tau_2$). Температура в этой точке будет $T\delta$.

2. Второй вариант. В этом варианте берутся две точки по длине стержня:

$$\frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau_{(1)}}} \exp\left[-\frac{x_{(1)}^2}{4a\tau_{(1)}}\right] = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau_{(2)}}} \exp\left[-\frac{x_{(2)}^2}{4a\tau_{(2)}}\right] \quad (9)$$

После преобразований, аналогичных выполненным в первом варианте, получаем:

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{x_{(2)}^2 \cdot \tau_{(1)} - x_{(1)}^2 \cdot \tau_{(2)}}{\tau_{(2)} \cdot \tau_{(1)} (\ln \tau_{(1)} - \ln \tau_{(2)})} \right). \quad (10)$$

Размерности правой и левой части уравнения (10) совпадают — $м^2/с$.

На рис. 2 приведен график изменения относительной температуры среды $\theta_c(\tau)$ и относительной температуры поверхности ограничивающего тела $\theta_n(\tau)$ ($x = 0$). Для полуограниченного стержня в данной постановке задачи принимается, что источник теплоты находится не на расстоянии ξ , а на самом торце стержня, т.е. $\xi = 0$. В таком случае распределение температуры будет иметь вид кривой,

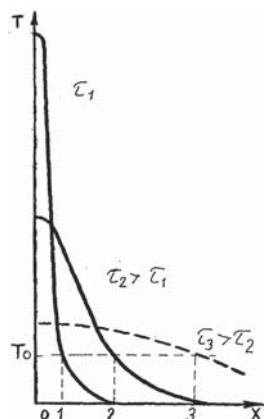


Рис. 2. Распределение температуры в неограниченном стержне при воздействии импульсного теплового потока на торец стержня. [2]

Fig. 2. Temperature distribution in an unlimited rod under the influence of a pulsed heat flux on the end of the rod. [2]

расположенной справа от начала координат, при $x = 0$ (рис. 2).

Возьмем, например, распределение температур в неограниченном стержне при трех разных временах: τ_1 , τ_2 и τ_3 . Выберем температуру T_0 и проведем прямую параллельную оси x до пересечения с тремя графиками. Абсциссы точек пересечения «1», «2» и «3» будут соответствовать точкам на оси x : $x_{(1)}$, $x_{(2)}$ и $x_{(3)}$. Эти три точки пересечения с графиками будут соответствовать временам $\tau_{(1)}$, $\tau_{(2)}$ и $\tau_{(3)}$.

Для нахождения коэффициента температуропроводности α по формуле (10) можно взять любую пару этих точек, например: $x_{(1)}$, $x_{(2)}$ и $\tau_{(1)}$ и $\tau_{(2)}$. Для уточнения результата можно взять другую пару точек:

$$x_{(1)}, x_{(2)} \text{ и } \tau_{(1)} \text{ и } \tau_{(2)}.$$

Графики, приведенные на рис. 2, строятся путем записи термограмм нагревания по длине стержня

несколькими термопарами и в дальнейшем — их аппроксимаций и сглаживаний. Например, методом наименьших квадратов.

ВЫВОДЫ

При импульсном нагреве торца полуограниченного длинного стержня приведено два варианта решения прямой задачи теплопроводности. При определенных условиях, а именно, при том, что в разных точках стержня по длине может совпадать величина температуры в разные моменты времени. Решение может быть приведено к простым алгебраическим формулам. Из этих решений алгебраическим путем можно найти достаточно простые взаимоотношения в обратных задачах — нахождения теплофизических характеристик твердого тела. Эти методики можно использовать в приборах и установках для определения α . Выбор способа нагрева поверхности пластины зависит от температурных интервалов, порядка значений величины α и свойств материала. Их можно использовать и при фазовых переходах в образце при изменении температуры следующим образом: начиная от более низкой температуры, постепенно менять мощность нагрева и при аномальном изменении амплитуды или фиксировать температуру начала аномалий и, возможно, определять теплоты фазовых превращений. Таким образом, предложено два варианта метода определения коэффициента температуропроводности α при решении обратной задачи теплопроводности:


1. Через сравнения равной температуры в одной точке $x_{(1)}$ в разное время: $\tau_{(1)}$ и $\tau_{(2)}$.

2. Через сравнение температуры в двух разных точках $x_{(1)}$ и $x_{(2)}$ и соответственно в разные времена $\tau_{(1)}$ и $\tau_{(2)}$.

Эти формулы удобны для практических расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. — М.: Гос. изд. тех.-теоретич. Литературы (Kondratev G.M. *Regulyarniy teplovooy rejim*. — М.: Gos. izd. teh.-teoretich. literatury), 1954. — 408 с/с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Изд-во «Высшая школа» (Lyikov A.V. *Teoriya teploprovodnosti*. — М.: Izd-vo «Vysshaya shkola»), 1967. — 600 с/с.
3. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении, Пб.: СПбГУ ИТМО (Kondratev G.M., Dulnev G.N., Platunov E.S., Yaryishev N.A. *Prikladnaya fizika. Teploobmen v priborostroenii*, Pб.: SPbGU ITMO), 2003. — 560 с/с. — (Выдающиеся ученые ИТМО).
4. Пат. РФ № 2 478 939 С1. МПК G01N 25/18. Способ измерения коэффициента температуропроводности теплоизоляционных материалов методом регулярного теплового режима третьего рода / С.В. Пономарев, Д.А. Дивина, Г.В. Шишкина.: заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО ТГТУ) (RU) . — 2011141156/28 : — заявл. 10.10.2011 : опубл. 10.04.2013. Бюл. № 10. — 9 с. (Pat. RF № 2 478 939 С1. МПК G01N 25/18. *Sposob izmereniya koeffitsienta temperaturoprovodnosti teploizolyatsionnyih materialov metodom regulyarnogo teplovoogo rejima tretogo roda* / S.V. Ponomarev,

- D.A. Divina, G.V. SHishkina. : zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe byudjetnoe obrazovatelnoe uchrejdenie vysshiego professionalnogo obrazovaniya «Tambovskiy gosudarstvennyiy tehnichestkiy universitet» (FGBOU VPO TGTU) (RU). — 2011141156/28: — zayavl. 10.10.2011: opubl. 10.04.2013. Vyul. № 10. — 9 s.).
5. Любимова Д.А. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода / Д.А. Любимова, С.В. Пономарев, А.Г. Дивин. Рекомендовано Научно-техническим советом университета в качестве монографии под науч. ред. С.В. Пономарева. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (Lyubimova D.A. Izmerenie teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom regul'yarnogo rejima tret'ego roda / D.A. Lyubimova, S.V. Ponomarev, A.G. Divin. Rekomendovano Nauchno-tehnicheskim sovetom universiteta v kachestve monografii pod nauch. red. S.V. Ponomareva. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU»), 2014. — 80 с/с.
 6. Зиновьев В.Е. Прибор для автоматизированных измерений теплофизических характеристик горных пород в условиях, близких к естественным / В.Е. Зиновьев, В.И. Бочаров, Р.Р. Мулюков и др. // Измерительная техника (Zinovev V.E. Pribor dlya avtomatizirovannykh izmereniy teplofizicheskikh harakteristik gornyykh porod v usloviyah, blizkikh k estestvennyim / V.E. Zinovev, V.I. Bocharov, R.P. Mulyukov i dr. // Izmeritel'naya tehnika). — 1985. — №1. — С/Р. 62—63.
 7. С.В. Мищенко. Теоретические и практические основы теплофизических измерений: под ред. С.В. Пономарева / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин, В.А. Вертоградский, А.А. Чуриков // — М.: ФИЗМАТЛИТ (S.V.Mischenko. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy teplofizicheskikh izmereniy: pod red. S.V. Ponomareva / S.V. Ponomarev, S.V. Mischenko, A.G. Divin, V.A. Vertogradskiy, A.A.CHurikov // — М.: FIZMATLIT), 2008. — 408 с/с.
 8. Шевченко А.И. Измерение коэффициента температуропроводности металлов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов (Shevchenko A.Y. Yzmerenye koeffytsyenta temperaturoprovodnosty metallov / Zavodskaia laboratoriya. Dyahnostyka materyalov). — 2015. — № 7, т/v. 81. — С/Р. 62—63.
 9. Шевченко А.І. Метод визначення температуропровідності на основі аналогії функції розповсюдження температури та формул теорії ймовірності. / Український метрологічний журнал (Shevchenko A.Y. Metod vyznachennia temperaturoprovodnosti na osnovi analogii funktsii rozpovsiudzhennia temperatury ta formul teorii ymovirnosti. / Ukrainskiy metrolohichnyi zhurnal). — 2019. — № 1. — С/Р. 37—40.
 10. Круглов А.Б., Круглов В. Б., Тенишев А.А. Измерение температуропроводности материалов ядерной энергии методом импульсного нагрева / А.Б Круглов // Теплофизика высоких температур (Kruhlov A.B., Kruhlov V.B., Tenyshev A.A. Yzmerenye temperaturoprovodnosty materialov yadernoi enerhetyky metodom ympulsnoho nahreva / A.B Kruhlov // Teplofyzyka vysokyykh temperatur). — 2010. Т/V. 48. — № 1. — С/Р. 145—148 

Отримано / received: 08.09.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. А.В. Прокоповим (Україна).
Prof. A.V. Prokоров, D. Sc. (Phys-Mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.32-36

УДК 537.81:535.233:362.1:548.0:535:551.510.534

NON-SELECTIVE MAGNETOELECTRIC THERMAL RADIATION RECEIVER BASED ON CADMIUM ANTIMONIDE

Неселективний магнітоелектричний приймач теплового випромінювання на основі антимоніду кадмію

CC BY-SA

Yu. Dobrovolsky, doctor of technical sciences, associate professor of the department of semiconductor physics, deputy director for science of Scientific-Production Company «Tensor», LLC,
G. Prokhorov, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of computer systems software department,
 Yu. Fedkovych Chernivtsi National University,
A. Ascheulov, doctor of technical sciences, chief researcher at the Institute of thermoelectricity of the National academy of sciences and the Ministry of education and science of Ukraine
 e-mail: yuriydrq@ukr.net

Ю. Добровольський, доктор технічних наук, доцент кафедри фізики напівпровідників, заступник директора ТОВ «НВФ «Тензор»,
Г. Прохоров, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем,
 Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
А. Ащеулов доктор технічних наук, головний науковий співробітник Інституту термоелектрики НАН та МОН України
 e-mail: yuriydrq@ukr.net

The ways of increasing the sensitivity of a non-selective thermal radiation receiver based on cadmium antimony using the phenomenon of electromagnetic induction are considered and investigated. It has been shown that the application of anisotropic NdFeB anisotropic magnet increases the volt-watt sensitivity of the thermal radiation receiver by 30 %. When a more powerful magnet is used, an additional increase in sensitivity is observed, but not in proportion to the magnitude of the additional magnetic induction. The dynamic range of the created thermal radiation receiver, which is from 10 to 200000 W/m², is investigated.

Розглянуто та досліджено шляхи підвищення чутливості неселективного приймача теплового випромінювання на основі антимоніду кадмію за допомогою явища електромагнітної індукції. Показано, що у випадку анізотропного термоелемента, наприклад, на основі антимоніду кадмію, який має анізотропію провідності у певному напрямку, є можливість збільшити вольт-ватну чутливість приймача теплового випромінювання. Магніти повинні бути розміщені у такий спосіб, щоби напрям лінії магнітного поля, що ними генерується, був перпендикулярним до граней анізотропного термоелемента. В такому випадку величина його термо е.р.с. є повинна збільшитися на величину добутку швидкості та заряду електрона, помно-

жену на величину магнітної індукції. Окрім того, потрібно використовувати високооднорідні анізотропні матеріали, які орієнтовані у відповідному кристалографічному напрямку з похибкою, меншою від 1°.

У нашому випадку застосовано магніти на основі анізотропного NdFeB із величиною магнітної індукції 0,5—0,6 Тл. Виявлено, що чутливість звичайного приймача теплового випромінювання складає 0,5 В/Вт, тоді як чутливість запропонованого приймача складала близько 0,65 В/Вт за межі основної відносної похибки вимірювання ±15 %. Отже вдається збільшити чутливість приймача випромінювання внаслідок дії магнітного поля приблизно на 30 %.

Досліджено динамічний діапазон створеного приймача теплового випромінювання, який складає від 10 до 200000 Вт/м². У зазначеному діапазоні інтенсивностей нелінійність енергетичної характеристики запропонованого приладу складає не більше ніж 2 %.

Досліджено також вплив на приймач теплового випромінювання магнітів типу ХК (залізохром-кобальт, Fe-Cr-Co), з величиною магнітної індукції Br = 1,1—1,5 Тл. Виявлено, що у цьому випадку вольт-ватна чутливість приймача на основі АТ складає 0,75 В/Вт, але в цьому випадку зростання чутливості відбувається не пропорційно величині додаткової магнітної індукції.

Keywords: radiation receiver, cadmium antimonide, magneto-electric, magnetic field, sensitivity, dynamic range.

Ключові слова: приймач випромінювання, антимонід кадмію, магнітоелектричний, магнітне поле, чутливість, динамічний діапазон.



Yu. Dobrovolsky



G. Prokhorov



A. Ascheulov

INTRODUCTION

The manufacturing sector of the economy is saturated with broad-spectrum heat fluxes of varying densities and intensities. The study of this radiation is one of the urgent problems of solid-state electronics, since it allows you to study and control the processes that generate these flows.

In this regard, the urgent task is to create new and improve the existing non-selective primary converters of heat radiation fluxes that satisfy the requirements of mass measurements.

As a rule, the main information flows based on thermal radiation in the case of measuring the thermal field of the human body, the dynamics of thermal fluctuations in the processes of heat transfer and some others, have low intensity. In addition, such streams can be quite short in duration. Hollow and flat heat flux converters are used to study the energy parameters of thermal radiation [1]. Improvement of their metrological characteristics can be ensured by optimizing the thermal mode of operation of the thermo-converter.

Various designs of spherical cavity radiometers based on electrical substitution principles are used to measure high-intensity radiation heat fluxes. The heating of the receiver is registered by means of a thermoelectric converter or a thermocouple located on its outer surface [2].

Widespread use as thermal radiation sensors are devices and appliance with thermoelectric conversion, that convert thermal energy into electrical [3, 4].

The general disadvantage of these radiation receivers is the lack of high sensitivity values, which creates the problem of low resolution of such converters. In addition, converters based on thermoelectric effects tend to have high inertia, ranging from one to tens of seconds. More effective, from the point of view of sensitivity, are the receivers of thermal radiation on the basis of anisotropic thermocouples (AT), in particular, based on cadmium antimonite (CdSb) [5, 6].

Anisotropic thermocouples are used as sensors for direct conversion of thermal energy into electrical energy, or vice versa. In the first case, materials with high thermoelectric quality are required. In the second case, other characteristics are significant, and high thermoelectric figure of merit is not always necessary. This, in particular, is confirmed by the wide and varied use of metal thermocouples in measuring technology, although the materials for them are characterized by extremely low thermoelectric figure of merit.

Effective is the use of AT as a sensor for the receiver of the heat radiation generated by various heat

sources [7]. However, such receivers have high inertia, which reaches several tens of seconds.

Since high anisotropy of thermopower in certain directions is manifested in anisotropic materials, it is to be expected that it will be strengthened when exposed to a magnetic field thermocouple.

In this regard, the purpose of this work is to investigate ways to increase the sensitivity of a non-selective receiver of thermal radiation from cadmium antimonide based on the phenomenon of electromagnetic induction.

Consider the factors that determine, in general, the volt-watt sensitivity of the S_V receiver of the thermal radiation flux based on the AT. It depends both on the electrothermal physical properties of the material AT and the geometric dimensions of the thermocouple, which consists of the receiver — height a , length b and width c [8].

Assuming that all the absorbed heat passes through the thermocouple on the one hand and neglects the heat loss to the environment, we obtain:

$$S_V = \gamma \Delta \alpha / 2 \kappa c, \quad (1)$$

where: γ — the integral absorption coefficient of the front surface of the receiver;

κ — is the specific thermal conductivity of the AT material;

$\Delta \alpha$ — is the anisotropy of the coefficient of thermo-emf. coefficient of thermoEMF;

c — width AT.

Thus, the narrower the thermocouple, the greater its volt-watt sensitivity. There is a slight dependence of S_V on parameter a (length of AT) and slightly more significant on parameter b (thickness of AT). Therefore, it can be assumed that the optimal values for the sensitivity of S_V AT are the minimum possible values of b and c for any values of a .

Considering the flat thermal converter on AT [2,5,9] in terms of thermal balance, it can be seen that as the number of thermocouples m increases, the volt-watt sensitivity S increases, but the heat losses through the lateral faces also increase. The most optimal is the sample with the number of elements equal to 8—10. This provides sufficient thermo-EDP. output at permissible heat losses through the lateral faces not exceeding 5—6 %, and the value of the volt-watt sensitivity is 0,5—0,6 V/W.

It is known that a magnetic field upon action on a semiconductor is able to increase the number of non-basic charge carriers due to the Lawrence force, which increases the internal energy of the semiconductor. In the case of conventional semiconductors, such changes are rather small, but in the case of AT,

we have an anisotropy of conductivity in a particular direction that can be used to increase the volt-sensitivity of the optical radiation receiver. In particular, when the direction of the magnetic field is perpendicular to the plane $a*b$ (height and length), an increase in the anisotropy of the coefficient of thermo-emf is possible. Da in (1) due to the magnetotherm emf.

The value of thermo-emf. AT ε is determined by the Thomson formula [10]

$$\varepsilon = 0,5 a/b (T_2 - T_1)\Delta\alpha, \quad (2)$$

where: T_1 — temperature of the upper face of the AT;

T_2 — is the temperature of the lower face of the AT;

$\Delta\alpha$ — is the anisotropy of the coefficient of thermo-emf.

From [11] the following is known. As the charged particle moves in a homogeneous magnetic field under the action of the Lorentz force, and its velocity vector lies in a plane perpendicular to the vector of magnetic induction, then the charge (electron) in this case will move in a circle of radius R :

$$R = mv/qB, \quad (3)$$

where m — is the mass of the charge;

v — charge velocity;

q — is the electron charge;

B — is the magnitude of the magnetic induction.

Just how electrons move perpendicular to the magnetic field; parallel to the face $a*b$ (Figure 1), there will be a process of additional generation and scattering of charge carriers in AT due to the Lorentz force equal to the product of vqB .

Thus, the value of thermo emf ε must increase by the value of vqB and be equal to:

$$\varepsilon = 0,5 a/b (T_2 - T_1) \Delta\alpha + vqB, \quad (3)$$

RESEARCH RESULTS.

In view of the above, a radiation receiver was fabricated based on a highly sophisticated cadmium antimonide crystal, to which a magnetic field acts.

As is known [12], AT based on CdSb is a single-crystal plate with a crystallographic direction [001] located in the (xb) plane and oriented at an optimal angle $\varphi = 45^\circ$ (Figure 1). The results of studies [13] indicate the need to use highly homogeneous anisotropic materials in the orientation of the selected crystallographic direction with an error of less than 1°.

Figure 2 shows the design of a high-sensitivity thermal radiation receiver based on cadmium antimonide with magnetic field sources.

On the base (1) there is an insulating substrate (2), which has dimensions slightly larger than the size of the AT (3), which is placed on it. AT dimensions are $a*b*c$ ($5,4 \times 0,3 \times 3,0$ mm.) A copper foil (5) of 0.1 mm thick is attached thereto by means of an op-

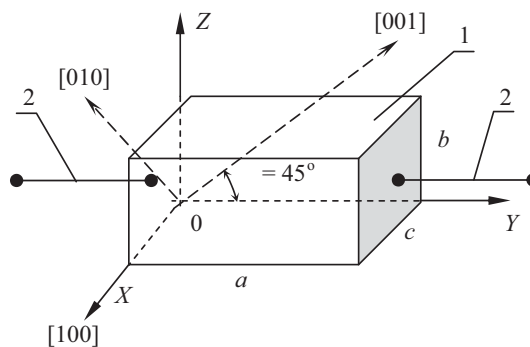


Fig. 1. AT based on cadmium anti-trust: 1 - single crystal plate, 2 - electronic findings

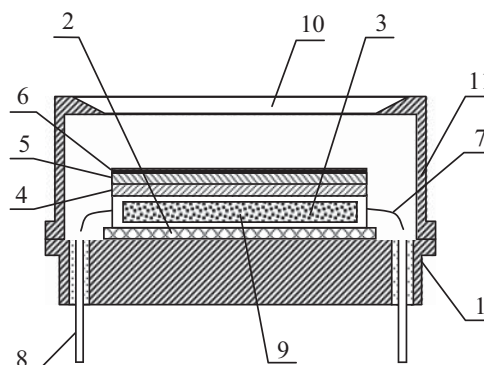


Fig. 2. Schematic depiction of the design of the thermal accelerator

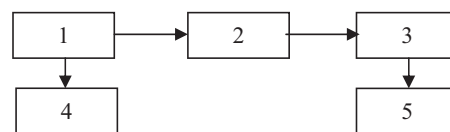


Fig. 3. Structural diagram of the installation for volt-watt sensitivity of thermal radiation receivers:

1 - power supply D 30-10-01 D; 2 - radiation source lamp type KGM 24 - 150; 3 - radiation receiver; 4 - M2018 volt-ammeter; 5 - Voltmeter Sh300

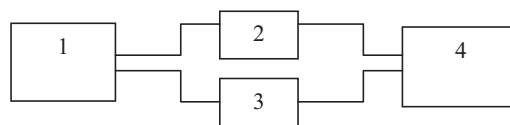


Fig. 4. Structural diagram of the installation for investigating the nonlinearity of the energy characteristic and the intensity measurement range:

1 - power source D 30-10-01 D; 2,3 - radiation source - lamp type KGM 24 - 150; 4 - radiation receiver

tical, heat-conducting adhesive (4) to which a non-selective absorbent layer of ILIOLAC type paint (6) is applied to solar collectors having a 99% absorption coefficient in the spectral range 0,6—24 μm . By means of copper conductors (7) the joint is connected to the sockets of the socket (8).

The thermal radiation collected on the base of the receiver on the sides of the face $a*b$, which has an area of $5,4 \times 0,3$ mm, and parallel to it face permanent mag-

nets (9) with the dimensions of the faces in contact with the AT $5 \times 0,2$ mm. The magnets are arranged in such a way that the direction of the magnetic field lines they generate is perpendicular to the faces a . In this case, magnets based on anisotropic NdFeB with a magnetic induction value of 0,5—0,6 T were applied.

The flow of thermal radiation enters the receiver through the diaphragm (10), which is formed in the cover (11), which closes the structure.

The study of the efficiency of the use of a magnetic field source to increase the sensitivity of the thermal radiation receiver was performed by determining the volt-watt sensitivity of the proposed receiver and a similar receiver without magnetic field sources according to the method described in GOST 17777-88 (method 1.10) [14] using the installation, block diagram which is shown in Figure 3. The sensitivity of a conventional thermal radiation detector was found to be 0,5 V/W, at the same time, the sensitivity of the proposed receiver was about 0,65 V/W at the limit of the main relative measurement error of ± 15 %. Thus, we have an increase in the sensitivity of the receiver due to the action of the magnetic field by about 30 %, which corresponds to the action of the second component in equation (3).

The nonlinearity of the energy characteristics and the range of measurement of the intensity of thermal radiation of the proposed receiver, by the method of addition of radiation fluxes were also investigated [15, 16]. A block diagram of an installation for investigating the nonlinearity of the energy characteristic and the intensity measurement range is shown in Fig. 4.

The radiation receiver alternately irradiates the streams of each channel and both at the same time. This records the readings of the device A_1 , A_1' and A_1'' and determines the nonlinearity of the energy characteristic in percentage by the formula (4):

$$\delta_{nl} = \frac{|A_1 + A_1' - A_1''|}{(A_1 + A_1')} \cdot 100, \quad (4)$$

Similarly, determine the nonlinearity of the energy characteristic by setting the required signal level in the intensity range from 10 W/m² to $2 \cdot 10^5$ W/m² using a power source

In the specified range of intensities, the nonlinearity of the energy characteristics of the proposed device is not more than 2 %. The nonlinearity of the energy performance of a standard instrument is no more than 1,8 %. The limits of the principal relative error of measuring nonlinearity do not exceed ± 10 %.

The influence on the receiver of thermal radiation of magnets of the IC type (iron-chromium-cobalt, Fe-Cr-Co), with magnitude of magnetic induction $B_r = 1,1$ —1,5 T, was also investigated. In this case, it is found that the current-voltage sensitivity of the AT-based receiver is 0,75 V/W. Moreover, according to (3), the sensitivity should increase by a larger value. In our opinion, this is explained by a certain limit of the generation of additional charge carriers in the AT when the magnitude of the magnetic field increases.

CONCLUSIONS.

A non-selective magneto-electric thermal radiation receiver based on cadmium antimony was developed.

It is shown that, when used as an additional stimulator for the generation of magnetic charge carriers based on anisotropic NdFeB, it is possible to increase the voltage-watt sensitivity of the thermal radiation receiver by 30 %.

When a more powerful magnet is used, an additional increase in sensitivity is observed, but not in proportion to the magnitude of the additional magnetic induction.

The dynamic range of the created thermal radiation receiver, which is from 10 to 200000 W/m², is investigated.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Kmito A.A. Pyrheliometry / A.A. Kmito, Yu.A. Sklyarov — L.: Hydrometizdate, 1981. — p. 232 (Кмито А.А. Пиргелиометрия / А.А. Кмито, Ю.А. Скляров — Л.: Гидрометиздат, 1981. — с. 232).
2. Shabashkevich BG Thermal modes of thermoconverters on anisotropic thermocouples / BG. Shabashkevich, SI Pyrozhenko, A.D. Shevchenko, A.M. Gelich // Journal of Engineering and Physics. — 2000. — issue 2. — P. 447—453 (Шабашкевич Б.Г. Тепловые режимы термопреобразователей на анизотропных термоэлементах / Б.Г. Шабашкевич, С.И. Пироженко, А.Д. Шевченко, А.М. Гелич // Инженерно-физический журнал. — 2000. — вып. 2. — С. 447—453).
3. Ascheulov AA Peltier thermoelectric modules based on crystals of Bi-Te-Se-Sb solid solutions / A.A. Ascheulov, M.V. Gorobets, Yu.G. Dobrovolsky, I.S. Romaniuk — Chernivtsi: Prut, 2011. — 168 p. (Ащеулов А.А. Термоэлектричні модулі Пелте на основі кристалів твердих розчинів Bi-Te-Se-Sb / Ащеулов А.А., Горобець М.В., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. — Чернівці: Прут, 2011. — 168 с).
4. Dobrovolsky Yu.G. Anisotropic receiver of thermal radiation fluxes based on cadmium antimonide / Yu. Dobrovolsky, B.G. Shabashkevich // Technology and design in electronic equipment. 2009. — № 1. — P. 31—33 (Добровольський Ю.Г. Анизотропний приймник

- потоков теплового излучения на основе антимионда кадмия / Ю.Г. Добровольский, Б.Г. Шабашкевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 1. — С. 31—33).
5. Pilat I.M., Shabashkevich B.G., Pirozhenko S.I. et al. Radiometers of energy illumination on anisotropic thermocouples // *Optical Journal*. — 2000. — t. 67. — № 3. — with. 83—85 (Пилат И.М., Шабашкевич Б.Г., Пироженко С.И. и др. Радиометры энергетической освещенности на анизотропных термоэлементах // *Оптический журнал*. — 2000. — т. 67. — № 3. — с. 83—85).
 6. Ascheulov A.A., Voronka N.K., Marenkin S.F., Rarenko I.M. Features of technology of anisotropic thermoelectric materials based on cadmium antimonide // *Inorgan. mate.* — 1996. — Vol. 32. — № 9. — with. 1049—1060 (Ащеулов А.А., Воронка Н.К., Маренкин С.Ф., Раренко И.М. Особенности технологии анизотропных термоэлектрических материалов на основе антимионда кадмия // *Неорган. мат.* — 1996. — т. 32. — № 9. — с. 1049—1060).
 7. Ascheulov A.A. Features of technology and use of materials with CdSb / A.A. Ascheulov, I.V. Gutsul, V.A. Bezulik, I.M. Rarenko // *Scientific Bulletin of Chernivtsi University*. — Issue 132. — Physics. Electronics. — 2002. — WITH. 79—86 (Ащеулов А.А. Особенности технологии і використання матеріалів із CdSb / А.А. Ащеулов, І.В. Гуцул, В.А. Безулик, І.М. Раренко // *Науковий вісник Чернівецького університету*. — Випуск 132. — Фізика. Електроніка. — 2002. — С. 79—86).
 8. Kalush A.V., Pilat I.M., Shevchenko A.D. Calculation of the volt-sensitivity of anisotropic thermoelements // *Sat. TPI L.: GOI*. 1984. p. 37 (Калюш А.В., Пилат И.М., Шевченко А.Д. Расчет вольтваттной чувствительности анизотропных термоэлементов // *Сб. ТПИ Л.: ГОИ*. 1984. с. 37).
 9. Shabashkevich B.G. Precision Measures for Measuring the Energy Characteristics of Optical Radiation: Abstract. diss. for the sciences. degree of Cand. tech. Sciences: Special. 05.09.07 «Lighting and light sources» / Б.Г. Шабашкевич. — Kharkiv, 2011. — 20, [1] p (Шабашкевич Б.Г. Прецизійні засоби вимірювання енергетичних характеристик оптичного випромінювання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.07 «Світлотехніка та джерела світла» / Б.Г. Шабашкевич. — Харків, 2011. — 20, [1] с).
 10. Kozurev V.P. Features of the work of thermoelectric radiation receivers / V.P. Kozurev // *LETI Bulletin*. — 1960. — issue 30. — WITH. 37; issue 44. — С. 22 (Козырев В.П. Особенности работы термоэлектрических радиационных приемников излучения / В.П. Козырев // *Вестник ЛЭТИ*. — 1960. — вып. 30. — С. 37; вып. 44. — С. 22).
 11. Monday G.V., Danilov A.B. Course of General Physics. Electricity and magnetism. Tutorial. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2010. 516 p (Понеділок Г.В., Данилов А.Б. Курс загальної фізики. Електрика і магнетизм. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 516 с).
 12. Ascheulov A.A. Technological features of anisotropic thermoelectric modules based on cadmium antimonide / A.A. Ascheulov, D.D. Velichuk // *Physics and Chemistry of Solids*. — V. 9. — № 4. — 2008. — WITH. 894—897 (Ащеулов А.А. Технологічні особливості анизотропних термоелектричних модулів на основі антимионіду кадмію / А.А. Ащеулов, Д.Д. Величук // *Фізика і хімія твердого тіла*. — Т. 9. — № 4. — 2008. — С. 894—897).
 13. A.A. Ascheulov, A.B. Belikov, L.L. Kazanskaya et al. The error of anisotropic thermoconverters due to inaccuracy in the orientation of the crystallographic axes (A.A. Ащеулов, А.Б. Беликов, Л.Л. Казанская и др. Погрешность анизотропных термопреобразователей, обусловленная неточностью ориентации кристаллографических осей // *Измерит.техника*. — 1976. — т. 7. — с. 61—63).
 14. Receivers of radiation. Semiconductor photoelectric and photodetector devices. Methods of measurement of photoelectric parameters and determination of characteristics: GOST17772-88. — [effective from 1988-01-07]. М.: Standards Publishing House, 1988 — 158 p. (USSR State Standard) (Приемники излучения. Полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик: ГОСТ17772-88. — [чинний від 1988-01-07]. М.: Изд-во Стандартов, 1988. — 158 с. (Державний стандарт СРСР)).
 15. Butenko V.K. An installation for measuring the dynamic range of photodetectors [Text] / V.K. Butenko, V.M. Godovaniuk, I.V. Doktorovich, V.G. Yurev // *Scientific Bulletin of the Chernivtsi University*. — 2001. — Vip. 112. — P. 67—70 (Бутенко, В.К. Установка для вимірювання динамічного діапазону фотоприймачів [Текст] / В.К. Бутенко, В.М. Годованюк, І.В. Докторович, В.Г. Юр'єв // *Науковий вісник Чернівецького університету*. — 2001. — Вип. 112. — С. 67—70).
 16. Doktorovich I.V. The technique of determining the dynamic range of semiconductor photodetectors [Text] / I.V. Doktorovich, V.K. Butenko, V.N. Godovanyuk, V.G. Yurev // *ТКЕА*. — 2002. — № 6. — P. 14—15 (Докторович И.В. Методика определения динамического диапазона полупроводниковых фотоприёмников [Текст] / И.В. Докторович, В.К. Бутенко, В.Н. Годованюк, В.Г. Юр'єв // *ТКЭА*. — 2002. — № 6. — С. 14—15).

Отримано / received: 16.09.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. О.Д. Купком (Україна).

D. Sc. (Techn.) O.D. Kupko, Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.37-40

УДК 53.088.7

ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОХИБОК ВХІДНИХ ДАНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ ТЕОРІЇ КІНЦЕВИХ АВТОМАТІВ

Formation of the Convergence Functions of Errors of Input Data of Measurement Systems Computing Components on the Basis of the Finite Automata Theory

(cc) BY-SA

О. Кричевець, кандидат технічних наук,
заступник директора з наукової роботи та якості,
ДП «Науково-дослідний інститут метрології
вимірювальних і управляючих систем»,
Львів, Україна,
e-mail: amkrich@gmail.com

O. Krychevets, candidate of technical sciences,
deputy director for scientific work and quality,
State enterprise «Scientific-research institute
of metrology of measuring
and control systems», Lviv, Ukraine,
e-mail: amkrich@gmail.com

Подано результати досліджень функцій перетворення похибок вхідних даних обчислювальних компонентів вимірювальних систем, які формуються шляхом комбінації елементарних кінцевих автоматів. Розглянуто метрологічні моделі обчислювальних компонентів та їх основні характеристики. Показано, що функції перетворення похибок обчислювальних компонентів можуть бути визначені декартовим добутком значень метрологічних станів і функцій переходів елементарних автоматів для різних структур обчислювальних компонентів.

This paper presents the results of an investigation into the behavior of the functions of transforming the input data errors for different types of measurement systems' computing components in order to use their generalized models developed on the basis of the finite automata theory. It is shown that, depending on the kind and value of an input data error transformation function (metrological condition of computing components), the errors of measurement results obtained with the systems' measuring channels have a determinate character of changes in both static and dynamic regimes of computing components. Determined are the basic dependences of the errors of measurement results upon the input data errors, and upon the types of input data transformation functions; given are the results of their calculation.

The investigation results demonstrate a linear character of the dependence of measurement result errors upon the input data errors $\Delta X\{t_n\}$. In addition, the transformation function calculation $f = \Delta Y\{t_n\}/\Delta X\{t_n\}$ gives its steady state value $f = 1,0$, i.e. a computing component does not transform the input data error, and does not reverse its sign.

For the iterative procedures, the input data errors do not affect the final measurement result, and its accuracy. The measurement error values Δy_n depend on the iteration number, and decrease with the increasing number. Of particular interest is the behavior of the function of transforming the input data errors: first, its values are dependent upon the number of iterations; second, $f < 1$, which clearly shows that the input data errors decrease with the increasing number of iterations; and third, the availability of values $f = 0$ indicates that the function of transforming the input data errors is able to «swallow up» the input data error at the end of the computational procedure.

For the linear-chain structures, data have been obtained for a predominantly linear dependence of the measurement error Δs on the input data error Δx , and for the absence of the chain's transformation function f dependence on the input data errors Δx .

For the computing components having a cyclic structure, typical is the same dependence of measurement errors Δt on the input data errors and on the behavior of transformation function $f_{i,j}$, which are specific to the above mentioned computing components that realize iterative procedures. The difference is that the computing components having a cyclic structure realize the so-called (sub)space iteration as opposed to the time iteration specific to the computing components considered.

The computing components having a complicated structure (e.g. serial-cyclic, serial-parallel, etc.) demonstrate the dependence of measurement errors on the input data errors which is specific to the linear link that, with such a structure, is determinative for evaluating the measurement error. Also the function of transforming the input data errors behaves similarly.

Ключові слова: вимірювальні системи, кінцевий автомат, обчислювальний компонент, функція перетворення.
Keywords: measuring systems, finite automata, computing component, convergence function.

Для складних обчислювальних процедур, які використовують різні за призначенням програмні модулі, є характерним формування ланцюгів, що складаються з елементарних кінцевих автоматів, наслідком чого є виникнення структур послідовного, паралельного поєднання та поєднання зі зворотним зв'язком, що призводить до формування результирувальних кінцевих автоматів із сумісними функціями перетворення [1—2].

Для ланцюгів послідовної структури маємо (рис. 1):

© Кричевець О., 2019



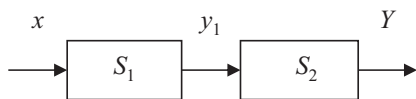


Рис. 1. Послідовний ланцюг
Fig. 1. Serial chain

результувальний автомат $S = \{Q, X, Y, \delta, \lambda\}$;

$$Q = Q_1 \times Q_2; X = X; Y = Y; \quad (1)$$

функцію переходів (перетворення)

$$\delta(Q \times X) = (\delta_1(Q_1 \times X), \delta_2(Q_2 \times \lambda_1(Q_1 \times X))), \quad (2)$$

функцію виходів

$$\lambda(Q \times X) = \lambda_2(Q_2 \times \lambda_1(Q_1 \times X)) = Y, \quad (3)$$

де Q_1, Q_2 — множини станів автоматів S_1, S_2 відповідно;

X — масив вхідних даних;

Y_1 — масив вихідних даних S_1 ;

Y_2 — масив вихідних даних S_2 ;

δ_1 — функція перетворення автомата S_1 ;

δ_2 — функція перетворення автомата S_2 ;

λ_1 — функція виходів автомата S_1 ;

λ_2 — функція виходів автомата S_2 .

Звідси, метрологічна модель ланцюга S матиме такий вид:

функція перетворення:

$$\delta(Q \times (X_0 \cup \Delta X)) = (\delta_1(Q_1 \times X_0) \cup (Q_1 \times \Delta X), \delta_2(Q_2 \times \lambda_1(Q_1 \times (X_0) \cup (Q_1 \times \Delta X))); \quad (4)$$

функція виходів:

$$\lambda(Q \times (X_0 \cup \Delta X)) = \lambda_2(Q_2 \times \lambda_1((Q_1 \times X_0) \cup (Q_1 \times \Delta X))) = Y_0 \cup \Delta Y, \quad (5)$$

де $X = X_0 \cup \Delta X$ — масив вхідних даних з похибками ΔX ;

$Y = Y_0 \cup \Delta Y$ — масив вихідних даних з похибками ΔY ;

X_0, Y_0 — масиви «незасмічених» вхідних і вихідних даних відповідно.

Масиви похибок $\{\Delta X\}$ і $\{\Delta Y\}$ визначаються у такий спосіб:

Припустимо, що на вхід послідовного ланцюга (рис. 1) подається множина X_0 , тоді на виході формується множина Y_0 . Подається на вхід ланцюга масив «засмічених» даних $X = X_0 \cup \Delta X$.

На виході формується масив даних $Y = Y_0 \cup \Delta Y$.

Використовуючи співвідношення [4], маємо:

$$X/X_0 = (X_0 \cup \Delta X) \setminus X_0 = \{\Delta X\}, \quad (6)$$

$$Y/Y_0 = (Y_0 \cup \Delta Y) \setminus Y_0 = \{\Delta Y\}. \quad (7)$$

Із виразів (4) і (5) безпосередньо випливає, що послідовна ланцюгова структура детерміновано перетворює похибку вхідних даних залежно від метрологічних станів компонентів S_1 і S_2 . Узагальнена функція перетворення формується шляхом добутку функцій перетворення компонентів ланцюга.

Розглянемо ланцюг паралельної структури (рис. 2).

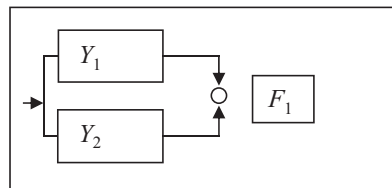


Рис. 2. Ланцюг паралельної структури
Fig. 2. Chain of parallel structure

Результувальний автомат

$$Q = Q_1 \times Q_2; X = X; \quad (8)$$

$$Y = F_1(y_1; y_2), \quad (9)$$

де F_1 — комбінаційна функція, що формує значення вихідного сигналу результувального автомата (суматор).

Тоді функція переходів (перетворення) результувального автомата паралельної структури

$$\delta(Q \times X) = (\delta_1(Q_1 \times X), \delta_2(Q_2 \times X)), \quad (10)$$

а функція виходів

$$\lambda(Q \times X) = F_1(\lambda_1(Q_1 \times X), \lambda_2(Q_2 \times X)). \quad (11)$$

Звідси метрологічна модель результувального автомата виглядає так:

функція перетворення

$$\delta(Q \times (X_0 \cup \Delta X)) = (\delta_1(Q_1 \times X_0) \cup (Q_1 \times \Delta X), \delta_2(Q_2 \times X_0) \cup (Q_2 \times \Delta X)); \quad (12)$$

функція виходів

$$\lambda(Q \times (X_0 \cup \Delta X)) = F_1(Q_1 \times X_0) \cup (Q_1 \times \Delta X), \lambda_2(Q_2 \times X_0) \cup (Q_2 \times \Delta X)). \quad (13)$$

Звідси функція перетворення похибок вхідних даних паралельного ланцюга визначається процедурою, що реалізується комбінаційною функцією F_1 і формується шляхом сумування функцій перетворення компонентів ланцюга.

Для ланцюга зі зворотнім зв'язком (рис. 3)

функція переходів виглядатиме так:

$$\delta(Q \times X) = (\delta_1(Q_1 \times F_2(X \times \lambda_2(Q_2))), \delta_2(Q_2 \times \lambda_1(Q_1 \times F_2(X \times \lambda_2(Q_2))))) \quad (14)$$

а функція виходів

$$\lambda(Q \times X) = \lambda_1(Q_1 \times F_2(X \times \lambda_2(Q_2))), \quad (15)$$

де F_2 — функціональний перетворювач, що реалізує відображення

$$F: X \times Y_2 \rightarrow X_1. \quad (16)$$

Звідси метрологічна модель результувального автомата виглядає так:

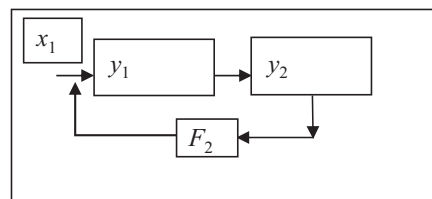


Рис. 3. Ланцюг зі зворотнім зв'язком
Fig. 3. Feedback chain

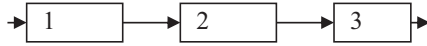


Рис. 4. Послідовна структура ОК
Fig. 4. Sequential structure of the OK

функція перетворення

$$\delta(Q \times (X_0 \cup \Delta X)) = (\delta_1(Q_1 \times F_2(X \cup \Delta X) \times \lambda_2(Q_1)), \delta_2(Q_2 \times \lambda_1(Q_1 \times F_2(X \cup \Delta X) \times \lambda_2(Q_2)))$$

функція виходів

$$\lambda(Q \times (X_0 \cup \Delta X)) = \lambda_1(Q_1 \times F_2(X_0 \cup \Delta X) \times \lambda_2(Q_2)).$$

Розглянемо поведінку функції перетворення похибок вхідних даних для різних видів обчислювальних алгоритмів, що реалізуються ОК під час опрацювання вимірювальної інформації.

ЛАНЦЮГ ПОСЛІДОВНОЇ СТРУКТУРИ

Досліджувалася послідовна структура ОК (рис. 4), яка містить три елементарні ланки.

Ланка 1 реалізує обчислення за формулою $y = 2x$, ланка 2 — $z = y^2 + 1$, ланка 3 — $s = \sqrt{(z^2 + 2)}$.

Вхідне значення $x = 1,0$.

У подальшому вхідне значення x «забруднювалося» похибками вхідних даних із імітованого масиву $\{-0,01; -0,02; -0,03; -0,04; -0,05; +0,01; +0,02; +0,03; +0,04; +0,05\}$.

Результати досліджень подано у таблиці 5.

За даними таблиці 5 можна зробити висновок стосовно переважно лінійної залежності похибки вимірювання Δs від похибки вхідних даних Δx і відсутності залежності функції перетворення ланцюга f від похибок вхідних даних Δx . Окрім цього, якщо

Таблиця 5. Залежність похибок вимірювання від похибок вхідних даних для послідовного ланцюга ОК

Table 5. Dependence of measurement errors on error inputs for the serial circuit OK

Δx	-0,05	-0,03	-0,01	+0,01	+0,03	+0,05
Δy	-0,1	-0,06	-0,02	+0,02	+0,05	+0,1
Δz	-0,39	-0,24	-0,08	+0,08	+0,024	+0,41
Δs	-0,40	-0,24	-0,08	+0,08	+0,024	+0,39
$f_{s/x}$	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

Таблиця 6. Залежність функцій перетворення похибок вхідних даних кожної ланки послідовного ланцюга ОК від похибок вхідних даних

Table 6. Dependence of the functions of converting errors of the input data of each link of the serial circuit OK from the errors of the input data

Δx	-0,05	-0,03	-0,01	+0,01	+0,03	+0,05
$f_{y/x}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$f_{z/y}$	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
$f_{s/z}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$f_{s/x}$	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

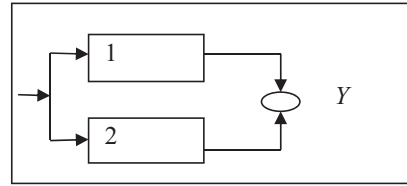


Рис. 5. ОК паралельної структури
Fig. 5. OK parallel structure

зробити розрахунок функцій перетворення кожної ланки (табл. 6), то отримаємо таке співвідношення:

$$f_{s/x} = f_{y/x} \cdot f_{z/y} \cdot f_{s/z}$$

ЛАНЦЮГ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

На рис. 5 подано схему ОК паралельної структури

Ланка 1 реалізує обчислення за формулою $y_1 = x^2 + 1$; ланка 2 — $y_2 = (x + 1)/2x$.

Вхідне значення $x = 0,5$.

У подальшому вхідне значення x «забруднювалося» похибками вхідних даних із імітованого масиву $\{-0,02; -0,05; +0,02; +0,05\}$.

Результати подано у таблиці 7.

Результати досліджень паралельної структури ОК свідчать стосовно цікавої поведінки функції перетворення похибок вхідних даних, а саме: від'ємного знаку функції $f_{z/x}$. Це означає її здатність інвертувати знак похибки вхідних даних, що бачимо за значеннями похибки вимірювання Δz .

Характерним для функції перетворення f_{F1} є зменшення її значень залежно від похибок вхідних даних. Функція перетворення ланцюга паралельної структури формується шляхом сумування функцій перетворення компонентів ланцюга:

$$f_y = f_{y1/x} + f_{y2/x}$$

ЛАНЦЮГ ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Досліджувалися ОК циклічної структури (рис. 6).

Ланка 1 реалізує обчислення за формулою: $y = (x^2 + 3x + 2)/(x^2 + 2)$; ланка 2 — $t = \ln(y^2 + 2)$; ланка 3 — $z = \sqrt{(y^2 + 1)}$.

Вхідне значення $x = 1,0$. Кількість циклів $\kappa = 2$.

Таблиця 7. Залежність похибок вимірювання від похибок вхідних даних для ОК паралельної структури

Table 7. The dependence of measurement errors on error inputs for the OK of a parallel structure

Δx	Δy_1	Δy_2	$f_{y1/x}$	$f_{y2/x}$	f_Y
0,02	-0,02	0,04	-1,0	2,0	1,0
0,05	-0,05	0,1	-1,0	2,0	1,0
-0,02	0,02	-0,1	-1,0	2,0	1,0
-0,05	0,05	-0,04	-1,0	2,0	1,0

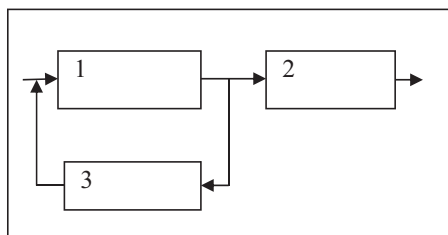


Рис. 6. ОК циклічної структури
Fig. 6. ОК of the cyclic structure

Таблиця 8. Залежність похибок вимірювання від похибок вхідних даних для ОК циклічної структури

Table 8. Dependence of measurement errors on error of input data for ОК of cyclic structure

Δx	Δy	$\Delta z'$	$\Delta z''$	Δt	f_{ix}
+0,03	+0,01	+0,01	0,0	0,0	0,0
+0,05	+0,02	+0,01	0,0	0,0	0,0
+0,07	+0,024	+0,01	0,0	0,0	0,0
+0,09	+0,03	+0,01	0,0	0,0	0,0

У подальшому вхідне значення «забруднювалося» похибками вхідних даних із імітованого масиву {+0,03; +0,05; +0,07; +0,09}.

Результати досліджень подано у таблиці 8.

Результати свідчать стосовно наявності залежності похибок вимірювання Δt від похибок вхідних даних і поведінки функції перетворення f_{ix} , які є характерними для ОК, що реалізують ітераційні процедури [3]. Відмінність у тому, що ОК циклічної структури реалізують т. зв. «просторову» ітерацію на відміну від часової, характерної для ОК, які реалізують ітераційні процедури.

ВИСНОВОК

1.Обчислювальні компоненти вимірювальних систем під час опрацювання вимірювальної інформації детерміновано впливають на результат і похибки вимірювання шляхом змін метрологічного стану обчислювальних компонентів, який визначається зміною значень функції перетворення вхідних даних.

2.Функції перетворення похибок вхідних даних обчислювальних компонентів формуються залежно від структур ОК.

3.Урахування впливу обчислювальних компонентів на похибки вимірювань може дати відчутний ефект у вирішенні проблеми підвищення точності результатів вимірювання, що реалізуються у сучасних та перспективних типах вимірювальних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. О. Кричевець. Дослідження функцій перетворення обчислювальних каналів вимірювальних систем , Тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи», Харків, (O. Krichevets. Research of transformation functions of measuring channels of measuring systems , in Abstracts of the VI of the International scientific and technical conference «Metrology, information-measuring technologies and systems», Kharkiv), — 2017, с/р. 82).
2. О. Кричевець. Формування функцій перетворення похибок вхідних даних обчислювальних ланцюгів на базі теорії кінцевих автоматів // Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (До 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій. — Львів. (O. Krichevets // Formation of functions of transformation of errors of input data of computer circuits on the basis of the theory of finite state machines // Abstracts of IV International scientific-practical conference «Quality management in education and industry: experience, problems and prospects» (To the 100th anniversary of the department of information of measuring technologies. — Lviv). — 2019. — с/р. 103—104.
3. Кричевець О.М. (2018) Дослідження впливу обчислювальних компонентів на похибки результатів вимірювання. «Вимірювальна техніка і метрологія» (Krichevets O. (2018) Investigation of the effect of computational components on measurement error results. Journal. «Measurement Engineering and Metrology», — vol. 79(4), — с/р. 12—16).
4. Кобринский Н.Е., Трахтенброт Б.А. (1962) Введение в теорию конечных автоматов. — М.: Физматгиз, (Kobrinsky N., Trachtenbrot B. (1962) Introduction to the theory of finite automata. — М.: Fizmatgiz. 📄)

Отримано / received: 06.10.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Т.З. Бубелюю (Україна).
Prof. T.Z. Bubela, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.41-48

УДК 681.2.08:53.088; УДК 620.179.14

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ХАЛВИ

Development and Research of the System for Control of Parameters of Manufacture of Halva Technological Process



І. Григоренко, кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем,
e-mail: grigmaestro@gmail.com

С. Григоренко, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики,
e-mail: sngloba@gmail.com

І. Носова, магістр кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем,
e-mail: tedvard.ua@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

І. Hrihorenko, candidate of technical sciences, professor of department of information and measurement technologies and systems,
e-mail: grigmaestro@gmail.com

S. Hrihorenko, candidate of technical sciences, associate professor of department of computer and radioelectronic control and diagnostic systems,
e-mail: sngloba@gmail.com

I. Nosova, master of department of information and measurement technologies and systems,
e-mail: tedvard.ua@gmail.com
National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine

Розглянуто вирішення науково-практичного завдання вдосконалення системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення халви від створення структурної схеми до розроблення схеми електричної принципової. Виконано опрацювання результатів прямих багаторазових вимірювань, отриманих за допомогою системи контролю, а саме, датчика вологості та температури (SHT21). Побудовано рівняння прямої й зворотної регресії та встановлено характер зв'язку між температурою та вологістю за допомогою коефіцієнтів парної кореляції.

Розроблена система контролю надає можливість забезпечити відносну похибку вимірювання, не гіршу ніж 2,5 %. Система контролю пропонується для використання на заводах із виробництва халви з метою контролю основних параметрів технологічного процесу для забезпечення випуску якісної продукції.

The paper considers the solution of the scientific and practical problem of improving the system of control of the parameters of the technological process of halva production from the creation of the structural scheme to the development of the electrical circuit diagram. The results of direct multiple measurements obtained from the control system, namely the humidity and temperature sensor (SHT21), have been pro-

cessed. The equations of direct and inverse regression were constructed and the nature of the relationship between temperature and humidity was established using the pair correlation coefficients.

The developed control system makes it possible to provide a relative measurement error of not less than 2,5 %. Control systems are proposed for use at halva plants with the duty to control the basic parameters of the process to ensure the production of quality products.

The measuring device includes the following primary measuring transducers: raw material moisture sensor (FIZEPR-SW100.11.x), air humidity sensor (SHT21), water temperature sensor, caramel mass, halves during mixing (DS18B20 Dallas Semiconductor model), temperature control sensor halva storage air (ADT7420). ATmega16 was used as the microcontroller. The proposed meter is capable of transmitting data up to 50 m over a 2,4 GHz radio channel with a SPI interface to the microcontroller. This transmission enables the nRF24L01 radio to operate at 2,4 GHz (Wi-Fi frequency).

The need to improve the existing meter has been proved by the use of a radio channel due to the fact that at this time it is necessary to avoid using wired interfaces where possible, due to the inability, sometimes, to draw communication lines due to the presence of already installed equipment.



І. Григоренко



С. Григоренко



І. Носова

Ключові слова: система, похибка, вимірювання, точність, контроль.

Keywords: system, error, measuring, accuracy, control.

На сьогодні в Україні не є перспективним використання дротових каналів зв'язку як у економічному, так і в технічному плані, оскільки вартість мідного дроту постійно зростає і він перебуває під впливом електромагнітного поля, що вносить додаткові завади у процес передавання сигналу. З іншого боку не завжди є можливим прокласти дротові лінії зв'язку, коли у цеху є вже встановлене обладнання. Все це призводить до необхідності використання бездротових ліній зв'язку.

На вибір мережі бездротового зв'язку впливають багато факторів; найбільш важливі з них: відстань, якість зв'язку та економічність застосування. Наявність сучасних технологій надає можливість підібрати оптимальну технологію для передавання даних за конкретних умов виробництва.

Перевага бездротового зв'язку — простота установа. Процедура установа бездротового зв'язку є швидкою та економічно ефективною. Бездротовий зв'язок спрощує також підключення важкодоступних об'єктів. Вартість побудови бездротового зв'язку істотно менша, оскільки при цьому ліквідуються проблеми з організацією прокладання проводів і витрати, пов'язані з цим процесом [1].

Основні етапи виробництва халви та обладнання, необхідного для такого виробництва, представлено

у [2—4]. У роботі [5] доводиться необхідність контролю параметрів технологічного процесу виготовлення халви на кожному етапі виробництва. У роботі [6] представлено розроблення вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення халви. Для передавання даних до ЕОМ було використано інтерфейс RS485. На сьогодні є актуальним використання бездротових ліній зв'язку замість дротових, оскільки не завжди є можливість прокладання дротових ліній, які значно дорожчі за обладнання бездротового зв'язку. Це суттєво зменшує загальну вартість системи контролю та надає можливість виконати систему компактною. У роботі [7] як бездротовий зв'язок пропонується використовувати систему Wi-Fi з частотою 2,4 ГГц, але не вибрано елементної бази та не розроблено електричної принципової схеми такої системи контролю. Залишається також відкритим питання метрологічного опрацювання результатів вимірювань, отриманих завдяки такій системі.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ

Структурна схема вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення халви складається зі системи збору інформації з передавачем та системи приймання й опрацювання інформації з приймачем (рис. 1).

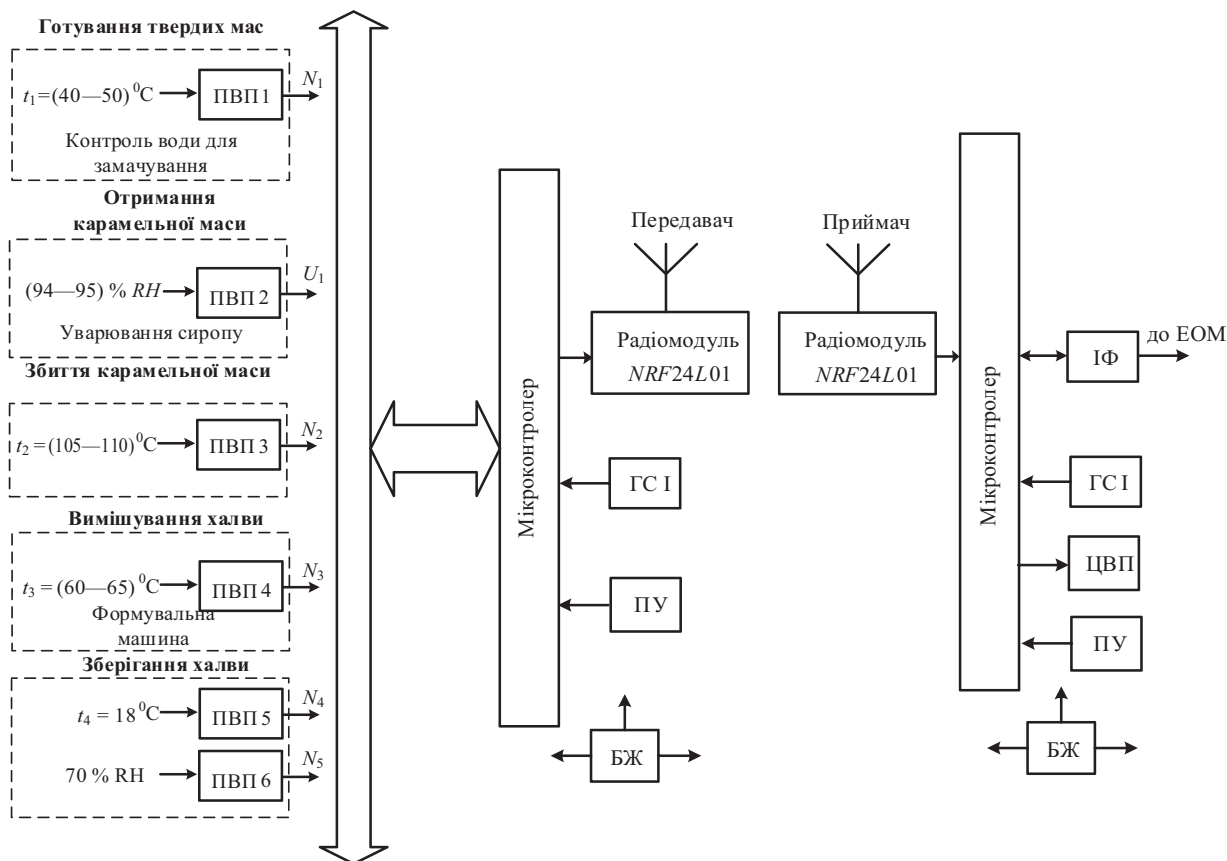


Рис. 1. Структурная схема вимірювача параметрів технологічного процесу
 Fig. 1. Structural diagram of the process parameter meter

Вибірка вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення халви

Sampling of measurements of halva production process parameters

№	X (відносна вологість повітря), %	Y (температура повітря), °C
1	68	19
2	67,8	18,04
3	66,8	16,99
4	62,9	18,01
5	70,9	17,99
6	66,7	17,99
7	66,9	19,02
8	66,8	19,02
9	68,7	17,98
10	66,4	17,99
11	68,3	18,97
12	69,6	16,02
13	67,6	17,99
14	68,4	16,96
15	68,5	17,99
16	68,1	17,03
17	71,1	18,02
18	71,2	18,03
19	68,3	18,15
20	67,8	17,99
21	67,8	16,97
22	64,5	17,99
23	70,6	16,98
24	67	17,99
25	65	17,98
26	69,7	18,03
27	69,1	16,97
28	67,1	17,99
29	70,7	17,03
30	68,8	18,03

проведемо опрацювання результатів прямих багаторазових вимірювань датчиком контролю вологості та температури компанії Sensirion SHT21. Подібні дослідження можуть бути проведені для будь-якого датчика цієї системи контролю.

Вибірку отримано за допомогою мікроконтролерного вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення халви, а саме, датчика контролю вологості та температури в процесі зберігання халви компанії Sensirion SHT 21 (таблиця). Значення відносної вологості повітря приймаємо за X, значення температури повітря приймаємо за Y.

Представлені вибірки із 30 елементів у кожній.

Попереднє опрацювання результатів вимірювань містить:

1. Виявлення аномальних помилок.
2. Визначення оцінок параметрів закону розподілу випадкових величин.

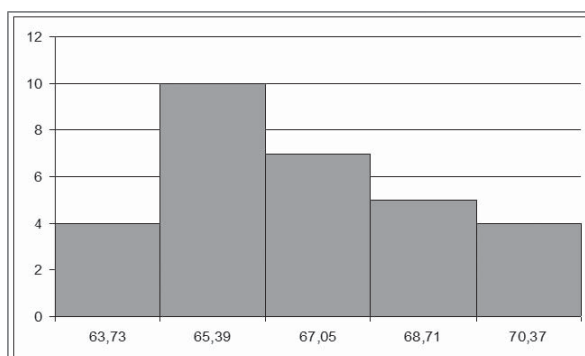


Рис. 4. Гістограма абсолютної частоти потрапляння X в інтервал

Fig. 4. Histogram of absolute frequency of hit X in the interval

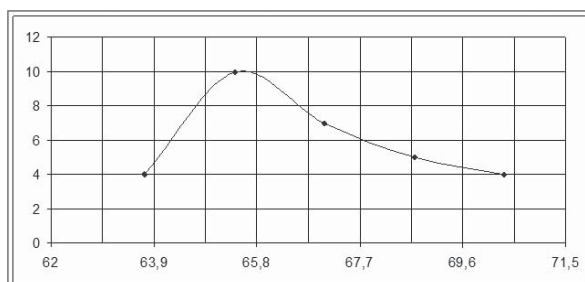


Рис. 5. Функція розподілу X

Fig. 5. X distribution function

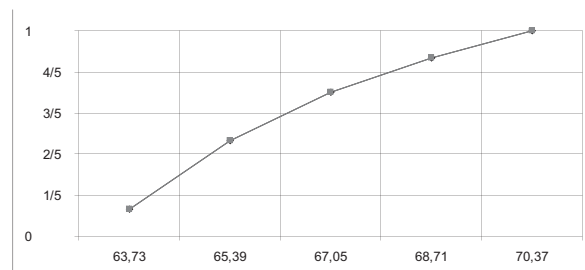


Рис. 6. Кумулятивна лінія X

Fig. 6. Cumulative line X

3. Перевірку гіпотези стосовно закону розподілу випадкових величин.

На основі отриманих розрахунків абсолютної частоти потрапляння X в інтервал побудуємо гістограму, зображену на рис. 4. Функція закону розподілу X зображена на рис. 5; кумулятивна лінія X представлена на рис. 6.

Отримаємо незміщену оцінку дисперсії:

$$\bar{D} = (1/(n-1)) \sum (x_i - \bar{x})^2 = 3,736.$$

Обчислимо незміщену оцінку СКВ за формулою:

$$\bar{S} = \sqrt{(1/(n-1)) \sum (x_i - \bar{x})^2} = 1,933.$$

Розрахуємо центральні моменти 2, 3, 4 порядків:

$$m_2^0 = (1/n) \sum (x_i - \bar{x})^2 = 3,612.$$

$$m_3^0 = (1/n) \sum (x_i - \bar{x})^3 = -3,057.$$

$$m_4^0 = (1/n) \sum (x_i - \bar{x})^4 = 44,026.$$

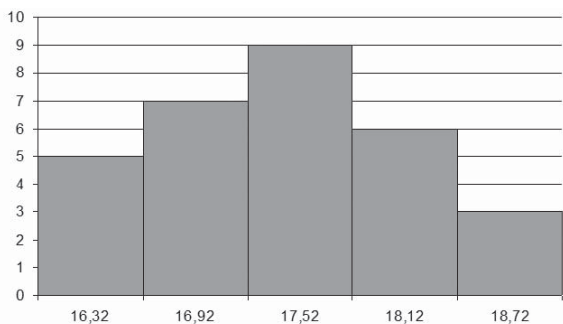


Рис. 7. Гістограма абсолютної частоти потрапляння Y в інтервал

Fig. 7. Histogram of absolute frequency of hit Y in the interval

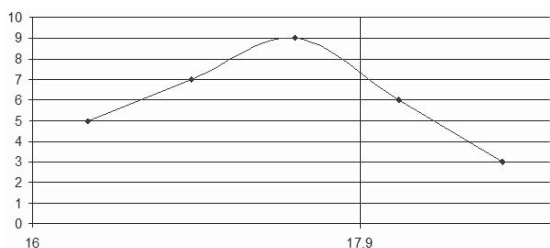


Рис. 8. Функція розподілу Y
Fig. 8. Y distribution function

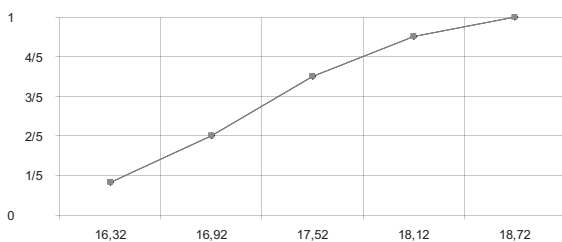


Рис. 9. Кумулятивна лінія Y
Fig. 9. Cumulative line Y

Визначимо вибіркове значення коефіцієнта варіації, яке є відносною мінливістю величини, що спостерігається:

$$V_x = (\bar{S}/\bar{x}) \cdot 100 = 2,841 \%$$

На основі отриманих розрахунків абсолютної частоти потрапляння Y в інтервал побудуємо гістограму, зображено на рис. 7. Функція закону розподілу Y зображену на рис. 8; кумулятивна лінія Y представлена на рис. 9.

Отримаємо незміщену оцінку дисперсії:

$$\bar{D} = (1/(n-1)) \sum (y_i - \bar{y})^2 = 0,494.$$

Обчислимо незміщену оцінку СКВ за формулою:

$$\bar{S} = \sqrt{(1/(n-1)) \sum (y_i - \bar{y})^2} = 0,703.$$

Розрахуємо центральні моменти 2, 3, 4 порядків:

$$m_2^0 = (1/n) \sum (y_i - \bar{y})^2 = 0,478.$$

$$m_3^0 = (1/n) \sum (y_i - \bar{y})^3 = -0,129.$$

$$m_4^0 = (1/n) \sum (y_i - \bar{y})^4 = 0,732.$$

Визначимо вибіркове значення коефіцієнта варіації, яке є відносною мінливістю величини, що спостерігається:

$$V_x = (\bar{S}/\bar{x}) \cdot 100 = 3,941 \%$$

ПОБУДОВА РІВНЯНЬ

ПРЯМОЇ ТА ЗВОРОТНОЇ РЕГРЕСІЇ

Побудова рівняння прямої регресії за методом середніх

Метод середніх — метод, який полягає в тому, що параметр моделі регресії визначається з єдиної умови, умови рівності 0 суми всіх величин, що спостерігаються, відносно середнього значення:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 0, \alpha_i = y_i - \bar{y}.$$

Найбільш ефективний у ситуації, коли потрібно побудувати залежність виду $\hat{y} = bx_i$; значення коефіцієнта b можна визначити за умовою методу середнього:

$$\sum_{i=1}^n (bx_i - \bar{y}) = 0.$$

Рівняння прямої регресії має вид:

$$\hat{y} = b_0 - b_1 x.$$

Коефіцієнт b_0 отримуємо за формулою:

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x};$$

а коефіцієнт b_1 — за формулою:

$$b_1 = \frac{\frac{1}{m} \sum_1^m y_i - \frac{1}{n-m} \sum_{m+1}^n y_i}{\frac{1}{m} \sum_1^m x_i - \frac{1}{n-m} \sum_{m+1}^n x_i}$$

$$b_1 = 0,21.$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} = 17,8 - 0,21 \cdot 68 = 3,52.$$

Підставимо розраховані значення коефіцієнтів у рівняння регресії

$$\hat{y} = 3,52 - 0,21x.$$

Графічне зображення представлено на рис. 10.

Побудова рівняння прямої регресії

із використанням методу найменших квадратів

Метод найменших квадратів (МНК) — математичний метод, який застосовується для розв'язання різноманітних задач, заснований на мінімізації суми квадратів відхилень деяких функцій від шуканих змінних. Він може використовуватися для «вирішення» перевизначених систем рівнянь (коли кількість рівнянь перевищує кількість невідомих), для пошуку рішення у разі звичайних (НЕ перевизначених) нелінійних систем рівнянь, для апроксимації точкових значень деякої функції. МНК є одним із базових методів регресійного аналізу для оцінки невідомих параметрів регресійних моделей за вибірковими даними.

Отримаємо коефіцієнти рівняння регресії за МНК:

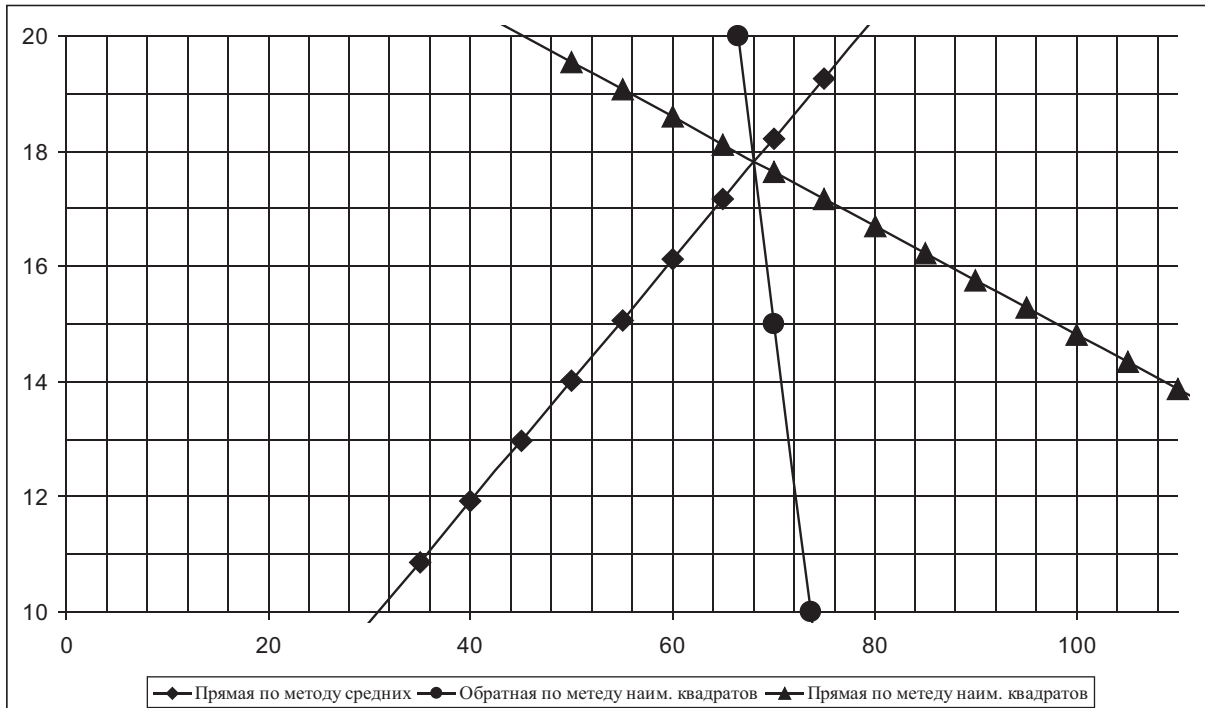


Рис. 10. Графіки рівнянь регресії
Fig. 10. Graphs of regression equations

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, b_0 = 24,26;$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, b_1 = -0,09.$$

Підставимо розраховані значення коефіцієнтів у рівняння регресії:

$$\hat{y} = 24,26 - 0,09x.$$

Графічне зображення представлено на рис. 10.

Побудова рівняння зворотного регресії із використанням методу найменших квадратів

Рівняння зворотного регресії має вид:

$$\hat{x} = b'_0 - b'_1 y.$$

Отримаємо коефіцієнти рівняння регресії

$$b'_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}, b'_0 = 80,76.$$

$$b'_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}, b'_1 = -0,71.$$

Підставимо розраховані значення коефіцієнтів у рівняння регресії:

$$\hat{x} = 80,76 - 0,71y.$$

Графічне зображення представлено на Рис. 10.

Для характеристики зв'язку між двома парними величинами використовуються коефіцієнти парної кореляції

Отримаємо коефіцієнт парної кореляції через середні значення x , y :

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}}, r_{x,y} = -0,258;$$

а коефіцієнт парної кореляції через оцінку значення x , y :

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}) \cdot (y_i - \hat{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2 \cdot (y_i - \hat{y})^2}}, r_{x,y} = 0,83.$$

Оскільки тільки значення коефіцієнта парної кореляції через оцінку значення x , y більше за 0,7, а значення коефіцієнта парної кореляції через середні значення x , y менше від 0,7, то лінії прямої та зворотної регресії слабо корельовані (рис. 10).

Отримані результати надають можливість своєчасно прогнозувати відмову датчика на основі зміни форми закону розподілу та можливість

визначати міжповірочні інтервали для досліджуваного обладнання.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження мікроконтролерного вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення халви. Дослідження проводилося з метою пошуку рішення, щоби уникати використання дротових інтерфейсів.

Доведена необхідність удосконалення наявного вимірювача, завдяки використанню радіоканалу в зв'язку з тим, що наразі виникає необхідність уникати використання дротових інтерфейсів, унаслідок неможливості інколи прокласти лінії зв'язку через наявність уже встановленого устаткування.

У ході дослідження підтверджено гіпотезу сто-

совно нормального закону розподілу результатів вимірювань, отриманих за допомогою системи контролю, а саме, датчика вологості та температури (SHT21); визначено коефіцієнти асиметрії та ексцесу отриманого закону.

Проведено аналіз результатів вимірювання параметрів вологості повітря та температури методом середніх значень і найменших квадратів (пряма та зворотна регресії), який показав збіжність отриманих результатів.

Пристрій, який досліджено, призначений для використання на заводах із виробництва халви з метою контролю основних параметрів технологічного процесу для забезпечення випуску якісної продукції.

Похибка вимірювання не перевищує 2,5 % за кожним із каналів вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Бездротові мережі (Bezdrotovi merezhi) // <http://um.co.ua/1/1-2/1-24478.html>.
2. Технологія виробництва халви (Tehnologiya virobnitstva halvi) // <http://www.zavprogress.ru/tehnologii/produktstva/halvy>.
3. Халва. Користь і шкода халви. Як вибрати халву (Halva. Korist i shkoda halvi. Yak vibrati halvu) // http://ann-recipes.ru/sooth_food/202-halva-polza-vred-halvu-kak-vybrat-halvu.html.
4. Драгилев А.И. (2000) Оборудование для производства сахарных кондитерских изделий: Учеб. для нач. проф. образования. / А.И. Драгилев., Я.М. Сезанаев – Москва.: ИРПО; Изд. Центр «Академия» (Dragilev A.I. (2000) Oborudovanie dlya proizvodstva saharnykh konditerskikh izdeliy: Ucheb. dlya nach. prof. obrazovaniya. / A.I. Dragilev., Ya.M. Sezanaev — Moskva.: IRPO; izd. Tsentr «Akademiya»). — 272 c/s.
5. Григоренко І.В. (2018) Мікроконтролерний вимірювач параметрів технологічного процесу виготовлення халви / І.В. Григоренко, І.В. Носова // XXVI Міжнар. наук. — практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (Hrihorenko I.V. (2018) Mikrokontrolerniy vimiryuvach parametriv tehnologichnogo protsesu vigotvlennya halvi / I.V. Hrihorenko, I.V. Nosova // XXVI Mizhnar. nauk. — prakt. konf.: Informatsiyni tehnologii: nauka, tekhnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya, tom 2. — Kharkiv). — С/С. 35.
6. Григоренко І.В. (2018) Розробка вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення халви / І.В. Григоренко, І.В. Носова // II Міжнародна науково-технічна конференція: Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування України. — Харків (Hrihorenko I.V. (2018) Rozrobka vimiryuvacha parametriv tehnologichnogo protsesu vigotvlennya halvi / I.V. Hrihorenko, I.V. Nosova // II Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya: Aktualni problemi avtomatiki ta priladobuduvannya Ukraini. — Kharkiv). — С/С. 202, 203.
7. Григоренко І.В. (2019) Вдосконалення вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення халви / І.В. Григоренко, І.В. Носова // XXVII Міжнар. наук. — практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. — Харків (Hrihorenko I.V. (2019) Vdoskonalennya vimiryuvacha parametriv tehnologichnogo protsesu vigotvlennya halvi / I.V. Hrihorenko, I.V. Nosova // XXVII Mizhnar. nauk. — prakt. konf.: Informatsiyni tehnologii: nauka, tekhnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya, tom 2. — Kharkiv). — С/С. 35.

Отримано / received: 02.09.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.Ф. Павленком (Україна).
Prof. Yu.F. Pavlenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.49-51

УДК 519.246:52

ОЦІНКА СПЕКТРА ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ В СПРЯМОВАНИХ ПРИЙМАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Evaluation of the Signal Power Spectrum in Directional Receiving Systems

В. Ігнаткін, доктор технічних наук, професор,
e-mail: snayper.as111@gmail.com
О. Саргатов, магістрант,
e-mail: saragtov@mail.ru
Дніпровський державний університет, Україна

V. Ignatkin, doctor of technical sciences, professor,
e-mail: snayper.as111@gmail.com
O. Saragtov, undergraduate,
e-mail: saragtov@mail.ru
Dniprovsky State University, Ukraine

Розглянуто алгоритм, який дозволяє для дискретної вибірки із N значень на проміжку часу $[-T/2, +T/2]$ оцінювати спектр потужності за допомогою фільтра з тією ж самою вузькою спектральною смугою у прямокутному часовому вікні, але з рівнем бічних пелюсток, менших на 4,3 дБ. Наведено приклади декількох «енергетичних» фільтрів. При цьому показано відгуки енергетичного фільтра порівняно з фільтром на основі традиційних часових вікон. Виникають можливості керування як шириною смуги фільтра, так і формою його вершини. Також суттєво збільшується розірваність простору змінних варіювання.

Стосовно спектрального аналізу, йдеться відносно випадку, коли перетворення Фур'є виконується з двома різними часовими вікнами у часі.

Підсумок формується із множників дійсних і уявних частин першого та другого перетворення. При цьому не потрібно певних оптимальних властивостей від кожного із часових вікон, окремо оптимізується тільки кінцевий підсумок. Це ефективно, якщо одне із часових вікон нагадує вікно Кайзера-Бесселя. При цьому проведення згортки після перетворення Фур'є стає трудомістким, потребує багато обчислювальних операцій, та часове вікно краще використовувати безпосередньо до сигналу, який аналізується перед перетворенням Фур'є.

Для таких часових вікон будівництво «енергетичного» фільтра збільшує час аналізу приблизно у два рази. Але швидкість обчислювань не завжди є визначальним фактором, а сумісне використання двох різних вікон замість одного розширює можливості аналізу.

Результати роботи можуть бути використані під час фільтрації приймальної потужності сигналу для різних систем, зокрема, для систем з максимальним придушенням шумової завади.

Перспективно оптимізувати приймальну систему з горизонтальним робочим напрямком

приймання. Задачу оптимізації у цьому випадку вирішують з урахуванням робочого діапазону як для середньої, так і для максимальної завади.

An algorithm which allows for a discrete sampling of N values over a period of time $[-T/2, +T/2]$ to estimate the power spectrum by means of a filter with the same narrow spectral band in a rectangular time window but with a lateral lobe level of less than 4,3 dB. Examples of several «energy» filters are given. This shows the responses of the energy filter versus the filter based on traditional time windows. There are possibilities to control both the width of the filter strip and the shape of its top. The dimension space of the variable variables is also significantly increased.

Regarding spectral analysis, there is a case where the Fourier transform is performed with two different time windows in time.

The result is formed from the factors of the true and invalid parts of the first and second transformations. However, only the final result is optimized individually for each of the time windows. This is effective if one of the time windows resembles a Kaiser-Bessel window. In this case, convolution after the Fourier transform becomes time-consuming, requires many computational operations, and it is better to use a time window directly to the signal that is analyzed before the Fourier transform.

For such time windows, building an «energy» filter increases the analysis time by about half. But the speed of computing is not always the determining factor, and the sharing of two different windows instead of one extends the capabilities of analysis.

The results of the work can be used to filter the receiving power of the signal for different systems, in particular for systems with maximum noise suppression.

Perspective to optimize the receiving system with horizontal receiving direction. In this case, the optimization problem is solved taking into account the operating range for both medium and maximum interference.



В. Ігнаткін



О. Саргатов

Ключові слова: перетворення Фур'є, часове вікно, фільтр, спектральний аналіз.

Keywords: Fourier transform, time window, filter, spectral analysis

Цифрове опрацювання сигналів (ЦОС) має фундаментальне і прикладне значення у сучасній радіотехніці. Методи ЦОС використовуються для розроблення і дослідження радіоелектронних пристроїв, а також для розроблення багатоканальних систем зв'язку і багатоканального смугового аналізу-синтезу сигналів. Удосконалення методів цифрового опрацювання сигналів має важливе техніко-економічне значення в процесах проектування і розроблення цифрових систем, опрацювання інформації, збільшення швидкості передавання повідомлень, захисту інформації.

Мета роботи — оцінити спектр потужності сигналу на основі аналізу його дискретної вибірки із N значень на інтервалі часу $[-T/2, +T/2]$ без традиційного підходу зі застосуванням часових вікон Ханна, Хеммінга, Блекмана та інших [1].

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Вирішується задача оцінювання спектра потужності сигналу на основі аналізу його дискретної вибірки із N значень на інтервалі часу $[-T/2, +T/2]$ без традиційного підходу зі застосуванням часових вікон Ханна, Хеммінга, Блекмана та інших [1]. Зазвичай під час використання дискретного перетворення Фур'є $X(\omega_i)$ з прямокутним часовим вікном спектр потужності оцінюють як $\alpha |Y(\omega_i)|^2$, де $\alpha = \text{const}$, і обчислюють симетричну лінійну комбінацію виду:

$$Y(\omega_i) = X(\omega_i) + a_1 [X(\omega_{i-1}) + X(\omega_{i+1})] + a_2 [X(\omega_{i-2}) + X(\omega_{i+2})].$$

Така лінійна комбінація є згорткою в частотній області й певною модуляцією вихідного прямокутного часового вікна. Наприклад, для вікна Ханна ($a_1 = 0,5$) виникає множник $\cos^2(\pi t/T)$, що дозволяє зменшити рівень бічних пелюсток фільтра за розширення вдвічі смуги фільтрації. Для вікон Ханна і Хеммінга члени $X(\omega_{i+2})$ не використовуються, а формула $|Y(\omega_i)|^2$ містить чотири квадратичних вирази:

$$\begin{aligned} & \bar{X}(\omega_i)X(\omega_i); \\ & b_1 [\bar{X}(\omega_{i-1})X(\omega_{i-1}) + \bar{X}(\omega_{i+1})X(\omega_{i+1})]; \\ & b_2 \{ \bar{X}(\omega_i)[X(\omega_{i-1}) + X(\omega_{i+1})] + \\ & + X(\omega_i)[\bar{X}(\omega_{i-1}) + \bar{X}(\omega_{i+1})] \} / 2; \\ & b_3 \{ \bar{X}(\omega_{i-1})X(\omega_{i+1}) + X(\omega_{i-1})\bar{X}(\omega_{i+1}) \} / 2, \end{aligned}$$

де верхня риска позначає комплексне сполучення; b_1, b_2, b_3 — множники.

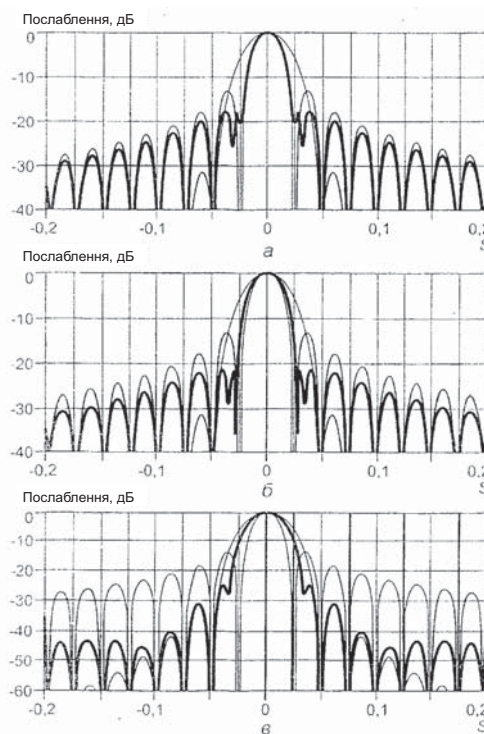
Для побудови спектрального фільтра (Ханна, Хеммінга) змінюють тільки один параметр a_1 замість можливих трьох параметрів b_1, b_2, b_3 , а параметр $\alpha = \text{const}$ вибирають із деяких умов нормуван-

ня, заданих для гармонічного або шумового сигналу. За зміни трьох параметрів замість одного можна очікувати появу рішень з новими властивостями. На рисунку (а) наведено відгуки фільтра на гармонічний сигнал з параметрами $b_1 = -0,01, b_2 = 0,42$ і $b_3 = 0,54$, отриманими простим підбором вручну. Ширина смуги фільтрації практично така ж, як у фільтра з прямокутним вікном, а рівень першої бічної пелюстки зменшився від $-3,5$ до $-17,8$ дБ. За віссю абсцис відкладено параметр $S = \pi \nu T$, де ν — різниця частоти гармонічного сигналу і центральної частоти фільтра $\nu_i \equiv \omega_i / (2\pi)$.

Рисунок (б) відноситься до фільтра, у якого перші бічні пелюстки на 8,8 дБ нижчі, а головна пелюстка за рівнем — 3 дБ найширша на 14 %, ніж у фільтра з прямокутним вікном.

Рисунок (в) ілюструє випадок, проміжний між прямокутним вікном і вікном Ханна. Форма і рівні перших двох бічних пелюсток фільтра з вікном Ханна повторюються, ширина ж головної пелюстки істотно зменшена.

На рисунку також показано відгуки «енергетичного» фільтра порівняно з фільтрами на основі



а) $b_1 = 0,01, b_2 = 0,42, b_3 = 0,54$;
б) $b_1 = 0,02, b_2 = 0,46, b_3 = 0,32$;
в) $b_1 = 0,12, b_2 = 0,78, b_3 = 0,35$

Відгуки на гармонічний сигнал класичних фільтрів з прямокутним вікном і вікном Ханна (тонкі лінії), «енергетичного» фільтра (жирна лінія)
Reviews on the harmonic signal of classical filters with a rectangular window and window Hannah (thin lines), «energy» filter (greasy line)

традиційних часових вікон. Їх побудова не вимагає істотного збільшення часу обчислень порівняно з часом, що витрачається на швидке перетворення Фур'є. Виникають інші можливості управління як шириною смуги фільтра, так і формою його вершини. Повний аналіз властивостей таких «енергетичних» фільтрів є цікавий напрямок дослідження, при цьому використання членів, що містять $X(\omega_{\pm 2})$, істотно збільшує розмірність простору змінних варіювання.

Описаний вище підхід можна застосовувати не тільки для оцінки енергії сигналу в смузі частот, але й за кутової фільтрації прийнятої потужності сигналу для різних антен, зокрема гідроакустичних. Для антен, що мають нееквідистантний крок приймачів, сумарна кількість параметрів варіювання за оптимізації фільтрації може стати достатньо значною.

Окремим випадком розглянутого вище загального підходу стосовно спрямованих приймальних систем є формування двох різних вихідних сигналів у смузі частот для двох різних діаграм спрямованості приймального пристрою і використання усередненого за часом утворення цих двох вихідних сигналів. Утворення двох таких сигналів дозволяє створити область малої чутливості приймального пристрою в широкому діапазоні кутів завдяки збільшенню кількості напрямків з «нульовою» чутливістю, що дає можливість поліпшити виділення потужності сигналу в робочому напрямку.

Цікаво, стосовно спектрального аналізу, розглянути випадок, коли перетворення Фур'є виконується з двома різними часовими вікнами окремо, а результат формується із утворень дійсних і уявних частин першого і другого перетворень. При цьому не потрібно певних оптимальних властивостей від кожного із двох часових вікон окремо, оптимізується тільки кінцевий результат. Такий підхід може виявитися ефективним, якщо одне із часових вікон нагадує вікно Кайзера-Бесселя [1]. У цьому випадку прове-


дення згортки після перетворення Фур'є стає трудомістким, вимагає багато обчислювальних операцій, і часове вікно зручніше застосовувати безпосередньо до аналізованого сигналу до перетворення Фур'є. Для таких часових вікон побудова «енергетичного» фільтра збільшує час аналізу приблизно в два рази. Однак швидкість обчислень не завжди є визначальним фактором, а спільне використання двох різних вікон замість одного розширює можливості аналізу.

Серед великої кількості можливих практичних завдань, до яких можна, перш за все, застосувати «енергетичну» фільтрацію, перспективно оптимізувати вертикальну гідроакустичну антену з горизонтальним робочим напрямком приймання і максимальним придушенням шумової завади від хвилювання поверхні моря. Завдання оптимізації у цьому випадку можна ставити з урахуванням робочого діапазону частот як для середньої, так і для максимальної завади. Позитивний ефект від застосування «енергетичної» фільтрації для приймальних систем з низькою спрямованістю можливо дозволить побудувати широкосмугові приймальні гідроакустичні пристрої, які більш ефективно виділяють потужність слабого сигналу на тлі завади.

ВИСНОВКИ

Вирішено задачу оцінки спектра потужності сигналу на основі аналізу його дискретної вибірки із N значень на інтервалі часу $[-T/2, +T/2]$. Відзначено, що результати роботи можна застосовувати як для оцінки енергії сигналу в смузі частот, так і за кутової фільтрації прийнятої потужності сигналу. Показано перспективи використання отриманих результатів і, зокрема, для приймальних систем з низькою спрямованістю і побудови широкосмугових пристроїв, що виділяють потужність слабого сигналу на тлі завади, наприклад, шумової завади від хвилювання моря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Бендат Дж. Прикладний аналіз випадкових даних / Бендат Дж., Пірсол А. — М.: Мир (Bendat J. Applied Random Data Analysis / Bendat J., Pirsol A. — М.: Mir), 1989. — 540 с/р.
2. Marple S.L. Digital Spectral Analysis. — N.J.:Prentice — Hall, 1987.
3. Harris F.J.//Proc. IEEE. — 1978. — v.66. — N1. — P.51.
4. Graudke T.//IEEE Trans. instrum. Meas. — 1983. — v.im. — 32. — N 2. — P. 350.
5. Offelli C., Petri D.//IEEE Trans. instrum. Meas. — 1990 — v.39. — N 1. — P. 106.
6. Andria G., Savino M., Trotta A.//IEEE Trans. instrum. Meas. — 1989. — v.38. — N4. — P. 856.
7. Nuttall A.H.//IEEE Trans. Acoustics, speech and Signal Proc. — 1981. — v. ASSP-29. — N1. — P. 84.
8. Belega D. // L'Academie Roumaine, Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique. — 2005. — N3. — P.349. 

Отримано / received: 09.10.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А.М. Должанським (Україна).
Prof. A.M. Dolzhanskiy, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.52-55

УДК 677.017

КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СКАНУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Control of Surface Density of Textile Materials Using Automated Scanning System



С. Лісовець, кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих
технологій та виміральної техніки,
e-mail: ser.lis.290171@gmail.com

С. Барилко, кандидат технічних наук,
доцент кафедри,
e-mail: poo4ta@bigmir.net

А. Зенкін, доктор технічних наук,
професор кафедри,
e-mail: as-zenkin02@ukr.net

В. Здоренко, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри,
e-mail: alzd@meta.ua
Київський національний університет технологій
та дизайну, Україна

S. Lisovets, candidate of technical science,
associate professor of department of computer integrated
technology and measurement engineering,
e-mail: ser.lis.290171@gmail.com

S. Barilko, candidate of technical sciences,
associate professor,
e-mail: poo4ta@bigmir.net

A. Zenkin, doctor of technical sciences,
professor of department,
e-mail: as-zenkin02@ukr.net

V. Zdorenko, doctor of technical sciences, professor,
head of department,
e-mail: alzd@meta.ua
Kyiv national university of technology and design,
Ukraine

Визначена важливість контролю поверхневої густини текстильних матеріалів з метою підвищення якості їх виготовлення. Також, внаслідок можливого відхилення поверхневої густини від свого середнього значення у різних точках поверхні, показана необхідність використання автоматизованої сканувальної системи, яка дозволяє переміщувати електроакустичні перетворювачі, які випромінюють і приймають, саме в таку задану точку. Окрім того, наведено варіанти апаратно-програмної реалізації такої сканувальної системи.

The paper demonstrates the importance of controlling the surface density of textiles, which include mainly fabrics, knitted fabrics and nonwoven fabrics, in order to improve the quality of their manufacture.

It considers the most accurate methods of controlling surface density by determining the mass to area ratio of the textile sample. And it is also shown that, in addition to high accuracy, such methods have many fundamental disadvantages: the need to obtain a sample of textile material, low productivity, inability to automate the process of determining surface density, and so on.

In addition, it deals with optical methods for controlling surface density based on the imaging of textile material and its subsequent analysis. However, the presence of factors such as entangle-

ment complexity, the presence of pores, and some others does not fully reveal the potential of optical surface density methods.

The paper also shows that at different points in the surface of the textile material, its surface density may differ significantly from its average value. Therefore, there is a need for an automated scanning system that allows radiating and receiving electroacoustic converters to be moved to exactly the point of the surface of the textile material whose surface density requires measurement.

In order to solve the problem, it was proposed to use a toothed belt gear, and to drive it with the help of step motors controlled through drivers. In turn, to communicate drivers with the control computer, it was proposed to use a microcontroller with an integrated USB interface (for example, manufactured by Microchip Technology Inc.), and software for it to write in one of the high-level programming languages (for example, C #).

This construction of the automated scanning system is due to the fact that the existing means of linear movement, in terms of the design of the scanning system, have a lot of redundancy: too much cost, too much accuracy, the need to use specialized software, and so on.

The use of the proposed linear positioning means will allow the scanning system to have sufficiently high metrological characteristics at a relatively low cost.

Ключові слова: автоматизація, акустичні коливання, драйвер, електроакустичний перетворювач, контролер, поверхнева густина, сканувальна система, текстильний матеріал.

Keywords: automation, acoustic vibrations, driver, electro-acoustic transformer, controller, area density, scanning system, textile material.

До текстильних матеріалів, які достатньо широко застосовуються у сучасному житті, відносяться тканини, трикотаж і неткані матеріали. Текстильні матеріали мають багато технологічних параметрів, одним із яких

є поверхнева густина, яку часто називають поверхневою щільністю або масою на одиницю площі поверхні таких матеріалів. Поверхневу густину визначають різними методами, більшість із яких стандартизована.

Найбільш точні методи — це визначення маси й площі зразка текстильного матеріалу та обчислення поверхневої густини у виді їх відношення. Проте, окрім високої точності, такі методи мають багато принципних недоліків: необхідність отримання зразка текстильного матеріалу, низька продуктивність, неможливість автоматизації процесу визначення поверхневої густини, залежність від температури й відносної вологості навколишнього середовища тощо [1—6].

Достатньо поширеними є методи визначення поверхневої густини шляхом отримання оптичного зображення поверхні текстильного матеріалу з подальшим його аналізом. Наприклад, визначення кількості ниток основи й утку на одиницю довжини за відомих параметрів цих ниток дозволяє достатньо легко розрахувати поверхневу густину. Але наявність таких факторів, як складність переплетіння, наявність пор і деяких інших не дозволяє повністю розкрити потенціал оптичних методів визначення поверхневої густини.

Перспективними є акустичні (ультразвукові) методи визначення поверхневої густини [7—13]. Вони полягають у випромінюванні в сторону текстильного матеріалу модульованих акустичних (ультразвукових) коливань й аналізі прийнятих коливань, які пройшли такий матеріал і/або відбилися від такого матеріалу. Особливістю цих методів контролю є формування акустичного (ультразвукового) пучка невеликого діаметра, приблизно (10...25) мм. Це пов'язано, в основному, з тим, що в електроакустичному тракті використовуються стандартні випромінювачі й приймачі невеликих розмірів. Наприклад, у парі випромінювач-приймач типу T4010A1 (випромінювач) і R4010A1 (приймач) кожний з них має діаметр 10 мм, у парі T4012A1 і R4012A1 — 12 мм, а у парі T4016A2 і R4016A2 — 16 мм.

Отже, якщо текстильний матеріал має значну ширину (типове значення до (2,5...3,0) м) і значну довжину (до (100...150) м і більше), стаціонарне розміщення випромінювачів і приймачів не може забезпечити контролю поверхневої густини в довільній точці за площею такого матеріалу.

Вирішенням такого завдання може бути розміщення кількох випромінювачів і приймачів у виді «лінійки» у такий спосіб, щоби вони перекривали певну частину ширини або всю ширину текстильного матеріалу. Але недоліком такого рішення, поперше, є необхідність використання значної кількості випромінювачів і приймачів. По-друге, акустичні (ультразвукові) випромінювачі й приймачі, основним матеріалом для яких є п'єзоелектрична кера-

міка, мають достатньо значний розкид своїх параметрів (наприклад, пружних констант до $\pm 5\%$, п'єзоелектричних — до $\pm 10\%$, діелектричних — до $\pm 20\%$), і використання такої кількості випромінювачів і приймачів вимагатиме врахування особливостей кожного з них індивідуально, що призведе до суттєвого ускладнення будови електричних схем опрацювання сигналів [14]. По-третє, вдовж такої «лінійки» все одно б залишалися «зони невизначеності», в яких отримати поверхневу густину було б практично неможливо. Окрім того, за використання акустичних (ультразвукових) методів визначення поверхневої густини, які працюють на «проходження», необхідно розташовувати випромінювачі й приймачі по різні сторони від текстильного матеріалу.

Основна мета досліджень полягала у розробленні такої автоматизованої сканувальної системи для контролю поверхневої густини текстильних матеріалів, яка б дозволяла переміщувати точку контролю в будь-яке місце текстильного матеріалу за всією площею робочого простору, який визначався розмірами робочого стола (приблизні розміри 1 м \times 2 м). При цьому похибка позиціонування не повинна була перевищувати ± 5 мм, а час переміщення між будь-якими двома точками робочого простору — (1,5...3,0) с.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Поставлене завдання було розв'язано у виді макета сканувальної системи (рис. 1).

Як можна побачити з рис. 1, необхідно було переміщувати акустичні (ультразвукові) випромінювач і приймач 5 по довжині текстильного матеріалу за допомогою каретки осі X приблизно на 2 м, а по ширині — за допомогою двох кареток осі Y (верхньої й нижньої) приблизно на 1 м. Для цього було використано пасові зубчаті передачі з при-

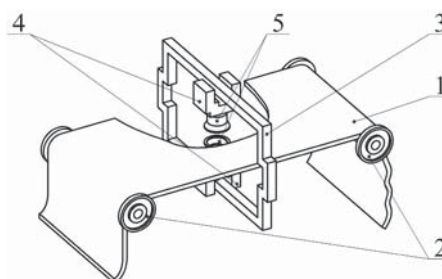


Рис. 1. Загальний вид макета сканувальної системи: 1 — текстильний матеріал; 2 — підтримувальні валки; 3 — каретка осі X; 4 — каретки осі Y; 5 — акустичні (ультразвукові) випромінювач і приймач
Fig. 1. General view of the model of the scanning system: 1 — textile material; 2 — supporting rolls; 3 — axis X carriage; 4 — axis Y carriages; 5 — acoustic (ultrasonic) radiator and receiver

водом від крокових двигунів, а самі каретки осей X і Y розміщено на лінійних напрямних з лінійними підшипниками. Як крокові двигуни було використано крокові двигуни типорозмірів *NEMA17* і *NEMA23*, зокрема, *17HS8401* (струм 1,7 А) і *23HS6403* (струм 2,5 А); для керування двигунами — драйвери *CW5045* виробництва *CNC4YOU Ltd*.

За використання драйверів *CW5045* було прийнято рішення відмовитися від стандартних апаратно-програмних засобів керування ними (типу плати розв'язки *NC-Studio* і *PCI*-контролера до неї). Це було пов'язано з певними особливостями таких засобів, такими як підтримання не всіх версій операційних систем *Windows*, надлишковість (наприклад, можливість керування шпинделем), надмірна вартість, необхідність вивчати роботу спеціалізованого програмного забезпечення і таке інше. Взамін було запропоновано використання мікроконтролерів *ATmega8U2*, *ATmega16U2* або *ATmega32U2* виробництва *Microchip Technology Inc.*, які мають убудований *USB*-інтерфейс. Використання зазначених мікроконтролерів для керування роботою драйверів *CW5045* (і аналогічних ним) дозволяло створити недорогу автоматизовану сканувальну систему для контролю поверхневої густини текстильних матеріалів.

Фрагмент схеми підключення мікроконтролера *ATmega32U2* до одного драйвера *CW5045* наведено на рис. 2. Оскільки *USB*-інтерфейс міг забезпечити струм живлення до 0,5 А, то мікроконтролер *ATmega32U2* можна було живити безпосередньо від такого інтерфейсу.

Оскільки в сканувальній системі використовується три драйвери *CW5045* (один для каретки осі X і два для кареток осі Y), то інші два драйвери підключалися до інших виводів мікроконтролера *ATmega32U2* (відповідно, до *PB3*, *PB4*, *PB5* і *PB6*, *PB7*, *PC7*).

Власне споживання струму мікроконтролером *ATmega32U2* не перевищує 20 мА, кожний із входів *PUL+*, *DIR+* і *ENA+* споживає не більше 15 мА — отже, загальне споживання струму від лінії *VBUS USB*-інтерфейсу не перевищувало приблизно

$$20 \text{ мА} + 3 \times (15 \text{ мА} + 15 \text{ мА} + 15 \text{ мА}) = 155 \text{ мА}. \quad (1)$$

Вхід *ENA+* дозволяв (лог. 0) або забороняв (лог. 1) роботу драйвера *CW5045* (за замовчуванням робота драйвера *CW5045* дозволена), а вхід *DIR+* дозволяв пряме (лог. 1) або зворотне (лог. 0) обертання крокового двигуна. Подавання прямокутних імпульсів на вхід *PUL+* з частотою до 100 кГц дозволяло здійснювати поворот вала крокового двигуна кожного разу на один крок. По суті мікроконтролер *ATmega32U2* є інтерфейсним блоком для обміну даними між драйверами *CW5045* (з одного боку) і персональним комп'ютером (з іншого).

Програмування *ATmega32U2* здійснювалося у середовищі *Atmel Studio 7* мовою програмування C з використанням бібліотеки *Lufa (Lightweight USB Framework for AVR)*.

Програмне забезпечення для персонального комп'ютера створювалося у середовищі програмування *Visual Studio 2019* з використанням пакету *Windows Driver Kit 10*. При цьому *ATmega32U2* розглядався як *HID*-пристрій. Відповідно до специфікації, максимальна частота опитування *ATmega32U2* зі сторони персонального комп'ютера становила 1 кГц за максимального розміру пакету 64 байт, що обмежувало швидкість обміну значенням

$$1000 \times 64 \text{ байт/с} = 64000 \text{ байт/с}. \quad (2)$$

Це значно менше швидкості обміну даними *USB*-модуля мікроконтролера *ATmega32U2* у режимі *Full-speed* (до 12 Мбіт/с), але набагато перевищує потреби автоматизованої сканувальної системи.

У процесі роботи макета сканувальної системи (рис. 1) було проведено визначення поверхневої густини тканин бязь *Gold* (номінальна поверхнева густина (125...130) г/м²) у вихідному і розтягнутому станах з одночасним руйнівним контролем такої густини шляхом вирізання частин тканин бязь *Gold* відомої площі, зважуванням цих частин на вагах і розрахунком поверхневої густини за формулою. Результати акустичного контролю засвідчили непоганий збіг з результатами руйнівного контролю: відносна похибка не перевищувала 10 % за середнього значення (4...6) % у різних точках поверхні тканин бязь *Gold*.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Автоматизація переміщення електроакустичних перетворювачів з метою задання точки контролю поверхневої густини текстильних матеріалів дозволяє підвищити точність і швидкість визначення поверхневої густини, а використання готових драйверів разом із власним мікроконтролерним інтерфейсним блоком дозволяє знизити вартість обладнання.

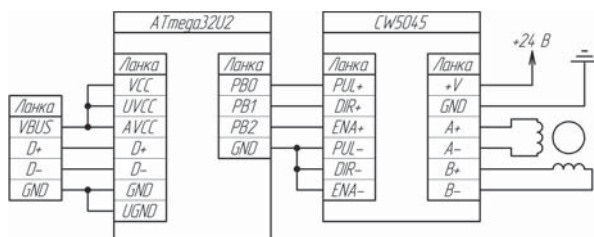


Рис. 2. Фрагмент схеми підключення мікроконтролера *ATmega32U2* до драйвера *CW5045*

Fig. 2. Fragment of the scheme of connection of the *ATmega32U2* microcontroller to the driver of *CW5045*

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ EN 984:2005 Покриви текстильні на підлогу. Метод визначення поверхневої щільності лицьового шару голкопробивних покривів на підлогу (DSTU EN 984:2005 Covers textile on a floor. A method of determination of area density front a layer of needle-penetrative covers on a floor).
2. ДСТУ ISO 139:2007 Матеріали текстильні. Стандартні атмосферні умови для кондиціювання та випробування (DSTU ISO 139:2007 Materials textile. Standard atmospheric conditions for conditioning and test).
3. ДСТУ ГОСТ 23785.4:2003 Тканина кордна. Метод визначення лінійних розмірів, щільності за основою і утоком, поверхневої щільності (DSTU GOST 23785.4:2003 Fabric of a kordn. A method of determination of the linear sizes, density behind a basis and a duck, area density).
4. ДСТУ EN 29073-1:2018 Матеріали текстильні. Методи випробування нетканних матеріалів. Частина 1. Визначення поверхневої щільності (DSTU EN 29073-1:2018 Materials textile. Test methods of nonwoven fabrics. Part 1. Determination of area density).
5. ДСТУ ISO 3801:2019 Текстиль. Тканини. Визначення маси на одиницю довжини та маси на одиницю площі (DSTU ISO 3801:2019 Textiles. Fabrics. Determination of weight per unit length and masses per unit area).
6. ДСТУ ISO 7211-6:2007 Матеріали текстильні. Методи аналізу структури тканини. Частина 6. Метод визначення поверхневої густини тканини (DSTU ISO 7211-6:2007 Materials textile. Methods of the analysis of structure of fabric. Part 6. Method of determination of area density of fabric).
7. ДСТУ ISO 9073-1:2008 Матеріали текстильні. Методи випробування нетканних матеріалів. Частина 1. Метод визначення поверхневої густини (DSTU ISO 9073-1:2008 Materials textile. Test methods of nonwoven fabrics. Part 1. Method of determination of area density).
8. Зенкін А.С. (2018) Удосконалення акустичного безконтактного контролю матеріалів із складною внутрішньою структурою / А.С. Зенкін, В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець // Метрологія та прилади (Zenkin A.S., Zdorenko V.G., Barylko S.V., & Lisovets S.N. (2018). Improvements of acoustic non-contact control of materials with complex internal structure [Udoskonalennia akustychnoho bezkontaktного kontroliu materialiv iz skladnoiu vnutrishnoiu strukturoiu]. Metrology and devices, 3 (71), 47—51 [in Ukraine]). — № 3(71). — С/С. 47—51.
9. Здоренко В.Г. (2018) Моделювання роботи електроакустичного тракту з об'єктом дослідження / В.Г. Здоренко, С.М. Лісовець, С.В. Барилко, О.П. Яненко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Zdorenko V.G., Lisovets S.N., Barylko S.V., & Yanenko A.F. (2018). Simulation of electroacoustic path operation with the subject of investigation [Modeliuvannia roboty elektroakustychnoho traktu z ob'iektom doslidzhennia]. Measuring and computer facilities in technological processes, 2 (62), 117—121 [in Ukraine]). — № 2 (62). — С/С. 117—121.
10. Здоренко В.Г. (2007) Ультразвуковий пристрій для технологічного контролю якості текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, Н.М. Защепкіна // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну (Zdorenko V.G. & Zashchepkina N.N. (2007) Ultrasonic device for technological quality control of textile materials [Ultrazvukovy prystrii dla tekhnolohichnoho kontroliu yakosti tekstylnykh materialiv]. Bulletin of the Kiev national university of technologies and design, 5 (37), 40—43 [in Ukraine]). — № 5 (37). — С/С. 40—43.
11. Здоренко В.Г. (2013) Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник Хмельницького національного університету (Zdorenko V.G. & Barylko S.V. (2013) Researches of passing of a pulse ultrasonic signal through fabric at control of area density [Doslidzhennia prokhozhenia impulsnoho ultrazvukovoho syhnalu kriz tkanynu pry kontroli poverkhnivoi shchilnosti]. Bulletin of the Khmelnytskyi National university, 3, 90—96 [in Ukraine]). — 2013. — № 3. — С/С. 90—96.
12. Здоренко В.Г. (2018) Дослідження застосування ультразвукового безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко, С.М. Лісовець, Т.В. Лебедюк // Вісник Херсонського національного технічного університету (Zdorenko V.G., Barylko S.V., Barylko E.V., Lisovets S.N. & Lebedyuk T.V. (2018) Researches of application of an ultrasonic contactless method of definition of process parameters for weaving process [Doslidzhennia zastosuvannia ultrazvukovoho bezkontaktного методu vyznachennia tekhnolohichnykh parametriv dla protsesu tkatstva]. Bulletin of the Kherson national technical university, 4(67), 152—161 [in Ukraine]). — № 4(67). — С/С. 152—161.
13. Здоренко В.Г. (2019) Застосування фазового та амплітудно-фазового акустичних методів для автоматизованого контролювання поверхневої щільності текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець, Д.О. Шипко, Ю.О. Дерій // Стандартизація, сертифікація, якість (Zdorenko V.G., Barylko S.V., Lisovets S.N., Shipko D.A. & Deriy J.A. (2019) Applications phase and amplitude phase acoustic methods for the automated monitoring area density of textile materials [Zastosuvannia fazovoho ta amplitudno-fazovoho akustychnykh metodiv dla avtomatyzovanoho kontroliuвання poverkhnivoi shchilnosti tekstylnykh materialiv]. Standardization, certification, quality, 2 (114), 86—94 [in Ukraine]). — № 2(114). — С/С. 86—94.
14. Zdorenko V. (2018) The use of ultrasonic method for determining the basis weight of textile materials / V. Zdorenko, O. Kuzymchuk, S. Barylko, L. Melnyk // The Journal of The Textile Institute. . Vol. 109. Issue 3. P. 410—418.
15. ГОСТ 12370-80 Материалы пьезокерамические. Методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов (GOST 12370 80. Piezoceramic materials. Test methods), 1980. 📄

Отримано / received: 10.10.2018.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.А. Клименком (Україна).
 Prof. S.A. Klymenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.56-61

УДК 534.6.08

ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ В ЗАВДАННІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ ЕКСПЛУАТОВАНИХ БУДИНКІВ І СПОРУД

Problems of Development and Implementation of Ultrasonic Pulse Method in the Problem of Measurement of Parameters for Determination of Physical-Mechanical Characteristics of Concrete Maintained Buildings and Constructions



Я. Серіков, кандидат технічних наук, професор,
Харківський національний університет міського
господарства ім. А.М. Бекетова, Україна,
e-mail: yserikov@yandex.ru

Ya. Serikov, candidate of technical sciences, professor,
O.M. Beketov National University
of Urban Economics in Kharkiv, Ukraine,
e-mail: yserikov@yandex.ru

*Будівельна галузь України, зарубіжних країн включає на-
прям подовження життєвого терміну експлуатованих буді-
вель. Він містить дослідження фізико-механічних характе-
ристик бетону, які можливо виконувати ультразвуковим ім-
пульсним методом. Його впровадженню перешкоджають схе-
мотехнічні недоліки приладів, які є наслідком недостатньо-
го аналізу процесу вимірювання за виробничих умов. Описано
основні напрями вдосконалення ультразвукових приладів, реалі-
зація яких дозволить вирішити розглядувану проблему.*

*The current stage of development of the construction industry
of Ukraine and foreign countries contains the direction to extend the
life of the operated construction projects. This direction is directly re-
lated to the research of physical and mechanical characteristics of
concrete as the main building material. A significant number of such
studies can be performed using the ultrasonic pulse method. But de-*

*spite its potential practice shows the insufficient level of use of this
method. Thus, this method, in addition to determining the strength
of concrete, allows to determine its characteristics such as the level
of crack formation, geometric parameters of the planes of stratifica-
tion in monolithic concrete, and the like. The system analysis of tech-
nical characteristics of serial ultrasonic devices that are produced in
Ukraine and foreign countries is carried out. The results of the analy-
sis revealed that their technical characteristics allow measurements,
mainly to determine the strength, uniformity of concrete. These de-
vices also do not allow to measure vibration, noise and electrical in-
terference, which is typical for production conditions. The conducted
researches allowed to reveal the main directions of improvement of
serial ultrasonic devices, Metrology. This allows us to solve the prob-
lem of expanding the application of this method in the practice of
non-destructive testing of physical and mechanical characteristics of
concrete operated construction projects.*

Ключові слова: експлуатовані будівельні об'єкти, життєвий термін, бетон, фізико-механічні характеристики, ультразвуковий імпульсний метод, прилади, вимірювання, вдосконалення приладів.

Keywords: operated construction objects, life span, concrete, ultrasonic pulse method, devices, measurement, improvement of devices.

Дослідження надійності експлуатованих бетонних і залізобетонних виробів, кон-
струкцій і споруд, їх стану в процесі експлуатації, під час реконструкції, а та-
кож з метою визначення можливості подовження їх життєвого терміну є актуальним
завданням на сучасному етапі розвитку як будівельної галузі, так і економіки дер-
жави в цілому. Причому, як показують відповідні публікації, спостерігається актив-
ний розвиток цього напрямку не тільки в Україні, а й у зарубіжних країнах [1—3].

Невід'ємним етапом у процесі вирішення цього завдання є подальший розвиток
і вдосконалення неруйнівних методів, приладів, метрологічного забезпечення, при-
значених для вимірювання відповідних параметрів, визначення характеристик бе-
тону як основного будівельного матеріалу. *Метою реалізації цього етапу* є підви-
щення точності вимірювань, достовірності й надійності результатів оцінки техніч-
ного стану будівель, конструкцій, будівель і споруд, що перебувають в експлуатації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Результати дослідження потенційних можливостей неруйнівних методів кон-
тролю в цій галузі дають можливість сформулювати висновок, що організацію



© Серіков Я., 2019

вимірювального процесу для визначення, дослідження необхідних фізико-механічних, структурних характеристик бетону у виробках реально організувати на основі вимірювання параметрів інформаційного сигналу пружних хвиль, тобто — ультразвукового часового імпульсного методу [4, 6, 7].

Необхідність удосконалення приладового та метрологічного забезпечення цього методу контролю визначається тим, що за його застосування може бути вирішений ряд завдань, що є важливими під час обстеження бетону експлуатованих будівельних об'єктів. На основі цього методу неруйнівного контролю є реальними розроблення й реалізація як лабораторних, так і портативних контрольно-вимірювальних засобів і систем, що дають можливість вимірювати необхідні характеристики інформаційного сигналу з необхідною точністю, вірогідністю й достовірністю результатів. При цьому використання таких приладів не потребує високого рівня освіти операторів, а сам процес вимірювання, в основному, характеризується достатньою простотою.

Причому на базі розглядуваного методу неруйнівного контролю можлива реалізація вимірювального процесу не тільки з метою визначення фізико-механічних характеристик, міцності бетону, а й, за відповідного метрологічного та приладового забезпечення, таких його характеристик, наприклад, як тріщинуватість, наявність мікротріщин, однорідність міцності, визначення наявності й геометричних параметрів площин розшарування в монолітному бетоні [4, 8, 9].

За застосування цього методу в основу як базову покладено кореляційну залежність між фізико-механічними характеристиками бетону і параметрами інформаційного сигналу, тобто залежність «міцність бетону — швидкість поширення ультразвукових хвиль». Узагальнену функціональну схему пристрою, що реалізує ультразвуковий часовий імпульсний метод, наведено на рис. 1.

Статистичне опрацювання результатів експериментів, проведених автором, а також і опублікова-

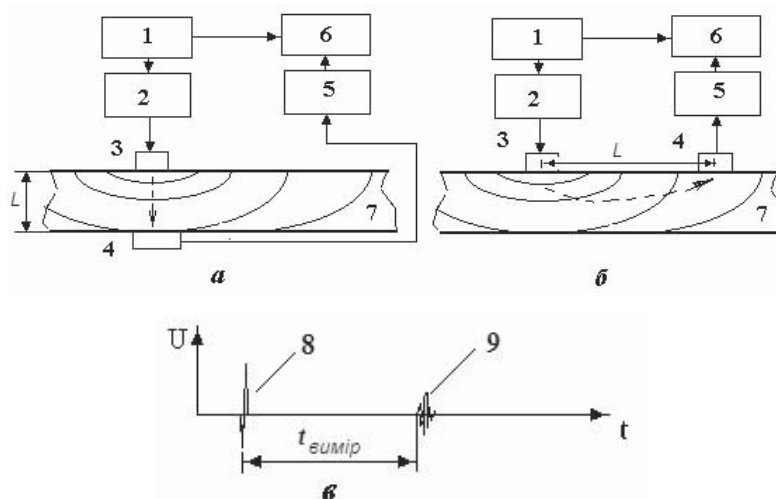


Рис. 1. Узагальнена функціональна електрична схема пристрою, що реалізує ультразвуковий часовий метод: а — розміщення п'єзоелектричних перетворювачів протилежно, з двох сторін досліджуваного виробу; б — розміщення п'єзоелектричних перетворювачів на одній поверхні виробу; в — типові часові діаграми роботи пристрою:

- 1 — синхронізатор; 2 — генератор зондувальних імпульсів; 3, 4 — випромінювальний і приймальний п'єзоелектричні перетворювачі; 5 — підсилювач інформаційного сигналу; 6 — блок вимірювання з індикатором; 7 — об'єкт контролю; 8 — зондувальний імпульс; 9 — інформаційний сигнал; $t_{\text{вимір}}$ — час поширення ультразвукових коливань від випромінювального до приймального п'єзоелектричних перетворювачів

Fig. 1. Generalized electrical circuit diagram of the device implementing the ultrasonic time method: a — location of piezoelectric converters, opposite, on both sides of the product under study; б — the location of piezoelectric converters on one surface of the product; в — typical time charts of the device: 1 — synchronizer; 2 — probe impulse generator; 3, 4 — radiating and receiving piezoelectric converters; 5 — an amplifier of information signal; 6 — measuring block with indicator; 7 — object of control; 8 — probing impulse; 9 — information signal; $t_{\text{measurement}}$ — the time of the propagation of ultrasonic vibrations from the radiating to the receiving piezoelectric converters

них літературних даних засвідчує, що цей метод, у процесі вимірювання параметра швидкості поширення ультразвукових хвиль, дозволяє визначити міцність бетону у виробках, конструкціях і спорудах з похибкою в межах (8...12) % залежно від типу бетону. Така похибка є допустимою, оскільки точність визначення цієї характеристики бетону за пресових випробувань складає (10...15) % [4, 5].

Незважаючи на достатні потенційні точність, достовірність і надійність вимірювань, використання ультразвукового часового імпульсного методу для діагностики бетону в експлуатованих конструкціях, будівлях і спорудах, зі застосуванням серійних приладів за виробничих умов не набуває широкого впровадження.

Проведений системний аналіз такого положення, вивчення характеристик і функціональних схем ультразвукових приладів, що засновані на цьому методі

й серійно випускаються промисловістю як в Україні, так і в зарубіжних країнах, надав можливість визначити такі його основні причини. (Під час аналізу не досліджуються характеристики приладів, що реалізують, наприклад, такий метод як відрив зі сколюванням бетону та ін. [10]. Це зумовлено тим, що процес визначення міцності бетону за цим методом характеризується низькою оперативністю, тобто потребує визначеного достатньо тривалого відрізку часу).

1. Головною причиною такого становища є відсутність системного підходу, аналізу умов використання приладів за виробничих умов, урахування типу, часу експлуатації досліджуваного бетону, що повинно враховуватися на етапах їх розроблення, налагодження й випробування.

2. Функціональні й, як наслідок, принципів електричні схеми ультразвукових приладів, що засновані на цьому методі й випускаються промисловістю як в Україні, так і в зарубіжних країнах, в основному, не дозволяють отримувати надійних результатів вимірювання за наявності вібраційних та акустичних впливів, що можуть мати місце, наприклад, від працюючого промислового обладнання, транспорту (в тому разі, якщо будівельний об'єкт дослідження розташований поблизу автомагістралі, автошляхів, у зоні метрополітену) тощо. Тобто функціонально не передбачено можливості захисту приймально-підсилювального тракту приладів від завад такого типу [11]. Вплив таких завад може знижувати достовірність даних вимірювання, викликати збій у роботі приладів.

3. Функціональні й принципів електричні схеми аналізованих ультразвукових приладів не дозволяють проводити надійних вимірювань за наявності електричних завад. Це зумовлено тим, що в них не передбачено можливості захисту приймально-підсилювального тракту від завад цього типу. Такі завади можуть мати місце від кабелів живлення промислових електроенергетичних установок, силового електричного обладнання як за їх комутаційних режимів, так і за стаціонарної роботи. Негативний вплив завад цього типу також полягає у можливо-му зниженні достовірності даних вимірювання, надійності вимірювального процесу.

4. У процесі проектування частотних характеристик випромінювально-приймального і, очевидно, й підсилювального тракту ультразвукових приладів недостатньо враховані типи бетонів, що мають підлягати дослідженню (середньої міцності на щільних заповнювачах, легкі на пористих заповнювачах, легкі на щільних заповнювачах тощо). Необхідність

урахування цих характеристик бетону зумовлена значною різницею у коефіцієнтах загасання ультразвукових коливань різних частот залежно від типу бетону, його структури. Цей недолік приладів може призводити до значного зниження точності вимірювань контрольованих параметрів інформаційного ультразвукового сигналу і, як наслідок, — до зниження точності й вірогідності даних контролю фізико-механічних характеристик бетону в цілому. Це визначається тим, що, наприклад, за вимірювання часу (швидкості) поширення ультразвукових коливань у бетоні чи іншому матеріалі фіксація моменту дії інформаційного сигналу на приймальний п'єзоелектричний перетворювач може відбуватися не за так званим «першим вступом» (рис. 2.а, поз. 3), а за більш пізнім (рис. 2.б).

При цьому таке положення зумовлює хибне вимірювання часу поширення ультразвукових коливань від випромінювального до приймального п'єзоелектричних перетворювачів $t_{\text{вимір}2}$ (рис. 2.б).

У цьому випадку утворюється похибка вимірювання $\Delta t_{\text{вимір}}$, що в кінцевому результаті призводить і до зниження точності визначення контрольованої характеристики бетону, наприклад, його міцності. Так, опубліковані дані свідчать, що похибка вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у бетоні на 1 % зумовлює формування додаткової похибки у визначенні його міцності в діапазоні (3...6) %, залежно від типу й міцності бетону.

5. Амплітудно-частотні характеристики випромінювально-приймальних і підсилювальних трактів серійних ультразвукових приладів запроєктовані так, що не завжди можуть забезпечувати проведення вимірювання необхідних параметрів інформаційних сигналів, а отже й виконувати дослідження фізико-механічних і структурних характеристик бетонів.

Це стосується, в основному, дослідження бетонів низької міцності, таких, що характеризуються визначеним ступенем тріщинуватості, тощо; легких бетонів, а також за необхідності виконувати вимірювання за достатньо значних відстаней (баз вимірювання) між випромінювальним і приймальним п'єзоелектричними перетворювачами (більших, ніж 1, 2, 5 м). Проведення таких вимірювань необхідне за дослідження бетонів у експлуатованих будівельних об'єктах, особливо у спорудах із монолітного бетону.

Це зумовлено такими обставинами. Частотний діапазон ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів, що входять до комплексу сучасних ультразвукових приладів, які серійно виготовляються,

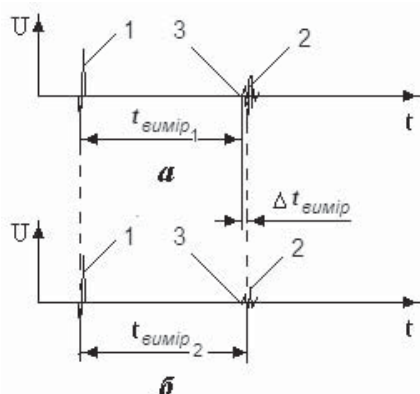


Рис. 2. Типова часова діаграма роботи приладу за вимірювання часу поширення ультразвукових коливань у матеріалі: а — за дослідження бетону середньої міцності на щільних заповнювачах; б — за дослідження легкого бетону на пористих заповнювачах;

1 — зондувальний імпульс; 2 — інформаційний сигнал; 3 — «перший вступ» інформаційного сигналу; $t_{\text{вимір}1}$ — час поширення ультразвукових коливань у бетоні від випромінювального до приймального п'єзоелектричних перетворювачів; $t_{\text{вимір}2}$ — хибно вимірений час поширення ультразвукових коливань у бетоні від випромінювального до приймального п'єзоелектричних перетворювачів; $\Delta t_{\text{вимір}}$ — похибка вимірювання часу поширення ультразвукових коливань у бетоні від випромінювального до приймального п'єзоелектричних перетворювачів

Fig. 2. A typical timeline of the device's operation when measuring the propagation time of ultrasonic vibrations in the material: a — in the study of medium-strength concrete on dense aggregates; b — in the study of light concrete on porous fillers; 1 — probing impulse; 2 — information signal; 3 — «first introduction» of the information signal; $t_{\text{measurement}1}$ — time of distribution of ultrasonic oscillations in concrete from radiating to receiving piezoelectric converters; $t_{\text{measurement}2}$ — false-measured time of the propagation of ultrasonic vibrations in concrete from radiating to receiving piezoelectric converters; $\Delta t_{\text{measurement}}$ — is the error of measuring the time of propagation of ultrasonic oscillations in concrete from the radiation to the receiving piezoelectric converters

і як наслідок амплітудно-частотні характеристики їх випромінювальних і підсилювальних трактів містяться, як правило, в діапазоні частот (50...100) кГц, напруга зондувальних сигналів — до 500 В. (Наприклад, ультразвуковий прилад УК-39 (Україна), вимірювач міцності будівельних матеріалів (бетону) NOVOTEST ИПСМ-У+Т+Д (Росія) та ін.). За поверхневого прозвучування бетону (встановлення п'єзоелектричних перетворювачів на одній поверхні виробу) за допомогою таких приладів, як правило, використовують фіксовану базу вимірювання (відстань між випромінювальним і приймальним перетворювачами) — 120 мм [11].

Відмінним є дефектоскоп бетону *Pundit* (Швейцарія,

компанія *Proceq*), в якому реалізовано такі технічні дані: частотний діапазон зондувальних сигналів — (24...500) кГц, напруга зондувальних сигналів — до 600 В. Бази вимірювань за поверхневого прозвучування — не вказано [12]. До такого класу приладів можливо потрібно віднести й дефектоскоп ПУЛЬСАР-2.2. Як впливає із його технічних характеристик, у ньому забезпечено підвищене відношення «сигнал — шум» внаслідок більш високої напруги збудження випромінювального ультразвукового перетворювача, але нижче зазначено, що ця напруга становить 600 В, тобто вона не є підвищеною порівняно з характеристиками наведених вище приладів [11].

Аналіз класичних залежностей коефіцієнта загасання (δ) ультразвукових коливань від частоти випромінювального (зондувального) сигналу (f) (рис. 3) та зниження інтенсивності (I) випромінювальних (зондувальних) ультразвукових коливань від відстані (l) між випромінювальним і приймальним п'єзоелектричними перетворювачами (бази вимірювань) (рис. 4) свідчить стосовно такого.

Вибір частоти випромінюваного сигналу є суттєвим, тим більше за досліджень бетону, який за своєю структурою є композиційним матеріалом, в якому спостерігається значне загасання високих частот.

Особливо цей ефект виявляється за досліджень бетонів низької міцності, легких і таких, що характеризуються мікротріщиноватістю. Ця характеристика бетону формується, в основному, за значного терміну його експлуатації через вплив динамічних, статичних навантажень, кліматичних змін.

Залежність рівня інтенсивності (I) випромінювальних (зондувальних) ультразвукових коливань від відстані (l) між випромінювальним і приймальним п'єзоелектричними перетворювачами свідчить стосовно значного зниження рівня цього параметра (I) зі збільшенням бази вимірювань.

Недостатнє урахування цього ефекту може призводити, як мінімум, до зниження точності вимірювань (рис. 2), а у разі проведення вимірювань за сполучення бетону низької міцності й значної відстані між випромінювальним і приймальним перетворювачами вимірювальний процес може бути неможливим з причини надто низької амплітуди інформаційного сигналу [13].

Отже, з метою забезпечення надійних і достовірних результатів вимірювань, в особливості за досліджень бетону експлуатованих будівельних об'єктів, реалізовані технічні характеристики серійних приладів потребують коригування як у плані частотних характеристик випромінювального

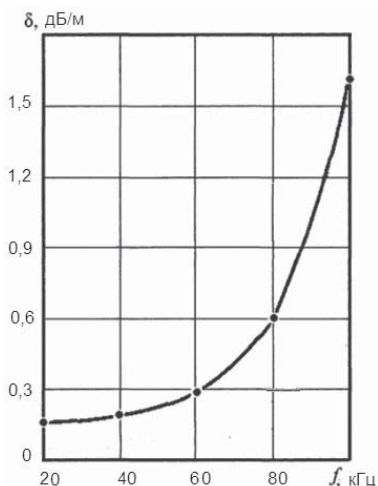


Рис. 3. Залежність коефіцієнта загасання (δ) ультразвукових коливань від частоти випромінювального (зондувального) сигналу (f)

Fig. 3. Dependence of the attenuation coefficient (δ) ultrasonic oscillations from the frequency of the radiative (probing) signal (f)

(зондувального) сигналу, так і відносно його амплітудних параметрів.

6. На сьогодні практично відсутні методики, рекомендації відносно технічних характеристик приладового, метрологічного забезпечення, призначені для вирішення завдання визначення наявності й розмірів площин розшарування монолітного бетону в експлуатованих конструкціях і спорудах ультразвуковим імпульсним методом (наприклад, дефектоскоп ПУЛЬСАР-2.2). Цей дефект монолітного бетону може виявлятися, наприклад, за завищеного часового терміну технологічних перерв у процесі бетонування конструкції чи споруди. У результаті цього знижується міцність будівельного об'єкта в цілому, що в ряді випадків (наприклад, за руйнування конструкції) може призвести до людських жертв, аварій, значних матеріальних збитків.

Позитивне вирішення цього завдання можливе із залученням теорії розповсюдження пружних (ультразвукових) хвиль, методів побудови годографів у сукупності з урахуванням особливостей поширення таких хвиль в бетоні [8, 14].

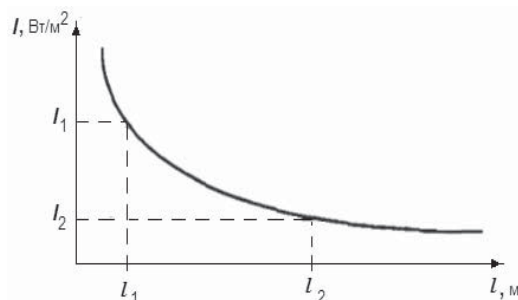


Рис. 4. Залежність рівня інтенсивності (I) випромінювальних (зондувальних) ультразвукових коливань від відстані (l) між випромінювальним і приймальним п'єзоелектричними перетворювачами

7. У більшості випадків у технічних характеристиках ультразвукових приладів не вказано точності вимірювання часу поширення ультразвукових хвиль у досліджуваному матеріалі (бетоні). Наведено тільки дискретність вимірювання часу поширення УЗ коливань (0,1 мкс) [11].

ВИСНОВКИ

На основі системного підходу, аналізу особливостей використання приладів за виробничих умов, урахування типу, часу експлуатації досліджуваного бетону визначено й обґрунтовано причини, що формують проблему розвитку і впровадження ультразвукового імпульсного методу в завданні вимірювання параметрів і визначення фізико-механічних характеристик бетону експлуатованих будинків і споруд. Удосконалення серійних ультразвукових приладів, метрологічного забезпечення з урахуванням виявлених і описаних характеристик особливостей вимірювального процесу для неруйнівного контролю якості бетону в зазначених будівельних об'єктах дозволить достатньо розширити перелік вирішуваних завдань, номенклатуру досліджуваних об'єктів, підвищити до необхідного рівня точність, надійність і достовірність даних вимірювання.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Серіков Я.О. (2013) Техніко-економічне обґрунтування прийняття рішень включення експлуатованих будівель і споруд у базу даних систем діагностики для оцінки їх рівня інвестиційної перспективності / XII Міжнар. наук. Конф. «Економіка, управління, фінанси: стан, проблеми, та перспективи розвитку». Макіївка: ДонНАБА (Serikov J.A. (2013) Feasibility study the decision-making inclusion of exploited buildings and structures in the database of the diagnostics systems to assess their level of investment prospects / XII international scientific conference «Economics, management, finances: state, problems and prospects of development». Makeyevka: DonNABA). Ч./Part 1. С/Р. 34—37.
- Олійник Н.І. (2008) Організаційно-економічні механізми удосконалення житлового будівництва України / Н.І. Олійник // Київ: Вісн. НАДУ (Oleinik N.I. (2008) Organizational and economic mechanisms of improve-

- ment of housing construction in Ukraine / N.I. Oleinik // Kyiv: Visn. NADU). — № 3. С/Р. 93—100.
3. Олійник Н.І. (2009) Концептуальні підходи до формування стратегії реновації житлового фонду / Київ: Вісн. НАДУ (Oleinik N.I. (2009) Conceptual approaches to the formation of the strategy of housing renovation / Kiev: Visn. NADU). — № 4. С/Р. 71—79.
 4. Серіков Я.О., Шутенко Л.М., Золотов М.С. і ін. (2009) Діагностика будівельних матеріалів, конструкційних елементів будинків і споруд та механічних систем неруйнівними методами на основі пружних хвиль / Монографія, Харків: ХНАМГ (Serikov J.A., Shutenko L.M., Zolotov M.S. et al. (2009) Diagnosis of building materials, constructional elements of buildings and structures and mechanical systems non-destructive methods based on elastic waves is the Monograph, Kharkov: KSAME). — 261 с/р.
 5. Серіков Я.А. (2001) Решение задачи системного подхода при определении надежности железобетонных изделий неразрушающим методом с использованием упругих волн / Сб. научн. тр. научн.-практич. конф. «Охрана труда и экология в строительстве. Актуальные задачи и современные пути решения» Сб. научн. тр. Дн-ск: ПГАСА (Serikov J.A. (2001) Solution of the problem a systematic approach in determining the reliability of concrete products non-destructive method using elastic waves / SB. scientific papers scientific-practical. Conf. «Labor protection and ecology in construction. Actual problems and modern solutions» Collection of scientific works of DN-SK: PGASA). С/Р. 92—95.
 6. Серіков Я.А. (2007) Применение ультразвукового импульсного метода контроля при реализации проектов ремонта и реконструкции существующего жилого фонда и промышленных объектов / «Устойчивое развитие городов и новации жилищно-коммунального комплекса» // Пятая Международ. науч.-практич. конф. Москва: МИКХИС (Serikov J.A. (2007) Application of ultrasonic pulse method of control in the implementation of projects of repair and reconstruction of the existing housing stock and industrial facilities / «Sustainable urban development and innovation of housing-and-municipal complex» // the Fifth international scientific-practical. Conf. Moscow: MICHIS), т/в. 2. С/Р. 338—341.
 7. Ясній П.В., Конончук О.П., Якубишин О.М. (2016) Дослідження міцності бетону неруйнівними методами контролю / «Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди» // Зб. наук. Праць. Вип./Issue 32. Рівне (Yasniy P.V., Kononchuk O.P., Yakubisin O.M. (2016) Investigation of the strength of concrete non destructive testing / Resursoemkie materials, design and construction. Exactly). — С/Р. 296—303.
 8. Серіков Я.О. (2017) Розробка технології метрологічного забезпечення процесу дослідження структури монолітного бетону на основі пружних хвиль / XIII Междунар. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании» // Междунар. научный журнал Acta Universitatis Pontika Euximus. Спец. вып. Болгария, Варна: Технический университет (Serikov J.A. (2017) Development of technology for quality assurance and process studies of the structure of reinforced concrete based on elastic waves / XIII Intern. Conf. «Quality strategy in industry and education» // international. the scientific journal Acta Universitatis Pontika Euximus. Spets. issue. Bulgaria, Varna: Technical University). — С/Р. 350—355.
 9. Серіков Я.О. Виявлення структурних неоднорідностей в монолітному бетоні неруйнівним ультразвуковим імпульсним методом. Методологія / Матер. II Міжнар. конф. «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» // Фінляндія, Гельсінкі: Університет Аалто, 12—15 листопада 2018 р. (Serikov J.A. Detection of structural irregularities in monolithic concrete non-destructive ultrasonic pulse method. Methodology / materials of the II Intern. Conf «Innovative technologies in science and education. European experience» // Finland, Helsinki: Aalto University, 12—15 November 2018). — С/Р. 409—413.
 10. <https://etcu.com.ua/ua/nerujnivni-metodiviznachennya-mitsnisnih-vlastivostej-betonu>
 11. <http://www.ndtural.ru/razdel.html?gc=4&ci=397>
 12. <http://www.ntcexpert.ru/pr78/m80/787-ultrazvukovoj-tester-betona-pundit>
 13. Серіков Я. О. (2007) Економічні та технологічні аспекти використання ультразвукового імпульсного методу при визначенні мікро- та макроструктурних дефектів у бетоні мостових споруд / «Строительство, материаловедение, машиностроение» // Сб. научн. трудов. Вып. 40. Дн-ск: ПГАСА (Serikov J.A. (2007) Economic and technological aspects of the use of ultrasonic pulse method in determining the micro-and macrostructures of defects in concrete bridge structures / «Construction, materials science, engineering» // SB. scientific. labours'. Issue. 40. — DN-SC: PGASA). — С/Р. 96—100.
 14. Серіков Я.А. (2003) Совершенствование акустических методов для исследования качества и надежности эксплуатации конструкций из монолитных бетонов в шахтных условиях / Сб. трудов XIII сессии Российского акустического общества. «Акустические измерения и стандартизация. Геоакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии». Т. 2. Москва: МГУ (Serikov J.A. (2003) Improvement of acoustic methods to study the quality and reliability of operation of monolithic concrete structures in mine conditions / SB. proceedings of the XIII session of the Russian acoustic society. «Acoustic measurements and standardization. Geoacoustics. Ultrasound and ultrasound technologies». Vol. 2. Moscow: MSU). — С/Р. 142—146. 📄

Отримано / received: 17.10.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. Є.П. Тимофеевим (Україна).
D. Sc. (Techn.) Ye.P. Tymofeiv, Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.62-69

УДК 669.785/. 88:543.27

АНАЛІЗУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ НА ВМІСТ ДОМІШОК КИСНЮ, АЗОТУ, ВОДНЮ

Analyze of Metallic Powders on Content of the Oxygen, Nitrogen, Hydrogen Admixture



М. Калинюк, кандидат технічних наук,
завідувач лабораторії,
С. Ісакова, провідний інженер,
Л. Пузрина, провідний інженер,
Інститут електроварування ім. Є.О. Патона
НАН України, м. Київ
e-mail: mykkal@ukr.net

M. Kalyniuk, candidate of technical sciences,
chief of laboratory,
S. Isakova, driving engineer,
L. Puzrina, driving engineer,
National academy of sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric welding institute, Kyiv
e-mail: mykkal@ukr.net

Властивості компактних металів залежать, в основному, від концентрацій кисню, азоту й водню в їхніх об'ємах. Для порошків газу, сорбовані поверхню, мають домінують значення. Порошки мають особливості, які відрізняють їх від компактних металів.

Представлено літературний огляд методів визначення вмісту кисню, азоту й водню в металевих порошках.

Основним методом контролю вмісту газових домішок у металевих порошках є метод відновлювального плавлення металу, що аналізується, в потоці газу-носія (гелію, аргону, азоту) у графітовому тиглі в імпульсному режимі. Перераховано основні особливості та переваги цього методу.

Наведено приклади аналізів реальних об'єктів — порошків чистих металів і сплавів (заліза, хрому, марганцю, феромарганцю, феросиліцію, нікелевих сплавів).

Пробопідготування порошків металів — це найбільш трудомістка операція в процесі аналізування порошків металів (відбирання проб, виготовлення, сушіння, зберігання та транспортування аналітичних зразків).

Розглянуто проблеми калібрування, методик й аналізаторів за стандартними зразками.

Розглянуто проблеми створення стандартних зразків порошків металів із відомими концентраціями кисню, азоту й водню.

Показана недостатність стандартних зразків порошків металів на вміст газових домішок (кисню, азоту, водню).

Розроблено методику аналізування високолегованих нікелевих сплавів на вміст газових домішок (кисню, азоту, водню): температури нагрівання графітового тигля, часу, маси аналітичного зразка.

Запропоновано перспективні матеріали для створення стандартних зразків порошків металів із відомими концентраціями га-

зових домішок — високолеговані нікелеві сплави з низькими концентраціями кисню, азоту й водню.

Properties of compact metals depend, in base, from oxygen, nitrogen and hydrogen concentrations in their volumes. Powders have peculiarities, which distinguish from compact metals.

Literature review on methods of determination oxygen, nitrogen and hydrogen of content in metallic powders.

Main method of control of the gaseous admixture in metallic powders is method of the restoration melting of analytical metal in carrying gas flow (helium, argon, nitrogen) in graphite crucible in impulse condition. Principal peculiarities and advantages of this method are enumerated.

Examples of analysis of real objects — powders of pure metals and alloys (iron, chromium, manganese, ferromanganese, ferrosilicon, nickel alloys) is given.

Samples preparation is the most difficult operation in the time of analyses of metallic powders (selection, manufacturing, drying, preservation, transport of analytical samples).

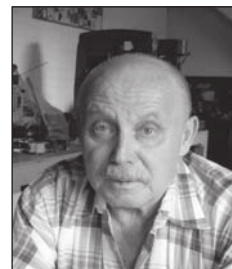
Problems of calibration of the methods and analysers by standard samples are considered.

Problems of creation of the standard samples from powder metals with known oxygen, nitrogen and hydrogen concentration are considered.

Lack of the standard samples of metallic powders on gaseous admixtures (oxygen, nitrogen, hydrogen) are showed.

Method of determination oxygen, nitrogen and hydrogen contents in highalloyed nickel — temperature of heating on graphite crucible, time, mass of analytical sample — are created.

Materials for creation of the standard samples of powder metals with certain concentration gaseous admixture with good prospects — highalloyed nickel with low oxygen, nitrogen and hydrogen concentrations — are proposed.



М. Калинюк



С. Ісакова



Л. Пузрина

Ключові слова: аналізування, металеві порошки, кисень, азот, водень, стандартні зразки.

Keywords: analysis, metallic powders, oxygen, nitrogen, hydrogen, standard samples.

Металеві порошки настільки широко використовують у сучасній техніці, що існують спеціальні галузі промисловості: порошок металургія [1—3] та порошок матеріалознавство [4].

Властивості виробів із порошкових металів значною мірою визначаються вмістом газів, сорбованих в об'ємі та на поверхні частинок порошку. Останнє дуже часто має вирішальний вплив на якість порошків і виробів із них. Властивості компактних металів залежать, в основному, від вмісту газів у їхньому об'ємі. Для порошків газів, сорбованих на поверхню, мають домінуюче значення. Вміст газів у металевих порошках залежить від умов їхнього створення під час розпилення: складу розпилювача, гартувального середовища, гранулометричного та хімічного складу, умов зберігання порошків тощо [6, 7, 9, 12, 13].

До газів у металах відносять кисень, азот, водень, оскільки, за звичайних умов оброблення металів (плавлення, зварювання, різання, пресування тощо), вони присутні в атмосфері (у вакуумі) в газоподібному стані та здатні поглинатися твердим або рідким металом й видалятися із нього у виді газів (H_2 , H_2O , O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 та інші.) [5, 6] (рис. 1).

Середній вміст газів на поверхні та в об'ємі частинок порошку можна оцінити розрахунковим шляхом, виходячи з результатів визначення загальної кількості газів у зразках порошку та їхньої питомої поверхні. Для такого розрахунку потрібні результати аналізування великої кількості зразків порошку з різним відношенням площі поверхні до маси зразка [5].

Металеві порошки як об'єкт аналізування мають особливості, які відрізняють їх від компактних металів [5]:

1. порошки, як правило, неоднорідні за гранулометричним складом і вмістом газів. Для отримання достовірних результатів середнього вмісту газів у партії порошку необхідно виконати велику кількість визначень;

2. загальний (об'ємний та поверхневий) вміст газів у порошкових металах порівняно великий ($> 1 \times 10^{-2} \% \text{ мас.}$);

3. порошки сорбують гази з навколишнього середовища в процесі виробництва, зберігання та експлуатації.

Сучасний арсенал методів визначення вмісту газових домішок у металевих порошках дуже великий [5—7]:

1. десятки модифікацій методу високотемпературної екстракції:

а) у потоці газу-носія [5—18, 37, 38],

б) у вакуумі [5, 11, 14, 17—25, 44];

2. традиційні та нові методи хімічного аналізу [5, 26—28, 39];

3. спектральний та мас — спектральний аналіз [5, 29];

4. активаційний аналіз [5, 30, 31];

5. локальний аналіз і дослідження концентрацій газових домішок на поверхні частинок порошку [5, 34];

6. використання растрового іонного мікроскопа та аналізатора зображення з мікрозондом [32] або вимірювання відносної щільності та питомого електроопору [33].

Аналітичні можливості цих методів дуже широкі. За допомогою деяких з них можна аналізувати матеріали з нижньою межею визначувальних концентрацій до $10^{-7} \% \text{ мас.}$ та високою точністю

↑ Поверхня ↓	Адсорбція з атмосфери (вакууму) + (O_2 , N_2 , H_2 , H_2O , CO , CO_2 та інші)	Хемосорбція Залежно від стану поверхні металу та його обробки (порошок, стружка, моноліт), утворення оксидів, нітридів, гідридів, гідрооксидів, оксикарбонітридів та інші.	
↑ Об'єм ↓	1. Тверді розчини: O, N, H у твердому або рідкому металі. 2. Неметалеві включення: оксиди, нітриди, гідриди, гідрооксиди, оксикарбонітриди та інші. 3. Газова фаза: пори, раковини, тріщини в глибині металу.		
Адсорбція (фізична адсорбція) Поглинання газів з утворенням шару товщиною в одну або кілька молекул на поверхні металу. Процес має зворотній характер зі зміною температури та/або тиску.	Хемосорбція (активна адсорбція) Утворення валентних зв'язків між газом, що адсорбується, та металом. Процес має тенденцію до незворотності (особливо за температурою).	Дифузія Процес розчинення газів у металі на боці високого тиску з наступним виділенням газів на боці низького тиску.	Розчинність (оклюзія, абсорбція) Проникнення газів у глибину твердого або рідкого металу. Гази, крім інертних, реагують з металом, створюючи сполуки або розчини в твердому або рідкому металі.
Дуже важко однозначно вирішити: адсорбція чи хемосорбція. Фізична адсорбція завжди йде перед хемосорбцією.			

Рис. 1. Схема поглинання кисню, азоту, водню металом із атмосфери (вакууму)

Fig. 1. Scheme of absorption of oxygen, nitrogen, hydrogen with metal from the atmosphere (vacuum)

визначення великих концентрацій (до (0,2...0,5) % відносно.).

Для контролю вмісту газів у металах (зокрема, в металевих порошках) під час металургійного процесу або аналізу готової продукції використовують прилади, які працюють за методом високотемпературної екстракції газових домішок зі зразків, які розплавляють у графітових тиглях в імпульсному режимі в потоці газу-носія. Ці прилади мають високу експресність аналізу ((1...3) хвил.) та продуктивність (2...3 змінна робота), надійність у роботі, нижня межа визначення газових домішок до (10^{-5} ... 10^{-6}) % мас. Метал, що плавиться, взаємодіє з матеріалом тиглю (графітом). Із розплавленого зразка виділяється кисень у виді CO, водень й азот у молекулярному виді. Поток газу-носія суміш аналізованих газів транспортується в газоаналізатор. У методі відновлювального плавлення як аналізатори застосовують детектори з теплопровідністю та/або поглинанням випромінювання в інфрачервоній області спектра газами, що виділяються із розплавленого аналітичного зразка. Як газ-носії використовують інертні гази (гелій, аргон), а також такі, що взаємодіють з металом (наприклад, азот). Вибір газу-носія залежить від поставленого завдання та методу аналізування газової суміші [5—18, 37, 38].

Основні особливості методу високотемпературного відновлювального плавлення в імпульсному режимі у потоці газу-носія [5, 8]:

1. робочі температури нагрівання графітового тигля можуть досягати (2000...2500)°C. Внаслідок невеликих розмірів тигля різко скорочується час його попередньої дегазації, прискорюється виділення газів зі зразка, значно зменшується рівень поправки холостого аналізу. Печі прямого нагрівання опором, які працюють в імпульсному режимі, не потребують нагрівальних елементів, теплоізоляції тигля, мають малий об'єм. Температура нагрівання тигля досягається за секунди;

2. створення окремих приладів для визначення кожного газу (O, N, H), що дозволяє спростити конструкції приладів та виготовляти їх з уніфікованих блоків;

3. індивідуальний графітовий тигель для аналізування кожного зразка, що дозволяє забезпечити однакові умови виділення газів зі зразка, підвищити точність і значно скоротити час аналізування;

4. робота газоаналізаторів заснована на вимірюванні фізичних властивостей газової суміші за відсутності рідких хімічних реагентів і ртуті;

5. прилади — це металеві конструкції, прості

та надійні в експлуатації, які працюють за умов металургійних підприємств і наукових установ, мають високий рівень автоматизації та комп'ютеризації.

6. аналізування чорних і кольорових металів, неорганічних та навіть деяких органічних сполук.

На цих приладах можна використовувати методичні особливості [5—8]:

1. активний вплив газу-носія та графітового тигля на процес виділення газів із металу. Наприклад, використання азоту як газу-носія для визначення вмісту кисню в металах та інших неорганічних матеріалах або різних конструкцій тиглів (високотемпературні, подвійні та інші) [6—14, 46, 49].

2. використання рідкометалевих ванн, спеціально підготовлених із урахуванням особливостей кожного аналізування металу. Наприклад, можуть бути застосовані ванни із нікелю, попередньо розкисленого та насиченого вуглецем, з додаванням олова або інших металів (міді, церконію та інш.) [6—14, 46, 49].

Метод відновлювальної екстракції кисню, азоту, водню плавленням металевого порошку за (2000...2500) °C у графітовому тиглі в потоці інертного газу дозволяє визначити повний вміст газів незалежно від форми їх вміщення в металевому порошку: забруднення на поверхнях частинок порошку (адсорбовані гази, сполук будь-якого складу), в об'ємі — тверді розчини газів у металі та неметалеві включення [5—7].

Автори [14] досліджували особливості застосування методу відновлювального плавлення в потоці газу-носія й у вакуумі для визначення вмісту кисню в металевих порошках на базі Ti, Nb, Ni, Co, Fe і показали, що основною причиною заниження результатів методу вакуум — плавлення є реакція взаємодії окису вуглецю з воднем з утворенням води та вуглеводнів. Заниження результатів визначень газів у металевих порошках методом відновлювального плавлення як у вакуумі, так і в потоці газу-носія, можливе, коли в порошках присутні метали, що легко сублимують, або сполуки, які конденсуються на холодних частинах газового тракту та частково адсорбують гази, що виділяються із розплаву [5].

Пробонідготування (найбільш трудомістка операція під час аналізування порошкових металів) — це відбирання представницьких проб і виготовлення із них аналітичних зразків [35, 36, 45]. У цих роботах (та інших) наведені основні рекомендації:

а) сушіння проб — залежить від хімічного та гранулометричного складу порошку:

- температура від 105 до 170 °C,
- атмосфера — осушені повітря, азот, аргон;

б) зберігання та транспортування проб: герметична упаковка, сухе приміщення, нормальна температура (~ 20 °С). У наших роботах [6—9, 12, 13, 46] порошкові метали, з якими ми працювали, зберігали в ексикаторах в атмосфері осушеного аргону чи повітря. Гази осушували за допомогою ангідру (перхлорату магнію — $Mg(ClO_4)_2$) або фосфорного ангідриду (P_2O_5).

в) виготовлення та зважування аналітичного зразка залежить від поставленого завдання аналізованого матеріалу й наявної апаратури. Простіше за все зразки порошоків зважувати та нагрівати для відновлювального плавлення в одному й тому ж контейнері (тиглі). Якщо це неможливо, порошки можна пресувати в таблетки, загорнути в металеву фольгу або поміщати в капсули (нікелеві, олов'яні, мідні, залізні) [5—14, 37—39, 46]. Наприклад, вміст водню в порошках титану чи гідриду титану визначають з обов'язковим використанням олов'яних капсул, оскільки останні є контейнерами й рідкометалевими ваннами одночасно [46]. Частинки порошку не повинні мати окислених й азотованих поверхонь, пор, раковин та інших дефектів. Аналітичні зразки виготовляють безпосередньо перед їхнім завантаженням у тигель або в шлюз печі приладу так, щоби їх не мити розчинниками. Зразки з дефектами відбракували [5—9, 12, 13, 35, 36, 45, 46]. Коли це було можливим, ми застосовували спеціальне підготування зразків безпосередньо в тиглі — нагрівання зразка до заздалегідь визначеної температури протягом ~ 10 сек, щоби видалити адсорбовані порошком гази під час його завантаження в тигель [49].

Калібрування методики та аналізатора проводили за стандартними зразками (СЗ) з відомими вмістами визначуваних газових домішок. Номенклатура порошкових металів та сплавів величезна. Вимоги до якості металевих порошоків представлені, як правило, у національних стандартах і (або) технічних умовах. Важливою складовою метроло-

гічного забезпечення вхідного контролю та готових металевих порошоків у випробувальних лабораторіях є використання СЗ з відомими вмістами кисню, азоту, водню [40—43, 50].

Існує багато нормативних документів з визначення вмісту кисню, азоту, водню в порошкових металах (відбирання, підготування, аналізування) [35—45] та дуже мало стандартних зразків (СЗ) порошкових металів з відомими вмістами газів [40—43, 50].

Створення методик визначення вмісту газових домішок у металевих порошках потребує наявності СЗ з відомими концентраціями кисню, азоту, водню.

Фірми УкрНДІспецсталь (Україна), УИМ (РФ), MBH, LECO, BAS, Bretländer (США, Європа) та інші розробляють СЗ металів у виді порошоків і стружки з відомими концентраціями азоту. Але ці СЗ створюють для визначення вмісту азоту в металах методом К'ельдаля. Їхнє застосування в методі відновлювального плавлення має обмеження, оскільки в методі К'ельдаля не визначають вмісту азоту, адсорбованого поверхнями частинок порошку.

Розроблення СЗ порошкових металів з відомими концентраціями кисню, азоту, водню для методу відновлювального плавлення має багато проблем: урахування гомогенності, фракційного складу, стану поверхні частинок порошку (рис. 1), умов зберігання тощо.

Особлива проблема — створення СЗ порошкових металів з низькими концентраціями кисню, азоту, водню.

Аналізатори, порошки металів й стандартні зразки, які були використані в нашій роботі:

1) Аналізатори TC436 (кисень, азот), RO316 (кисень), TN114 (азот), RH402, RH2 (водень) фірми LECO [6—9, 12, 13, 46, 49].

2) Порошки металів:

- заліза, сталі, феромарганцю, феросиліцію, марганцю, хрому) (табл. 1);
- мідних сплавів (латуні, міді) (табл. 2);

Таблиця 1. Вміст кисню й азоту в порошкових феросплавах, залізі, хромі, марганці

Table 1. The content of oxygen and nitrogen in powdered ferroalloys, iron, chromium, manganese

Металеві порошки	Вміст кисню, % мас.		Вміст азоту, % мас.	
	[7, 12]	Наша робота	[7, 12]	Наша робота
Феромарганець	2,11	2,31	0,033	0,037
Феросиліцій	0,75	0,92	0,011	0,013
Залізо	0,60	0,83	0,0035	0,0041
Стандарт ГСО 1634-79 залізний порошок (0...0,70 ± 0,02) % мас.	0,71 ± 0,01	0,72 ± 0,02	Не визначали	
Стандарт № 159 хромовий порошок азот (0,18 ± 0,01) % мас.	Наша робота		Метод К'ельдаля	0,18 ± 0,01
			Метод відновлювального плавлення в гелії	0,18 ± 0,01
Марганець Mn 95				0,02...0,04

Таблиця 2. Вміст кисню в латунних порошках, % мас

Table 2. Oxygen content in brass powders, % wt

Марка латуні	Середовище розпилення	Фракція, мкм			
		-50	100—160	250—315	
		[13]	[13]	наша робота	[13]
Л-62	Повітря	0,45	0,29	0,31	0,22
ЛН 65-5		0,35	0,20	0,22	0,23
Л-62	Вода	0,28	0,17	0,19	0,18
ЛН 65-5		0,27	0,19	0,20	0,18

■ нікелю, кобальту і сплавів на їхніх основах (табл. 3).

В архіві лабораторії аналізу газів у металах Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України зберігаються проби металів, у тому числі порошків, з якими ми працювали протягом багатьох років. Порошкові проби зберігають за лабораторних умов у пластикових герметично закритих пакетах за температур (15...30) °С, вологості (70...80) %, атмосферного тиску (745...765) мм рт. ст. Деякі проби зберігали в екзикаторах в атмосфері осушеного повітря чи аргону.

3) Стандартні зразки із монолітних металів та порошків [6—9, 12, 13, 40—42]:

* ГСО 1634-79 — залізний порошок ПЖ4 (471) (0...0,70 ± 0,02) % мас.;

* УралНДІЧормет №СЗв — порошок сталі N 0,408 % мас.;

* ГСО 9833-2011 — мідний порошок ПМС — В (0...0,024) % мас.;

* ЦНДІЧМ № 159 — порошок хрому — N — 0,18 % мас.;

* УкрНДІспецсталь — CRMCA017 — титан — (0...0,151) % мас., N — 0,0061% мас., H — 0,0039 % мас.;

* LECO 501-645 — сталь — (0...0,0213) % мас., N — 0,0255 % мас.;

* LECO 501-147 — мідь — (0...0,0248) % мас.

Ми повторно проаналізували частину проб на вміст кисню й азоту та відібрали ті, в яких вміст цих елементів практично не змінився за період зберігання. Одночасно проаналізували наявні у нас СЗ порошкових металів. Наше завдання — пошук металевих порошків з низькими концентраціями кисню й азоту та розроблення на їхніх основах СЗ для контролю якості порошків, які застосовують у технологіях виготовлення деталей і агрегатів літаків, річкових та морських суден [2, 4, 8].

Автори [13] вивчали структуру та схильність до окислення різних фракцій порошків латуні залежно від виду енергоносія для розпилення (повітря, воду). Нами проаналізовані деякі з цих латуней з калібруванням СЗ порошку міді [43]. Зразки латуней зберігали за нормальних умов випробувальної лабораторії. Вміст кисню в латунному порошку на ~ 0,02 % мас. вищий, ніж у роботі [13] (табл. 2).

Автори [9] досліджували вміст кисню й азоту в порошках та напиленних покриттях, вироблених з нікелевих сплавів, що самі флюсуються, та показали, що вміст газів у порошках залежить від хімічного та гранулометричного складу, умов розпилення (складу розпилювача та середовища для загартування). Підвищення температури сушіння порошків перед напиленням від

100 до 300 °С не впливає на вміст кисню й азоту в порошках. Маса аналітичних зразків — ~ (0,4 ± 0,1) г. Результати аналізів збільшуються за маси < 0,4 г, а збільшення маси зразка > 0,4 г призводить до заниження результатів. За тривалий час зберігання цих порошків (майже 29 років) вміст кисню й азоту збільшився на ~ 0,02 % мас. (табл. 2). Це підштовхнуло нас на пошук подібних порошків, але з низькими концентраціями кисню й азоту.

Таблиця 3. Вміст кисню в порошках нікелевих сплавів

Table 3. The content of oxygen in powders of nickel alloys

Марка порошку	Середовище розпилення [9]	Кисень, % мас.			Азот, % мас.		
		Наша робота		[9]	Наша робота		
		2018 р	2019 р		2018 р	2019 р	
ПГ-10Н-01 ПГ-10Н-02	Вода	0,18 0,20	0,19 —	0,19 —	0,0013 —	0,0015 —	0,0015 —
ПГ-СР2 ПГ-СР3	Азот	0,038 0,034	0,041 —	0,040 —	0,0050 —	0,0049 —	0,0050 —
Високолегований сплав на нікелевій основі	№ 1	—	0,0050 ± 0,0005	0,0050 ± 0,0005	—	0,0006 ± 0,0003	0,0006 ± 0,0003
	№ 2	—	0,0048 ± 0,0006	0,0048 ± 0,0006	—	0,0009 ± 0,0003	0,0009 ± 0,0003
Нікель гранульований Кобальт гранульований	Вода	—	0,2...0,3		—	0,0002...0,0004	

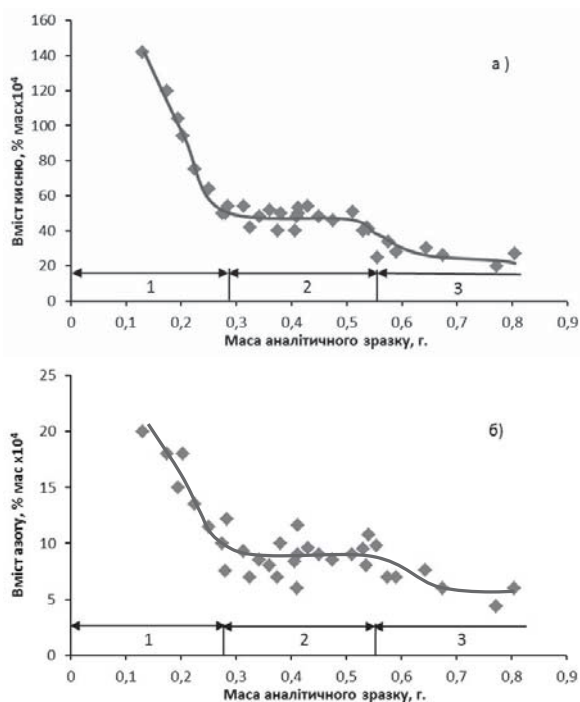


Рис. 2. Залежність вмісту кисню (а) й азоту (б) від маси аналітичного зразка

Fig. 2. Dependence of the content of oxygen (a) and nitrogen (b) on the weight of the analytical sample

Нами розроблена методика аналізування високолегованих нікелевих порошків для зварювання та паяння нікелевих сплавів на вміст кисню й азоту (рис.2 а, б). В області 1 вплив газових домішок, що містяться на поверхнях частинок порошку, значний, який завищує результати (маси зразків $< \sim 0,3$ г). В області 2 результати не залежать від маси зразків ($\sim 0,3 \dots 0,5$ г). В області 3 результати зменшуються зі збільшенням маси зразків ($> \sim 0,5$ г). За час аналізування зразок не встигає прореагувати з рідкометалевою ванною. Процес затягується до двох хвилин. Є загроза протікання рідкого металу крізь тигель. Особливість цих порошків — низький вміст кисню й азоту та стабільність результатів аналізування протягом двох років. Концентрації кисню й азоту в порошках після дворічного зберігання у герметичній упаковці за нормальних умов випробувальної лабораторії практично не змінилися (табл. 3). Такі порошки можуть бути використані

для розроблення стандартних зразків за умов проведення відповідної дослідницької роботи багатьма лабораторіями.

Вимірювання концентрації водню в порошкових металах представляє певні труднощі. По-перше, виготовлення аналітичних зразків. По-друге, нівелювання впливу вологи, адсорбованої безпосередньо під час підготовчих процедур перед аналізуванням [5—9, 11, 12, 29, 31, 34, 46].

Кількість водню в металах (зокрема, в металевих порошках) переважно визначають окремо від інших газів (кисню, азоту) завдяки його особливостям видалення та вимірювання. Відносно низька температура (близько $T_{пл.}$) визначення вмісту водню в металах забезпечує ряд переваг: зменшується рівень холостої поправки, зразок практично не випаровується, не утворюються визгони, які можуть поглинати водень. За таких температур практично весь газ, що виділяється зі зразка, є воднем. Вибираючи температуру аналізування, необхідно враховувати можливість побічних реакцій взаємодії водню з азотом, СО (CO_2) та вуглецем на поверхнях частинок порошку. У результаті частина водню може перейти в газоподібні хімічні сполуки, які не визначаються аналізатором [5].

Методики визначення вмісту водню, в яких метал переводять у рідкий стан шляхом нагрівання до температур, трохи вищих за $T_{пл.}$, або розчиняють у рідкій металевій ванні, є звичайною практикою [5—9, 11, 12, 13, 15, 46].

Нами розроблена методика аналізу високолегованих нікелевих сплавів на вміст водню. Аналітичні зразки нагрівали (плавляли) чи розчиняли в олов'яній ванні. Дослідження проводили за таких умов: $T_{аналізу} = (1000 \dots 1600) ^\circ C$, маси зразків = $(0,2 \dots 1,0)$ г, тигель графітовий, газ-носіє — азот високої чистоти. Вміст водню в нікелевих сплавах — у діапазоні $(0,00010 \dots 0,00013) \%$ мас.

ВИСНОВКИ

Підібрано порошкові метали — високолеговані сплави на основі нікелю — для розроблення стандартних зразків (еталонів) з низькими концентраціями кисню й азоту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. С.Г. Глазунов, К.М. Борзетовская (1989). Порошковая металлургия титановых сплавов, М., Металлургия (S.G. Glazunov, K.M. Borzetovska (1989). Powder metallurgy of titanium alloys. M., Metallurgy) — 185 c/s.
2. В.А. Богуслаев, П.Д. Жеманюк, А.В. Овчинников, З.В. Леховицер, И.О. Быков (2018). Получение авиационных деталей из жаропрочных спеченных титановых сплавов. Сб. трудов междунар. конф. «Титан 2018. Производство и применение в Украине» 11—13 июня, Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины (V.A. Boguslaev, P.D. Zhemaiuk, A.V. Ovchinnikov, Z.V. Lehovitser, I.O. Bykov (2018). Reseiving of aviation details from heatstable coagulating titanium alloys. Internat. conf. «Titanium 2018. Production and application in Ukraine», 11—13 june 2018, Kyiv, IES, named E.O. Paton NAN Ukraine).
3. В.Н. Андциферов, В.Б. Акименко, Л.М. Гревнев (1991).

- Порошковые легированные стали. М., Metallurgy (V.N. Anziferov, V.B. Akumenko, L.M. Grevnev (1991) Powder alloyed steels, M., Metallurgy), — 318 c/s.
4. Р.А. Андриевский (1991). Порошковое материаловедение, М., Metallurgy (R.A. Andrievsky, (1991) Powder material science, M., Metallurgy), — 205c/s.
 5. А.М. Вассерман, Л.Л. Кунин, Ю.Н. Суровой (1976). Определение газов в металлах. М., Наука (А.М. Vasserman, L.L. Kunin, Y.N. Surovoj (1976). Determination gases in metals. M., Science), — 344 c/s.
 6. Н.Н. Калинюк. Анализ газов в порошковых металлах. Респуб. науч.-техн. конф. «Современ. процессы обезуглероживания и дегазации легированных сталей и сплавов». ДМЕТІ, 21—22 октября 1987 (N.N. Kalyniuk. Analysis gases in powder metals. Resp. scien. – techn. conf. «Modern processes of decarburization and degasation of alloyed steels and alloys». DMETI, Dnepropetrovsk. 21—22, october 1987).
 7. Н.Н. Калинюк (1987) Современные приборы для анализа газов в металлических порошках и особенности метода восстановительного плавления в среде газа-носителя. Порошковая металлургия (N.N. Kalyniuk (1987) Modern instruments for analyses gases in metallic powders and peculiarities of the method of restoring melting in carring gas. Powder metallurgy), № 10, 32—35.
 8. М.М. Калинюк (2018). Організація процесу аналізу титанових сплавів на вміст домішок кисню, азоту, водню та вуглецю. Сб. трудов междунар. конф. «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11—13 июня 2018, Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины (M.M. Kalyniuk (2018). Organization of process of the analysis titanium alloys on content of oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon admixture. Internat. conf. «Titanium 2018. Production and application in Ukraine», 11—13 june 2018, Kyiv, IES named E.O. Paton NAN Ukraine), — 68—70.
 9. Г.М. Григоренко, А.Л. Борисова, Н.Н. Калинюк, Е.А. Емельянов, А.Н. Соломенцев, Л.Д. Пузрина (1990). Исследование содержания газов в порошках и напыленных покрытиях из никелевых самофлюсующих сплавов. Автоматическая сварка (G.M. Grygorenko, A.L. Borysova, N.N. Kalyniuk, E.A. Emeljanov, A.N. Solomentsev, L.D. Puzrina (1990). Investigation of the gases contents in powder and dusting coating from selffluxing nickel alloys. Avtomat. welding), — № 2, 40—44.
 10. В.В. Покидышев, К.К. Романенко, В.И. Степанов (1988). Особенности фракционного определения кислорода в порошковых материалах на приборе RO 316 фирмы LECO. Современные методы контроля структуры и свойств металлопродукции в черной металлургии. М. (V.V. Pokidyshev, K.K. Romanenko, V.I. Stepanov (1988). Peculiarities of fraction determination oxygen in powder materials on instrument RO — 316 firm LECO. Modern methods of control of the structures and properties of the metallic production in black metallurgy. M.), — 94—98.
 11. Е.Е. Макарова, П.И. Ожегов, В.В. Покидышев. Особенности применения метода восстановительного плавления для определения газов в материалах с развитой поверхностью. Современные методы определения газообразующих элементов в металлах и сплавах. МИСИС, 16—18 ноября 1976 (Е.Е. Makarova, P.I. Ozhegov, V.V. Pokidyshev, Peculiarities application of method of the restoring melting for determination gases in materials with developed surface, Modern methods for determination gaseous elements in metals and alloys. MISIS, 16—18 november 1976).
 12. Н.Н. Калинюк. Экспресс-анализ ферросплавов на кислород, азот, водород. 10-я Украин. респ. научно-техн. конф. «Повышение качества аналитического контроля материалов металлургического производства в 12-й пятилетке». Днепропетровск, ДМЕТІ, 14—16 октября 1986 (N.N. Kalyniuk, Express-analysis of ferroalloys on oxygen, nitrogen, hydrogen contents, Ukr. resp. scient.-tech. conf. «Improvement of quality of the analytical control materials metallurgical production in 12-th five year period». DMETI, Dnepropetrovsk, 14—16 october 1986), 104.
 13. И.Д. Радомысльский, Г.К. Гайдученко, Н.Н. Калинюк (1983). Влияние условий распыления на качество латунного порошка. Порошковая металлургия (I.D. Radomyselskij, G.K. Gajduchenko, N.N. Kalyniuk (1983). Influence of conditions of the dispersion on Quality of brass powder. Powder metallurgy), — № 7, 1—4.
 14. П.И. Ожегов, В.И. Степанов, В.В. Покидышев, А.В. Мерзляков, Ю.Д. Лабутов (1976). Особенности применения метода восстановительного плавления для определения кислорода в металлических порошках. Завод. лаб. (P.I. Ozhegov, V.I. Stepanov, V.V. Pokidyshev, A.V. Merzlkavov, Y.D. Labutev, (1976). Peculiarities of application of the method restoring melting for determination oxygen in metallic powders). 42, № 2, 134—137.
 15. В.В. Нерубашенко, В.В. Бигма, В.А. Дрозденко. Исследование газопоглощения титановых порошков. 3-я всесоюзная конф. «Методы определения и исследования состояния газов в металлах». ГЕОХИ, М., 17—19 декабря 1973 (V.V. Nerubashchenko, V.V. Bigma, V.A. Drozdenko. Investigation of getting of the titanium powders. «Methods of determination and investigation gases conditions in metals». 3-th all — union conf. M., GEOHI, 17—19 december 1973), — 181.
 16. Э. Неувальд, Я. Соколовска, М. Козлицка, Определение кислорода в порошках алюминия методом восстановительного плавления, см. п 15, 10.
 17. Weitaο Diao. Determination oxygen in Al — powder. Anal. Chem., 1985, 13, № 10, 728—732.
 18. Graule Karin, Craltath Erhard. Bestimmung von Argon neben Stickstoff und Sauerstoff in pulver —metallurgisch hergestellten Werkstoffen mit einem modifizierten Tragergas — Heissextraktions — gerat, Fresenius. Z.anal. Chem., 1989, 335, № 3, 299—303.
 19. Л.Г. Беркович, О.В. Завьялов, В.В. Ковалев, К.Ю. Натансон, П.Н. Петров (1980). Одновременное определение углерода и азота в порошках ниобия методом вакуумной экстракции. Зав. лаб. (L.G. Berkovich, O.V. Zavjalov, V.V. Kovalev, K.Y. Natanson, P.N. Petrov, (1980). Sumultaneous determination carbon and nitrogen in niobium powders by method of vacuum extraction. Zav. lab.), 46, № 3, 218—219.
 20. Н.П. Синяева, А.М. Вассерман, Л.Л. Кунин, В.М. Хохрин, Ю.Г. Олесов (1975). Определение кислорода в объеме и на поверхности частиц порошков на основе титана. Ж. аналит. химии (N.P. Sinaeva, A.M. Vasserman, L.L. Kunin, V.M. Hohrin, Y.G. Olesov, (1975). Determination oxygen in volume and on surface of powders particles on titanium base. Journ. analyt. chem.), 30, № 6, 1143—1147.
 21. Б.А. Цылов, В.И. Недашковский (1968). Исследование содержания газов в карбонильном никелевом порошке. Цветные металлы (B.A. Zylov, V.I. Nedashkovskij (1968). Investigation contents gases in carbonil nickel powder. Nonferrous metals), № 7, 22—23.

22. Vaclfvinek Jiri (1961). Stanoveni obsahu plynu v proskovych materialech metodu vakuove ekstrakce. Hutn. Listy, 16, 7, 509—512.
23. Ishikawa Makoto, Ogahara Iichi (1979). Determination of nitrogen in powdered niobium by high temperature vacuum extraction with Graphite addition procedure. Trans. Jap. Inst. Metals, 20, № 6, 311—322.
24. Ishikawa Makoto, Ogahara Iichi (1978). Influence graphite on extraction nitrogen from tantalum powder by method hot extraction. Trans. J. Jap. Inst. Metals, 42, № 7, 724—730.
25. J.C. Tobin, M.J. Sinnott (1958). Gas desorption of Copper Powders. Trans. Met. Soc. AIME, april, 167—171.
26. И.И. Платонов, А.А. Федоров (1966). Определение кислорода (0,1—28 %) в железных порошках и исходных продуктах усовершенствованным водородным методом. Сб. трудов ЦНИИЧМ (I.I. Platonov, A.A. Fedotov (1966). Determination oxygen (0,1—28 %) in ferrous powders and starting products by improved hydrogen method. Trans. ZNICHM), вып. 49, 64—66.
27. Л.В. Красниченко, В.С. Крещик, М.Г. Росс (1965). Определение кислорода в железных порошках. Порошковая металлургия (L.V. Krasnichenko, V.S. Kreshik, M.G. Ross (1965). Determination oxygen in ferrous powders. Powder metallurgy), № 6, 49—52.
28. S.P. Awasthi, S. Sahasranaman, M. Sundaresan (1967). Determination of combined nitrogen in tungsten metal powder. Analyst, 92, № 1099, 650—652.
29. В.Н. Вовк, Р.К. Огнев, С.Н. Бубыр, А.И. Перевязко, Г.Г. Коломоец (1970). Спектральное фотоэлектрическое определение водорода в порошковом титане. Сб. трудов Всесоюз. н.- и. и. проектн. ин-та титана (V.N. Vovk, R.K. Ognev, S.N. Bybir, A.I. Perevazko, G.G. Kolomoets (1970). Spectral photoelectrical determination hydrogen in titanium powder. Trans. allunion n-i. and project inst. titanium), 5, 125—128.
30. Chiba Minoru, Ando Tsutomu (1982). Determination general oxygen content in thin iron powders by neutron activation by 14 MeV. J. Jap. Inst. Metals, 46, № 7, 687—691.
31. А.А. Мухаммедов, А.А. Рахмонов (1986). Недеструктивное определение примесей легких элементов в порошках и сплавах молибдена нейтронно-активационным методом анализа. Зав. лаб. (A.A. Muhammedov, A.A. Rahmonov (1986). Indestructible determination of admixtures light elements in molybdenum powders and alloys by neutron-activation method. Zav. lab), 52, № 4, 14—15.
32. J.C. Gonzalez (1987). Simple method to estimate nitride and nitrogen contents in self - shielded FCAW weld metal. J. Mater. Sci. Lett., 6, № 1, 111—112.
33. Р.А. Адриевский, С.Э. Зеер, В.А. Косицкая (1986). Способ определения содержания кислорода в ультрадисперсных металлических порошках, Авт. свид. 1247735, СССР, заявл. 04.02.85 № 3872869/24—25, опубли. в Б.И. (R.A. Andrievskij, S.E. Zeer, V.A. Kositskaj (1986). Method of oxygen content determination in ultradispersion metallic powders, Patent 1247735, USSR, from 04.02.85, № 3872869/24—25, publ. in B.I.), МКИ G 01N 27/02.
34. О.Д. Сміян (2018). Водень і руйнування металу об'єктів тривалої експлуатації. К., Наукова думка (O.D. Smian (2018). Hydrogen and destruction of metal objects of prolonged exploitation. K., Science dumka), 344 с/р.
35. Standard ASTM B215. Practices for Sampling Metal Powders
36. ГОСТ 23148-98 (ИСО 3954-77). Порошки, применяемые в порошковой металлургии. Отбор проб. (Powders, applicable in powder metallurgy. Samples selection).
37. ГОСТ 27417-98 (ИСО 4491-4-89). Порошки металлические. Определение общего содержания кислорода методом восстановительной экстракции (GOST 27417-98 (ISO 4491-4-89). Metallic powders. Determination of all oxygen content by Method restoring extraction).
38. ГОСТ 29006-91. Метод определения кислорода, восстановимого водородом (GOST 29006-91. Method determination oxygen, restoring by hydrogen).
39. ГОСТ 18897-98. Порошки металлические. Определение содержания кислорода методами восстановления водородом (водородные потери) (GOST 18897-98. Metallic powders. Determination oxygen content by method hydrogen restoring (hydrogen loss)).
40. ГСО 1634-2002. Стандартный образец состава порошка железного типа ПЖВ4 (P16) (GSO 1634-2002. Standard sample iron powder PGV49 (R16)).
41. ГСО 1634-79. Стандартный образец состава порошка железного ПЖ4 (471) (GSO 1634-79. Standard sample iron powder PG4 (471)).
42. ГСО 3011-2002. Стандартный образец состава порошка железного типа ПЖВ3 (P21). (GSO 3011-2002. Standard sample iron powder PGV3 (R21)).
43. ГСО 9833-2011. Стандартный образец массовой доли кислорода в меди (порошок). (GSO 9833-2011. Standard sample of mass part oxygen in copper (powder)).
44. Standard ASTM E159-17. Standard Test Method for Loss of Mass in Reducing Gas Atmosphere for Cobalt, Copper, Tungsten and Iron Powders (Hydrogen Loss).
45. Standard ASTM B243. Terminology of Powder Metallurgy
46. М.М. Калинюк (2016). Визначення вмісту водню в гідрідах перехідних металів 4А та 5А груп періодичної системи елементів. Метрологія та прилади (M.M. Kalyniuk (2016). Determination of hydrogen content in hydride of the transitional metals 4A and 5A groups of periodic system of elements. Metrology and instruments), № 3, 62—70.
47. Я. Прошовский (1975). Техника высокого вакуума. М., Мир (Y. Groshovskij (1975). Technology of high vacuum. M., Mir), 622 с/с.
48. С. Дэшман (1964). Научные основы вакуумной техники, М., Мир (S. Deshman (1964). Scientific principles of vacuum technology. M., Mir), 715 с/с.
49. В.М. Устименко, М.М. Калинюк (2008). Розроблення стандартного зразка вмісту кисню та азоту в сталях. Інформ. Бюлетень Мін. пром. політики України зі стандартизації, метрології та управління якістю (V.V. Ustimenko, M.M. Kalyniuk (2008). Elaboration of standard sample of the oxygen and nitrogen content in steels. Inform. Bulletin of the Min. industrial politics from standardization, metrology and control of quality), № 3(17), 48—52.
50. С.В. Шубина, М.Е. Трофимова (2006). Стандартные образцы для метрологического обеспечения. Определение газов в металлах, Стандартные образцы (S.V. Shubina, V.T. Trofimova (2006). Standard samples for metrological guarantee of determination gases in metals, Standard samples), № 4, 13—23. ■

Отримано / received: 27.06.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. О.Д. Сміяном (Україна).

D. Sc. (Techn.) O.D. Smian, Ukraine, recommended this article to be published.

ДО 70-РІЧЧЯ СЕРГІЯ ВІТАЛІЙОВИЧА ПРОНЕНКА

26 жовтня 2019 року виповнилося 70 років **Сергію Віталійовичу Проненку**, начальнику науково-технічного відділу міжнародного співробітництва у сфері метрології Державного підприємства «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»), члену-кореспонденту Академії метрології України.



З 1966 по 1972 рік Сергій Віталійович студент Московського інженерно-фізичного інституту та Київського інституту цивільної авіації, де й розпочав свою трудову біографію на посаді лаборанта. З 1973 року його наукова і трудова діяльність пов'язана з метрологією. До 1998 року С.В. Проненко працював в установах та на підприємствах України на різних відповідальних наукових й керівних посадах: від інженера, науковця до директора. У цей період його трудової діяльності потрібно відзначити великий внесок у розвиток та функціонування метрологічної системи в цукровій промисловості під час роботи у Всесоюзному науково-дослідному інституті цукрової промисловості на посадах старшого наукового співробітника, завідувача групою, завідувача лабораторією, завідувача сектором метрологічного забезпечення.

У 1998 році з посади головного конструктора НВФ «Техніка, Медицина, Екологія» Сергій Віталійович був запрошений на роботу до Українського державного науково-виробничого центру стандартизації, метрології та сертифікації (нині — ДП «Укрметртестстандарт»). Обіймав посади провідного інженера, начальника відділу, заступника директора Інституту метрологічної служби України з науково-методичної роботи та міжнародного співробітництва (вільно володіє англійською мовою). На сьогодні — начальник науково-технічного відділу міжнародного співробітництва Науково-технічного інституту національної метрологічної служби України ДП «Укрметртестстандарт».

За роки роботи в ДП «Укрметртестстандарт» під його керівництвом виконано кілька науково-дослідних робіт з державної метрологічної атестації складних вимірювальних комплексів, таких як вузли обліку нафти, гаряче- та холодно-водні проливні установки, спектрофотометри різних видів та інші засоби оптико-фізичних вимірювань, аналізатори клініко-діагностичного призначення. Сергій Віталійович є розробником понад 50-ти нормативних та методичних документів, серед яких більше десяти державних стандартів. Як експерт-консультант брав участь у створенні Державного еталона електролітичної провідності рідин, в інших науково-технічних розробленнях метрологічних відділів Центру.

С.В. Проненко є автором понад 30 публікацій, учасником та доповідачем міжнародних конференцій і нарад, науково-практичних навчальних семінарів. Веде активну науково-просвітницьку та навчальну роботу. Постійно бере участь у вирішенні питань міжнародного співробітництва з провідними метрологічними інститутами Європи, міжнародними та регіональними метрологічними організаціями — МОЗМ, МБМВ, ЄВРОМЕТ, КООМЕТ, МГС.

Науково-технічна та міжнародна діяльність С.В. Проненка відзначена державою: він нагороджений Почесною грамотою і Відзнакою Кабінету Міністрів України.

*Керівництво та колектив ДП «Укрметртестстандарт», Академія метрології України, редакція та редколегія журналу «Метрологія та прилади», друзі сердечно вітають Вас, шановний **Сергію Віталійовичу**, з ювілеєм! Бажаємо Вам міцного здоров'я, родинного тепла, щастя, творчого довголіття та подальших досягнень у житті!*



XI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ ОБЛІКУ ТЕПЛОТИ ТА ВОДИ»

С. Чередниченко, начальник відділу,
О. Зайцева, кандидат технічних наук,
заступник начальника відділу,

О. Ісхакова, начальник сектору,
Я. Волинська, науковий співробітник,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільськогосподарства України спільно з ДП «Укрметртестстандарт» провели у Києві з 8 по 10 жовтня 2019 року XI Міжнародну конференцію «Проблеми обліку теплоти та води». На конференції було розглянуто стан та перспективи розвитку метрологічного забезпечення обліку споживання теплоти та води, удосконалення еталонної та нормативної бази у сфері вимірювань температури, теплоти та витрати рідин.

У роботі конференції взяли участь фахівці міністерства, державних підприємств, що належать до сфери його управління, Національної академії наук України, промислових та житлово-комунальних підприємств, підприємств-виробників засобів обліку, представники теплопостачальних та водопостачальних організацій України та Білорусі.

Заступник начальника управління метрології – начальник відділу законодавчої метрології департаменту технічного регулювання Мінекономрозвитку України к.т.н. Л.М. Красоха в своїй доповіді висвітлила сучасний стан та перспективи розвитку метрологічної системи України. В Україні відносини, що виникають у процесі провадження метрологічної діяльності регулюються Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність», що розроблений на основі документа *OIML D1* і набрав чинності 01.01.2016. До цього Закону впроваджено понад 40 нормативно-правових актів, які визначають сферу законодавчо регульованої метрології, одиниці вимірювання, вимоги до національних еталонів, засобів вимірювальної техніки, проведення повірки та оцінки відповідності, а також здійснення метрологічного нагляду.

Україна є повноправним членом однієї міжнародної та трьох регіональних метрологічних організацій, а також членом-кореспондентом Міжнародної організації законодавчої метрології. Щорічно проводиться удосконалення діючих еталонів та введення в дію нових. Регулярно проводяться звернення національних еталонів України, результатом чого є збільшення кількості калібрувальних та вимірювальних можливостей (СМС рядків) розміщених у базі даних Міжнародного бюро мір та ваг (*BIPM*).

Доповідь заступника генерального директора ДП «Укрметртестстандарт» к.т.н. Ю.В. Кузьменка була присвячена новим визначенням основних одиниць міжнародної системи одиниць. 16 листопада 2018 року учасники 26 Генеральної конференції з мір та ваг у Парижі прийняли історичне рішення стосовно зміни визначень чотирьох із семи основних одиниць Міжнародної системи одиниць (*SI*) — кілограма, ампера, кельвіна і моля. Надання чинності зміні одиниць вимірювання було приурочено до Всесвітнього дня метрології, який щорічно відзначається 20 травня. Згідно з цим рішенням ці одиниці отримали нові математичні визначення, пов'язані з фундаментальними фізичними константами: постійною Планка, зарядом

електрона, постійною Больцмана та числом Авогадро. Міжнародна система одиниць є найбільш широко використовуваною системою одиниць у світі, як у повсякденному житті, так і в науці та техніці, необхідна для того, щоби повсякденні одиниці вимірювань, будь-то метр або секунда, залишалися порівняними і узгодженими у всьому світі. Єдність вимірювань не тільки підтримує їх узгодженість у всіх країнах світу, але й зміцнює довіру суспільства до їх достовірності. Перехід на нову систему *SI* прискорить розвиток та впровадження іновативних рішень та технологій у науці та на виробництві.

І.О. Потоцький (ДП «Укрметртестстандарт») доповів про зміни до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність», внесені в 2019 році. Поняття «повідка на добровільних засадах» вилучено із Закону. Повірка можлива лише для законодавчо регульованих ЗВТ, перелік яких визначено Постановою КМУ № 374 від 04.06.2015. Згідно зі змінами делегування науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами та повірочними лабораторіями, визначеними цією частиною, своїх повноважень щодо проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, іншим особам або залучення ними в будь-який спосіб до цієї діяльності осіб, які не мають відповідних на те повноважень, забороняється. Також встановлюється вимога стосовно документального підтвердження метрологічної простежуваності результатів вимірювання під час калібрування.

Зазнав змін і Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів, затверджений наказом Мінекономрозвитку України № 193 від 08.02.2016. Роботи, пов'язані з проведенням повірки ЗВТ, можуть проводитися виконавцями з використанням еталонів, допоміжних ЗВТ та допоміжного обладнання замовника цих робіт у межах діапазону вимірювання, наведеного у галузі уповноваження виконавця. Використання виконавцем під час проведення робіт з повірки ЗВТ еталонів, допоміжних ЗВТ та допоміжного обладнання, які належать замовнику таких робіт, допускається за наявності відповідного договору щодо використання еталонів, допоміжних ЗВТ та допоміжного обладнання, укладеного ним із замовником. Результати повірки ЗВТ вважають позитивними, якщо їх метрологічні й технічні характеристики відповідають вимогам Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та технічних регламентів щодо ЗВТ. Результати повірки ЗВТ, випущених з виробництва і введених в експлуатацію до набрання чинності технічними регламентами щодо ЗВТ, вважають позитивними, якщо їх метрологічні та технічні характеристики відповідають вимогам нормативних документів, чинних на момент їх виробництва і введення в експлуатацію.

Змінам в стандарті ДСТУ *ISO/IEC 17025* «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних

лабораторій» присвятив доповідь В.В. Глущенко (ДП «Укрметрестандарт»). ISO/IEC 17025 застосовується на міжнародному рівні не тільки з метою акредитації лабораторії національними органами з акредитації, а й для організації роботи в самій лабораторії. Тобто всі виробники та організації можуть використовувати цей стандарт для забезпечення достовірності робіт у своїх лабораторіях. Діяльність лабораторії повинна виконуватися у такий спосіб, щоби відповідати вимогам цього документа, вимогам замовників лабораторії, регуляторних органів та організацій, що надають визнання. Зазначене повинно включати діяльність лабораторії, яка виконується в її постійних приміщеннях, на віддалених від її постійних приміщень ділянках, на тимчасових або мобільних об'єктах чи в приміщенні замовника.

О.М. Гофштейн (СТОВ «АРВАС», Республіка Білорусь) ознайомив учасників зі станом обліку теплоресурсів в Білорусі. СТОВ «АРВАС» є лідером на білоруському ринку у сфері розроблення приладів контролю, вимірювання та регулювання витрати теплової енергії та рідких середовищ. Серед засобів вимірювальної техніки, що виробляються підприємством, можна виділити квартирні теплотічильники, теплотічильники для житлових та промислових будівель, пристрої для погодного регулювання систем опалення, пофасадного регулювання, каскадного регулювання систем гарячого водопостачання.

Удосконалення системи моніторингу теплового стану просторово розгалужених тепломереж із застосуванням комплексу апаратно-програмних засобів формування тепловісійних зображень на базі безпілотних літальних апаратів (квадрокоптерів) висвітлив у своїй доповіді А.О. Запорожець (ІТТФ НАНУ). Досліджено принципи побудови теплових мереж та наведена можливість застосування теплової аерозйомки для їх постійного моніторингу. Серед переваг застосування теплової аерозйомки: оперативність, мобільність, одночасне обстеження великих площ, запис та аналіз отриманих даних.

«Виявлення витоків як невід'ємна складова якісного управління водопровідними мережами» — така тема доповіді М.О. Лукаша («ІН-ПРЕМ»). Загальні операційні втрати водопостачальних організацій мають такі складові: несанкціоновані врізки в трубопровід; малоефективні системи збору, контролю та аналізу даних; недостовірний технологічний облік; невідомі витоки та аварійні пориви; недостовірний комерційний облік. Однією з найбільших складових загальних операційних втрат водопостачальних організацій є втрата води через багаторічні витоки та аварійні пориви водопроводу на всьому шляху її транспортування. Система моніторингу стану водопровідних мереж на базі високоточних повнопрохідних електромагнітних витратомірів дозволяє визначити реальний розмір витоків та газових кишень з присвоєнням їм рейтингу небезпечності; не вимагає порушення регламенту роботи трубопроводу на час проведення інспекції; результати дослідження не залежать від матеріалів трубопроводу.

Доповіді виробників засобів обліку теплоти та води з Києва, Харкова та Трускавця були присвячені новим приладам обліку води та теплоти та еталонному обладнанню для їх повірки.

У своїй доповіді к.т.н. А.А. Стеценко (ПрАТ «Енергооблік») розповів про досвід підприємства з виробництва,

сертифікації та експлуатації приладів обліку. На сьогодні економіка Європейського Союзу є однією з найпотужніших економік світу, що постійно привертає до себе виробників з усього світу, які бажають розпочати збут своєї продукції в країнах ЄС. При цьому виробникові потрібно довести, що його продукція безпечна, що вона відповідає необхідним вимогам і не становитиме загрози споживачеві, не завдасть шкоди навколишньому середовищу. Підтвердивши таку відповідність, виробник отримує доступ на ринок, а споживачі будуть впевнені в якості продукції.

У зв'язку зі значним збільшенням парку приладів обліку в експлуатації, актуальною стає проблема впровадження систем диспетчеризації обліку теплоти та води. Про досвід упровадження такої системи доповів О.В. Дроздов (ТОВ «Укртеплооблік»). Упроваджена система має такі можливості:

- ведення даних за обслуговуваними об'єктами (будинками та квартирами), прив'язка квартир до будинків, пошук об'єктів у базі за заданими параметрами;
- облік наявних приладів обліку тепла, води; задання типу приладу, технічних параметрів (заводського номера, міжповірного інтервалу); задання зв'язку з *M-bus* пристроями, об'єктами обліку, формату отриманих даних;
- реєстрація доступних *M-bus* пристроїв, задання їхніх параметрів роботи та отриманих даних;
- отримання зведених звітів стосовно споживання теплоти, води на контрольованих об'єктах; можливість отримання вивантаження даних у *csv* / *xls* форматі.

Застосування системи диспетчеризації дозволяє проводити аналіз режимів споживання з метою раціонального використання ресурсів.

Б.Й. Тракало (МЧП «ТАКТ») у своїй доповіді звернув увагу на вимоги до проливних установок для повірки лічильників води у зв'язку з набуттям чинності нової редакції стандарту ДСТУ ISO 4064-1:2018 «Лічильники холодної питної води та гарячої води. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги». У стандарті визначено нові вимоги до проливних установок, а саме: розширена невизначеність не повинна перевищувати 1/5 встановленого значення максимально допустимої похибки лічильника для випробувань з метою оцінювання типу і 1/3 – для повірки; вплив установки на роботу лічильника, який повіряється, повинен бути несуттєвим; мінімальний повірочний об'єм поставлений у залежність від конструкції лічильного механізму лічильників води, а також від методу зчитування інформації з лічильного механізму. Випробувальні установки повинні забезпечувати визначення похибки лічильника на чітко встановлених випробувальних витратах, у заданих діапазонах їх значень і в межах допустимих відхилень протягом одного випробування, за несуттєвого впливу установки на роботу лічильника.

Доповіді фахівців ДП «Укрметрестандарт» були присвячені досвіду проведення робіт з оцінки відповідності технічним регламентам засобів вимірювальної техніки, які застосовуються для обліку споживання теплоти та води в промисловості та комунальному господарстві.

Обговорення доповідей та дискусії на конференції дали можливість учасникам здійснити обмін досвідом, виробити спільний погляд на вирішення проблем у сфері обліку теплоти та води, встановити ділові контакти. 