

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



та прилади

№ 2(52), 2015

Науково-виробничий журнал

Журнал **зареєстровано:**
у Державній реєстраційній
службі України, свідоцтво серія
КВ № 20033-8933ПР від 17.05.2013;
у Вищій атестаційній комісії України,
Постанова Президії **ВАК**
№ 1-05/2 від 10.03.2010

Журнал **включено** до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
ТОВ виробничо-комерційна
фірма «Фавор»

Видається з **2006** року
Передплатний індекс **92386**

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Гінзбург М. Д., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Домницький Р. А.
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Несєжмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., д. т. н., проф.
Радєв Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
Столярчук П. Г., д. т. н., проф.
Сурду М. М., д. т. н., проф.
Туз Ю. М., д. т. н., проф.
Хакімов О., д. т. н., проф., Узбекистан
Чалий В. П., к. т. н., с. н. с.
Черепков С. Т., к. т. н. доц.
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

Редакційна група:

Головний редактор Фісун В. П.
Науковий редактор — відповідальний
секретар Винокуров Л. І.
Дизайнер-верстальник Зайцев Ю. О.

Журнал **рекомендовано до друку**
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №3 від 03.04.2015)

Видавник ВКФ «Фавор»

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Мироносицька, 40;
Тел.: (057) 700-46-81, (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
mp@metrology.kharkov.ua
<http://www.metpriladi.com/>

Підписано до друку 30.04.2015.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 500 прим.
Замовлення № 11.

© «Метрологія та прилади», 2015

Щороку 20 травня метрологи всіх країн планети відзначають
своє професійне свято — Всесвітній день метрології.

У поточному році світове метрологічне співтовариство
відзначатиме це свято в одинадцятий раз. Його дата тісно
пов'язана з початком формування міжнародних органів
із забезпечення єдності вимірювань та зі стандартизації.
20 травня 1875 року представники 17 держав світу
на Міжнародній дипломатичній конференції в Парижі «для
забезпечення єдності та удосконалення метричної системи»
прийняли Метричну конвенцію (МК) й для координації дій країн-
членів МК заснували Міжнародне бюро з мір та вагів (BIPM)
з дислокацією у передмісті Парижу Севрі (нині одному з районів
столиці Франції).

Час, що минув, підтвердив правильність і далекоглядність
таких рішень.

**Редакція та редколегія журналу «Метрологія та прилади»
щиро вітають метрологів України з професійним святом —
Всесвітнім днем метрології!**

**Бажаємо всім здоров'я, подальших творчих і виробничих успіхів,
миру на нашій землі та процвітання нашої держави!**

МІЖНАРОДНІ ЗВІРЕННЯ

Величко О., Шевкун С.

Міжнародні звірення в рамках COOMET

національних еталонів одиниць

електричної ємності номіналом 10 і 100 пФ 3

INTERNATIONAL COMPARAISONS

Velychko O., Shevkun S.

International comparison COOMET

of National Standard

of electric capability units at 10 and 100 pF

ВИМІРЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ

Самойленко О., Тertiшній Є.

Визначення маси нафтопродуктів

і скраплених вуглеводневих газів

ультразвуковими рівнемірами Analіq-M 9

MEASUREMENT AND TESTS

Samoylenko O., Tertyshnyy E.

Determine of mass petroleum products

and liquid petroleum gas

with ultrasonic level meters Analіq-M

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Лесовой Л., Фединець В., Кузик В., Чабан Б.

Визначення параметрів витратоміра,

оптимального за точністю вимірювання

витрати природного газу 15

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

Lesovoi L., Fedynets V., Kuzyk V., Chaban B.

Definition of parameters the flow meter

of optimal measurement accuracy

flow of the natural gas

МЕТОДИ І МЕТОДИКИ

Стенцель Й., Літвінов К., Проказа О., Рябіченко А.

Дослідження складних систем контролю

та управління методом квадратур 24

METHODS AND PROCEDURES

Stencel J., Litvinov K., Prokaza E., Ryabichenko A.

The research of complex systems control

by the quadratures method

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ

Приміський В., Івасенко В.

Полум'яно-іонізаційний детектор

з коаксіальним подаванням газів.

Експериментальні дослідження 29

MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Ivasenko V., Primisky V.

A flame ionization detector

with coaxial type of gases supply.

Experimental studies.

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ

Кондрашов С., Опришкіна М., Мацак О.

Контроль метрологічного стану систем

з нелінійними первинними перетворювачами

за допомогою тестових впливів 33

ACCURACY AND RELIABILITY

Kondrashov S., Oprishkina M., Matsak O.

Metrological control of the systems

with nonlinear primary converters

through test influence

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Гоц Н.

Удосконалення метрологічного забезпечення

термометрії за інфрачервоним випроміненням 42

METROLOGICAL ASSURANCE

Gots N.

Metrological assurance improvement

of infrared radiation thermometry

ПОВІРКА ТА КАЛІБРУВАННЯ

Коцюба А.

Особливості калібрування ЗВТ

відповідно до нової редакції Закону України

«Про метрологію та метрологічну діяльність» 50

VERIFICATION AND CALIBRATION

Kotsyuba A.

Features calibration of measuring instruments

in accordance with the new edition of the Law of Ukraine

«On metrology and metrological activity»

Одноралов В.

Калібрування та повірка ЗВТ:

відмінності й подібності 55

Calibration and verification of measuring instruments:

differences and similarities

УПРАВЛІННЯ ВИМІРЮВАННЯМИ

Петришин Н.

Застосування системних технологій

управління вимірюваннями

на стадії проектування вузлів обліку газу 61

MANAGEMENT OF MEASUREMENTS

Petryshyn N.

Application Metering System

Technology Management

at the design stage of metering gas stations

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Кучерук В., Кулаков П., Гнесь Т., Паламарчук Є.

Дослідження похибок непрямих вимірювань

зоотехнічних параметрів тварин 66

ERRORS AND UNCERTAINTY

Kucheruk V., Kulakov P., Gnes T., Palamarchuk Y.

The study of indirect measuring errors

of animal zootechnical parameters

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ

План набору слухачів на 2015 рік 72

TRAINING EXPERTS

State Enterprise for Year 2015

ІНФОРМАЦІЯ

..... 41, 54, 71

INFORMATION



О. Величко, доктор технічних наук, професор, директор науково-виробничого інституту метрологічного забезпечення вимірювань електромагнітних величин,

С. Шевкун, начальник науково-дослідного відділу, ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Розглянуто основні результати міжнародних додаткових звірень національних еталонів одиниць електричної ємності номіналом 10 і 100 пФ на частоті 1 кГц у рамках проекту COOMET 554/UA/12 (COOMET.EM-S13). Звірення, пілотною лабораторією яких було ДП «Укрметртестстандарт», проведені за участю національних метрологічних інститутів (НМІ) України, Польщі та Білорусі протягом 2012–2013 років.

In the article the basic results of international additional comparison of national standards of units of electric capacity are considered for values 10 pF and 100 pF on frequency of 1 kHz within the framework of project of COOMET 554/UA/12 (COOMET.EM-S13). SE «Ukrmetrtteststandard» was pilot laboratory and comparison carry out with participation of national metrology institutes (NMI) of Ukraine, Poland and Belarus during 2012–2013.

Ключові слова: національні еталони, міжнародні звірення, COOMET, електрична ємність, НМІ.

Keywords: national standards, international comparison, COOMET, electric capacity, NMI.

Система національних еталонів створюється для реалізації і передавання розміру узаконених одиниць вимірювання різноманітних фізичних величин для задоволення потреб національної економіки. У разі, коли національні еталони незалежно реалізують одиниці вимірювань, для підтвердження їх еквівалентності вони повинні регулярно звірятися з національними еталонами інших країн.

Звірення еталонів проводяться під егідою консультативних комітетів Міжнародного комітету з мір та вагів (CIPM) або регіональними метрологічними організаціями (РМО) [1, 2]. Підтвердження еквівалентності національних еталонів з еталонами інших країн здійснюється за встановленими на міжнародному рівні процедурами у рамках багатосторонньої Угоди CIPM про взаємне визнання національних еталонів та калібрувальних і вимірювальних можливостей (Угоди CIPM MRA) [3–6].

Міжнародні додаткові звірення національних еталонів одиниць електричної ємності номіналом 10 і 100 пФ на частоті 1 кГц у рамках проекту COOMET 554/UA/12 (COOMET.EM-S13) [7], пілотною лабораторією яких було ДП «Укрметртестстандарт», проведені за участю НМІ України, Польщі та Білорусі протягом 2012–2013 років. НМІ — учасники цих звірень такі: ДП «Укрметртестстандарт» (UMTS, Україна); GUM — Центральний офіс вимірювань (Польща); БелГІМ — Білоруський державний інститут метрології (BelGIM, Білорусь).

Ці звірення проводилися між НМІ — учасниками, які представляють дві РМО: COOMET (UMTS і BelGIM) і EURAMET (GUM). Пілотна лабораторія забезпечила НМІ — учасників звірень еталоном передавання (ЕП), досліджувала його дрейф протягом всього часу проведення звірень, розробила і виконувала графік проведення



О. Величко



С. Шевкун



Рис. 1. Державний первинний еталон України одиниць електричної ємності і фактора втрат

Fig. 1. State primary standard of Ukraine of units of electric capacity and factor of losses

звірень, збирала й аналізувала отримані дані звірень, підготувала попередній і заключний звіти тощо [8].

У звіреннях від України представлено Державний первинний еталон України одиниць електричної ємності і фактора втрат (ДЕТУ 08-06-01), який зберігається в ДП «Укрметртестстандарт». Загальний вид зазначеного еталона наведено на рис. 1.

1. ЕТАЛОН ПЕРЕДАВАННЯ, ЙОГО ДРЕЙФ ЗА ЧАС ЗВІРЕНЬ ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ

Для проведення звірень обрано ЕП Andeen-Hagerling модель АН11А з номінальними значеннями мір ємностей 10 і 100 пФ, вмонтованих у один корпус АН1100. Цей ЕП належить ДП «Укрметртестстандарт» і входить до складу еталона ДЕТУ 08-06-01. Він забезпечує контроль критичних параметрів терморегулювання, а кожна міра ємності АН11А ЕП має вбудований термостат з подвійною системою термостакування [8].

Основні метрологічні та технічні характеристики мір ємності АН11А і корпуса АН1100 такі:

- стабільність краща за 0,3 ppm/рік;
- температурний коефіцієнт ємності менший від 0,01 ppm/°C;
- загальний гістерезис від температурних циклів менший від 0,05 ppm;
- загальний гістерезис від механічних впливів менший від 0,05 ppm;
- коефіцієнт змінної напруги менший від 0,003 ppm/V;
- коефіцієнт постійної напруги менший від 0,0001 ppm/V;
- чутливість на зміну напруги живлення менша від 0,0003 ppm на 1 % зміни;
- фактор втрат менший від 0,000003 tg δ ;

- робочі діапазони напруг: 85—115, 102—138, 187—253, 204—276 В (середньоквадратичні значення, СКЗ);

- частоти напруги живлення: від 48 до 440 Гц;
- робочий діапазон температур: від 10 до 40 °C;
- робочий діапазон відносної вологості повітря: від 0 до 85 %.

Після отримання ЕП черговим НМІ — учасником здійснювалася стабілізація його роботи протягом трьох днів до початку вимірювань.

Вимірювання НМІ — учасниками проводилися за таких умов:

- температура: (23 ± 1) °C;
- відносна вологість повітря: між 30 і 70 %;
- вимірювальна частота: 1 кГц;
- вимірювальна напруга для обох номіналів мір ємності: 100 В (СКЗ).

У випадку, якщо вимірювальна напруга відрізнялася від 100 В (BelGIM — 60 В), фіксувалася фактична напруга і вводилася додаткова складова невизначеності

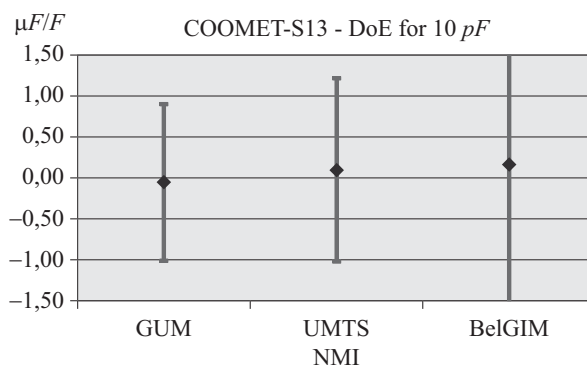


Рис. 2. Дрейф ЕП для номіналу 10 пФ на частоті 1 кГц
Fig. 2. Drift of transfer standard for 10 pF on frequency of 1 kHz

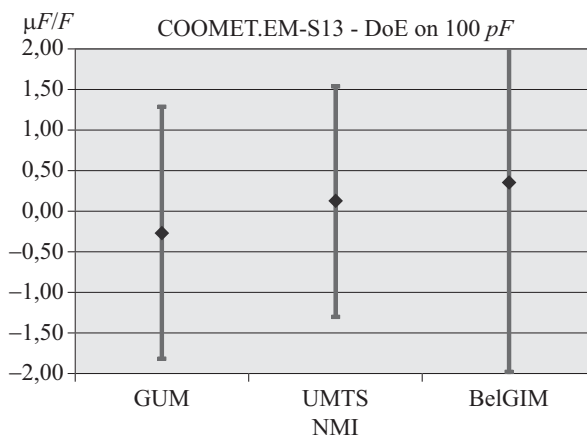


Рис. 3. Дрейф ЕП для номіналу 100 пФ на частоті 1 кГц

Fig. 3. Drift of transfer standard for 100 pF on frequency of 1 kHz

вимірювань щодо відмінності вимірювальної напруги до бюджету невизначеності вимірювань для конкретного НМІ — учасника.

UMTS як пілотна лабораторія систематично здійснювала вимірювання для визначення часового дрейфу ЕП для номіналів мір ємностей 10 і 100 пФ на частоті 1 кГц. Результати цих досліджень подано на рис. 2 і 3 [8]. Такі вимірювання проводилися в обов'язковому порядку перед відправленням ЕП до чергового НМІ — учасника, а також після його повернення, оскільки ЕП має певний часовий дрейф. Зважаючи на отримані пілотною лабораторією результати вимірювань, можна констатувати, що зазначений дрейф був незначним і не мав суттєвого впливу на отримані НМІ — учасниками результати досліджень ЕП.

2. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЗВІРЕНЬ ЕТАЛОНІВ

Кожний НМІ — учасник за результатами свого дослідження ЕП надавав пілотній лабораторії таку інформацію у виді звіту:

- * інформацію щодо дат вимірювань;
- * значення вимірювальної частоти для обох номіналів мір ємності;
- * значення вимірювальної напруги для обох номіналів мір ємності;
- * вимірені значення ємностей з відповідними бюджетами невизначеності вимірювань;
- * значення температури повітря у корпусі АН1100 і температури повітря навколишнього середовища;
- * значення відносної вологості повітря навколишнього середовища.

Простежуваність до одиниць SI національного еталона кожного НМІ — учасника надавалася пілотній лабораторії [2, 8].

Для проведених додаткових звірень COOMET. EM-S13 простежуваність національних еталонів НМІ — учасників була такою:

- ▲ еталон GUM — до первинного еталона Міжнародного бюро з мір та вагів (BIPM) на основі квантового ефекту Холла (Quantum Hall Resistance);
- ▲ еталон UMTS — до первинного еталона одиниці ємності NIST, США (Calculable Capacitor);
- ▲ еталон BelGIM — до первинного еталона одиниці ємності ВНИИМ, Росія (Calculable Capacitor).

Розрахунки невизначеності вимірювань кожним НМІ — учасником здійснювалися відповідно до настанови ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) [9]. Ними були розроблені власні бюджети невизначеності вимірювань для номіналів мір ємності 10 і 100 пФ. Загальна стандартна невизначеність вимірювань включала-

ся до звіту НМІ — учасника стосовно дослідження ЕП разом з виміреним значенням ємності.

До складових невизначеності вимірювань у бюджеті невизначеності НМІ — учасникам пропонувалося віднести як мінімум таке:

- експериментальну стандартну невизначеність N незалежних вимірювань (тип А);
- невизначеності первинного або іншого еталона, який використовували за дослідження ЕП;
- невизначеності необхідних для НМІ різноманітних коригувань вимірених значень ємностей.

НМІ — учасники могли також включати і додаткові специфічні для НМІ складові невизначеності вимірювань.

Отримані НМІ — учасниками відхилення значень ємностей (δC) від номінальних значень відповідно 10 і 100 пФ на частоті 1 кГц з їх розширеними невизначеностями (U) представлено у табл. 1. Усі наведені невизначеності мають коефіцієнт охоплення $k = 2$ з інтервалом довіри приблизно 95 % [8].

Опорне значення звірень x_{ref} отримано як середнє всіх значень НМІ — учасників звірень COOMET. EM-S13 за виразом:

$$x_{ref} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{u^2(x_i)} / \sum_{i=1}^N \frac{1}{u^2(x_i)} \quad (1)$$

з відповідною стандартною невизначеністю

$$u^2(x_{ref}) = 1 / \sum_{i=1}^N \frac{1}{u^2(x_i)}, \quad (2)$$

де: x_i — i -ий результат НМІ — учасника; $u(x_i)$ — стандартна невизначеність результату i -го НМІ — учасника; N — кількість учасників звірень COOMET. EM-S13 ($N = 3$).

Розраховані значення опорних значень з їхніми розширеними невизначеностями становили: $x_{ref} = 0,952$ мкФ/Ф, $U_{ref} = 0,411$ мкФ/Ф ($k = 2$) для 10 пФ на частоті 1 кГц; $x_{ref} = 1,283$ мкФ/Ф, $U_{ref} = 0,594$ мкФ/Ф ($k = 2$) для 100 пФ на частоті 1 кГц.

Таблиця 1. Отримані НМІ — учасниками відхилення від номінального значення з їхніми розширеними невизначеностями, мкФ/Ф

Table 1. Deviation of nominal value of HMI — participants with its extended uncertainties, $\mu F/F$

НМІ — учасник	10 пФ		100 пФ	
	δC_i	U_i	δC_i	U_i
GUM	0,900	0,500	1,000	1,000
UMTS	1,053	0,768	1,405	0,792
BelGIM	1,114	2,151	1,649	2,032

Таблиця 2. Ступені еквівалентності еталонів HMI — учасників з їхніми розширеними невизначеностями, мкФ/Ф

Table 2. Degrees of equivalence of standards of HMI — participants with its extended uncertainties, μF/F

HMI — учасник	10 пФ		100 пФ	
	D_i	$U(D_i)$	D_i	$U(D_i)$
GUM	-0,052	0,963	-0,263	1,552
UMTS	0,101	1,125	0,122	1,427
BelGIM	0,162	2,302	0,366	2,352

Ступінь еквівалентності еталона i -го HMI та відповідна розширена невизначеність у сенсі опорного значення звірень визначалися за виразами:

$$D_i = x_i - x_{ref} \quad (3)$$

$$u^2(D_i) = u^2(x_i) + u^2(x_{ref}). \quad (4)$$

Задекларовані невизначеності HMI — учасників повинні задовольняти нерівності:

$$|D_i| < 2u(D_i). \quad (5)$$

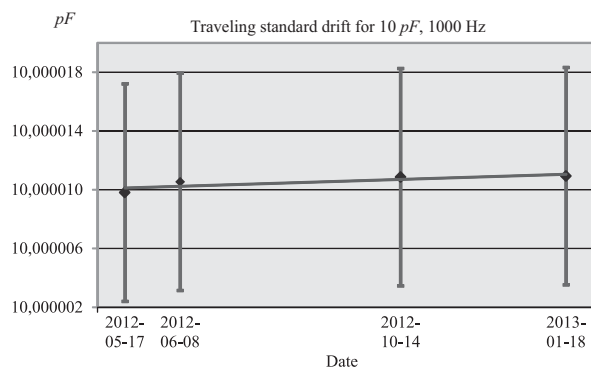


Рис. 4. Ступінь еквівалентності еталонів HMI — учасників для 10 пФ на частоті 1 кГц

Fig. 4. Degree of measurements equivalence of HMI — participants for 10 pF on frequency of 1 kHz

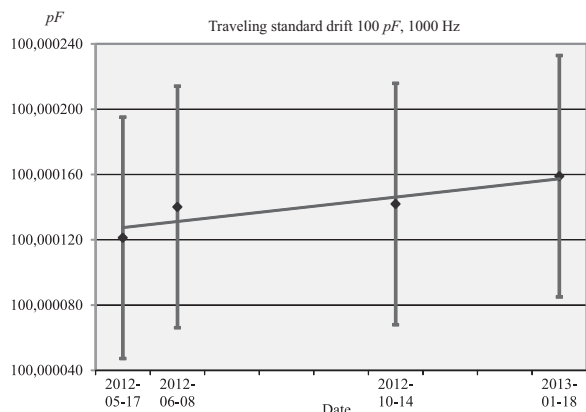


Рис. 5. Ступінь еквівалентності еталонів HMI — учасників для 100 пФ на частоті 1 кГц

Fig. 5. Degree of measurements equivalence of HMI — participants for 100 pF on frequency of 1 kHz

Ступені еквівалентності еталонів HMI — учасників з їхніми розширеними невизначеностями ($k = 2$) для 10 і 100 пФ на частоті 1 кГц у сенсі опорного значення звірень наведено у табл. 2 і на рис. 4 і 5 [8].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ПОГОДЖЕНОСТІ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗВІРЕНЬ

Розраховані значення χ^2 критерію (табл. 3) для отриманих результатів звірень еталонів HMI — учасників з урахуванням їхніх невизначеностей вимірювань ($\{x_i, u(x_i)\}, i = 1, \dots, N$) за виразом [10]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_{ref})^2}{u^2(x_i)}. \quad (6)$$

Значення критерію χ^2 для звірень COOMET.EM-S13 не перевищує критичних значень з рівнем охоплення 0,95 за нерівністю:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_{ref})^2}{u^2(x_i)} < \chi_{0,95}^2(N-1), \quad (7)$$

тобто отримані HMI — учасниками значення можна визнати погодженими, і це є об'єктивним підтвердженням заявлених HMI — учасниками невизначеностей вимірювань.

Максимум критерію E_N для HMI — учасників розраховували за виразом [10]:

$$\max_i E_N = \frac{|x_i - x_{ref}|}{2\sqrt{u^2(x_i) - u^2(x_{ref})}}. \quad (8)$$

Перевірку здійснювали послідовно для кожного HMI — учасника. Максимум критерію E_N для заявлених усіма HMI — учасниками невизначеностей

Таблиця 3. Отримані значення критерію χ^2 для номіналів мір ємностей 10 і 100 пФ

Table 3. Received values of χ^2 -criterion for nominal values of capacity measures on 10 and 100 pF

Ємність, пФ	χ^2	$\chi_{0,95}^2(n-1)$
10	0,064	5,9915
100	0,241	

Таблиця 4. Отримані значення для критерію E_N

Table 4. Received values for E_N -criterion

Ємність, пФ	HMI — учасник	E_N
10	GUM	0,207
	UMTS	0,262
	BelGIM	0,151
100	GUM	0,527
	UMTS	0,308
	BelGIM	0,361

Calibration and Measurement Capabilities

Electricity and Magnetism, Ukraine, UkrCSM (Ukrmetrteststandard), NSCIM (National Scientific Center - Institute of Metrology)



Calibration or Measurement Services			Measurand Level or Range			Measurement Conditions/Independent variables		Expanded Uncertainty					Uncertainty Matrix	Comments	NMI Service Identifier
Quantity	Instrument or artifact	Instrument Type or Method	Minimum value	Maximum value	units	Parameter	Specifications	Value	Units	Coverage Factor	Level of Confidence	Is the expanded uncertainty a relative one?			
High AC voltage ratio: phase displacement	High voltage transformer	Comparison by means of a comparator	15E-06	0.058	rad	Frequency	50 Hz	1.7E-04 to 7.5E-04	rad	2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	UkrCSM/12
						Voltage	1 kV to 220 kV								
High AC current ratio: error	Current transformer	Comparison by means of a comparator	0	0.05		Frequency	50 Hz	6E-05 to 8E-05		2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	UkrCSM/13
						Primary current	0.5 A to 10000 A								
						Secondary current	0.5 A, 1 A, 2 A, 2.5 A, 5 A								
High AC current ratio: phase displacement	Current transformer	Comparison by means of a comparator	3E-05	0.058	rad	Frequency	50 Hz	1E-04 to 1E-03	rad	2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	UkrCSM/14
						Primary current	0.5 A to 10000 A								
						Secondary current	0.5 A, 1 A, 2 A, 2.5 A, 5 A								
Capacitance: low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	10	10	pF	Frequency	1 kHz, 1.592 kHz	1	µF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/15
Capacitance: low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	100	100	pF	Frequency	1 kHz, 1.592 kHz	1	µF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/16
Capacitance: low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	1	1000	pF	Frequency	1 kHz, 1.592 kHz	12	µF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/17
Capacitance: dielectric capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	1	10	nF	Frequency	1 kHz, 1.592 kHz	14	µF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/18
Capacitance: dissipation factor for low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	1E-05	0.01		Capacitance	10 pF, 100 pF	8E-05		2	95%	No		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/19
						Frequency	1 kHz								
Capacitance: meter	Capacitance bridge, LCR meter	Comparison to capacitance standard	1	1000	pF	Frequency	1 kHz, 1.592 kHz	12	µF/F	2	95%	No		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/20
Capacitance: meter	Capacitance bridge, LCR meter	Comparison to capacitance standard	1	10	nF	Frequency	1 kHz, 1.592 kHz	14	µF/F	2	95%	No		Approved on 28 July 2010	UkrCSM/21

The BIPM key comparison database, July 2010

2/15

Рис. 6. Приклад таблиці СМС НМІ України для одиниці електричної ємності

Fig. 6. The example of CMC table HMI Ukraine for unit of electric capacity

та отриманих ступенів еквівалентності для 10 і 100 пФ задовольняє рівняння (7) і (8) (табл. 4).

4. КАЛІБРУВАЛЬНІ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ НМІ УКРАЇНИ ДЛЯ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ

У рамках Угоди CIPM MRA калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС) визначаються як найвищий рівень вимірювання або калібрування, звичайно пропонується клієнтам НМІ, поданий у значеннях довірчого рівня, рівного 95 %. СМС характеризують якість послуг НМІ з калібрування чи вимірювання, які надаються клієнтам на постійній основі. НМІ видають відповідні сертифікати калібрування чи вимірювання, які визнаються всіма учасниками Угоди CIPM MRA [11–13].

СМС НМІ країн публікують у виді pdf-файлів у Додатку С бази даних ключових звірень (KCDB) BIPM у виді таблиць. Приклад таблиці СМС НМІ України для одиниці електричної ємності наведено на рис. 6 [13–15].

Отримані результати звірень за проектом COOMET.EM-S13 підтверджують опубліковані у Додатку С бази даних KCDB BIPM СМС НМІ України (ДП «Укрметртестстандарт»).


ВИСНОВКИ

1. За результатами міжнародних додаткових звірень національних еталонів одиниць електричної ємності номіналом 10 і 100 пФ на частоті 1 кГц у рамках проекту COOMET.EM-S13, проведених за участю НМІ України, Польщі та Білорусі, отримано хороші результати. Звіт за проектом COOMET.EM-S13 опубліковано у Додатку В бази даних KCDB BIPM у рамках Угоди CIPM MRA.

2. Отримані результати звірень підтверджують опубліковані у Додатку С бази даних KCDB BIPM СМС НМІ України, що дозволяє ДП «Укрметртестстандарт» наносити логотип Угоди CIPM MRA на свої сертифікати калібрування чи вимірювання згідно з наданим раніше правом (авторизацією) від директора BIPM.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Величко О.М. Міжнародні звірення еталонів та їх значення // Укр. метролог. журнал (Velychko O.M. International comparisons of standards and its values // Ukrainian metrology journal). — 1998. — № 4. — С/Р. 48—51.
2. Величко О. Н. Метрологическая прослеживаемость на разных уровнях метрологических работ // Измерит. техника (Velichko O. N. Metrological traceability on the different levels of metrology

- works // Measuring instruments). — 2009. — № 11. — С/Р. 69—73.
3. Величко О.М. Гармонізація національних нормативних документів щодо простежуваності вимірювань // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O.M. Harmonization of national normative documents in relation to the traceability of measurement // Standardization, certification, quality). — 2008. — № 1. — С/Р. 25—32.
 4. Величко О.М. Нормативне забезпечення міжнародних звірень національних еталонів // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O. M. Normative providing of international comparisons of national standards // Standardization, certification, quality). — 2008. — № 4. — С/Р. 32—39.
 5. Величко О.М. Оброблення даних міжнародних звірень національних еталонів: основні вимоги та процедури // Український метрологічний журнал (Velychko O.M. Data treatment of international comparisons of national standards: the basic requirements and procedures // Ukrainian metrology journal). — 2009. — № 3. — С/Р. 57—63.
 6. CIPM MRA-D-05:2013. Measurement comparisons in the context of the CIPM MRA.
 7. Міжнародна база даних ключових звірень Міжнародного бюро з мір та вагів — KCDB (International Database of key comparisons of the International Bureau for Weights and Measures) <http://kcdb.bipm.org/>
 8. Velychko O., Shevkun S. Final Report on COOMET Supplementary Comparison of Capacitance at 10 pF and 100 pF (COOMET.EM-S13). February 2013. Kyiv, Ukraine. SE «Ukrmetrteststandard». — 20 p.
 9. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
 10. COOMET R/GM/19:2008 Guidelines on COOMET supplementary comparison evaluation.
 11. CIPM MRA-D-04:2013. Calibration and Measurement Capabilities in the context of the CIPM MRA.
 12. Величко О.Н. Калибровочные и измерительные возможности национальных метрологических институтов: особенности подготовки, экспертизы и публикации // Измерит. Техника (Velychko O. M. Calibration and measuring capabilities of national metrology institutes: features of preparation, examination and publication // Measuring instruments). — 2010. — № 6. — С/Р. 69—73.
 13. Величко О. Калібрувальні та вимірювальні можливості НМІ: основні процедури експертизи та оприлюднення // Метрологія та прилади (Velychko O. Calibration and measuring capabilities of national metrology institutes: procedures, examination and publication // Metrology and Instruments). — 2010. — № 2. — С/Р. 3—10.
 14. Величко О.М. Метрологічне та нормативне забезпечення вимірювання електромагнітних величин // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O.M. Metrology and normative providing of measuring of electromagnetic values // Standardization, certification, quality). — 2006. — № 6. — С/Р. 34—42.
 15. Величко О. Метрологічне та нормативне забезпечення вимірювань електромагнітних величин у ДП «Укрметртестстандарт» // Метрологія та прилади (Velychko O. M. The metrology and normative providing of measuring of electromagnetic values in SE «Ukrmetrteststandard» // Metrology and Instruments). — 2009. — № 5. — С/Р. 5—12. 

Отримано / received: 17.01.2015.

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

УДК 531.711:531.74

ВИЗНАЧЕННЯ МАСИ НАФТОПРОДУКТІВ І СКРАПЛЕНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ РІВНЕМІРАМИ ANALIQ-M

О. Самойленко, директор науково-виробничого інституту метрологічного забезпечення у галузі геометричних, механічних та вібро-акустичних вимірювань,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ,

Є. Тертишний, технічний директор,

Товариство з обмеженою відповідальністю Науково-виробнича фірма «Ultrasonic Advanced Technologies», м. Київ

Вирішено проблему вимірювання рівня і густини нафтопродуктів і скрапленого пропан-бутану крізь стінки горизонтальних циліндричних резервуарів і залізничних цистерн без їхньої розгерметизації, а також обчислення маси цих рідин і процентного вмісту пропану й бутану. Переваги цього методу — відсутність безпосереднього контакту з вимірюваною рідиною й її парами, можливість вимірювань на цистернах у складі потягу під контактним дротом, швидкість і висока точність вимірювань.

Solved the problem of measuring the level and density of petroleum products and liquefied propane-butane through the walls of horizontal cylindrical tanks and rail cars without depressurization, and

calculate the mass of the liquid and the percentage of propane and butane. The speed of sound is measured from the known diameter of the vessel and is used for level measurement, together with the measured temperature of the field, its density to calculate the formulas derived from laboratory studies. According to the level of the tank strapping table is determined by the volume of fluid and using the density of its mass. Liquefied petroleum gas sound speed and temperature of calculated percentage of propane and butane by formulas, which are also obtained from the laboratory research. Mass of propane and butane are determined based on their content in the steam-air mixture in the tank ullage. Advantages of this method — no direct contact with the measured liquid and its vapor, the possibility of measuring in rail cars in railway under the contact wire, high speed and accuracy.

Ключові слова: нафтопродукти, скраплені вуглеводневі гази, ультразвук, рівнемір, рівень, густина, маса, склад.
Keywords: petroleum products, liquid petroleum gas, ultrasonic, level meter, level, density, mass, composition.

Існує проблема контролю маси нафти, нафтопродуктів і скраплених вуглеводневих газів (СВГ), які перевозяться залізничним транспортом у цистернах, за відсутності вагонних вагів або наявності організаційних труднощів зважування на них. Вимірювання рівня нафтопродуктів у залізничних цистернах через люк під контактним дротом категорично заборонено з міркувань безпеки. Навіть, якщо цистерни містяться не під контактним дротом, може стояти завдання контролю маси нафтопродуктів у них без порушення пломб на люках. Виникають також завдання контролю маси нафтопродуктів, СВГ і небезпечних хімічних рідин, що зберігаються в надземних горизонтальних резервуарах, не оснащених стаціонарними системами для вимірювань рівня й густини. Зважаючи на викладене вище, розроблення приладів і методів оперативного контролю маси рідин, що перевозяться або зберігаються, є важливим і актуальним завданням. Новизна розроблення підтверджується тим, що публікацій за зазначеною тематикою авторами не було знайдено.

Мета статті — описання методики виконання вимірювань за допомогою ультразвукових рівнемірів Analіq-M, що дозволяють підвищити безпеку, оперативність і точність контролю маси нафтопродуктів і СВГ у горизонтальних надземних резервуарах і залізничних цистернах без їхньої розгерметизації, а також визначення процентного вмісту пропану й бутану в СВГ.



О. Самойленко



Є. Тертишний



Рис. 1. Зовнішній вид рівнеміра-аналізатора Analіq-M

Fig. 1. Appearance level meter analyzer Analіq-M

КОРОТКЕ ОПИСАННЯ МЕТОДИЧНИХ ОСНОВ РОБОТИ РІВНЕМІРА-АНАЛІЗАТОРА ANALIQ-M

Перевагою розробленої методики є те, що визначення маси нафти, нафтопродуктів і скрапленого газу є додатковою функцією компактного переносного ультразвукового рівнеміра Analіq-M. Методика будується на строгій фізичній залежності між швидкістю звуку в рідині та її густиною. Остання, у свою чергу, залежить від температури. Отримавши в лабораторних умовах, за різних температур, залежність густини рідини від швидкості звуку в ній для різних рідин у виді математичних формул, їх можна використовувати для обчислення густини за вимічених швидкості звуку в рідині та її температури.

Рівнемір фактично вимірює час проходження ультразвуку до границі розділу двох будь-яких середовищ, що мають різні густини, тому, для визначення швидкості звуку, необхідно мати точну відстань (мірну базу) від антени до певної перешкоди. Це може бути спеціально встановлений екран, або протилежна стінка резервуара. Наприклад, маючи номінальний (проектний) діаметр залізничної цистерни як мірну базу, можна обчислити швидкість ультразвуку за часом його проходження від стінки до стінки. Відносна похибка отримання швидкості звуку складатиметься з відносних похибок мірної бази й вимірювання часу проходження ультразвуку приладом. За швидкістю звуку вимірюється час його проходження до поверхні рідини й обчислюється рівень рідини. За рівнем рідини й градуоваль-

ною таблицею, введеною до рівнеміра, обчислюється її об'єм. За густиною, обчисленою за швидкістю звуку й температурою, і об'ємом обчислюється маса рідини.

Цей метод вимірювань надзвичайно швидкий, зручний, безпечний і дешевий.

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ Й ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РІВНЕМІРА-АНАЛІЗАТОРА ANALIQ-M

Рівнемір-аналізатор Analіq-M (рис. 1) має функціональні можливості, які реалізуються в такій послідовності:

- вимірювання швидкості ультразвуку в рідині;
- вимірювання рівня рідини, що зберігається або перевозиться;
- вимірювання рівня підтоварної води;
- визначення типу рідини та її густини;
- визначення об'єму рідини за рівнем і градуовальною таблицею;
- визначення об'єму підтоварної води (за наявності);
- визначення маси рідини, що зберігається або перевозиться.

У випадку проведення облікових операцій зі СВГ, окрім зазначених етапів, за допомогою Analіq-M виконують такі етапи:

- визначення густини, об'єму й маси парової фракції;
- визначення тиску насиченої пари;

▪ визначення процентного співвідношення пропану й бутану.

Короткі технічні характеристики рівнеміра-аналізатора Analіq-M:

* спосіб кріплення антени й термодатчика — магнітний;

* діапазон товщини стінок, крізь які працює прилад: від 0 до 50 мм;

* робоча температура: від мінус 30 до 50 °C;

* межі допустимої похибки приладу: ± 1 мм у діапазоні від 100 до 5000 мм;

* діапазон вимірювань рівня рідини: від 30 до 50000 мм;

* тривалість одного вимірювання: від 3 до 5 с;

* кількість вимірювань, що запам'ятовуються: 999 (із захистом від переповнення пам'яті);

* автоматичне визначення наявності підтоварної води й несанкціонованих вкладень;

* автоматичне визначення типу нафтопродукту (типу рідини, заводу-виробника).

* відображення інформації російською, англійською або українською мовами.

До приладу вже введено градуювальні таблиці [1] усіх типів залізничних цистерн, виробництва країн СНД, для світлих нафтопродуктів і СВГ, складені за котлом-еталоном. Уведено кілька десятків типів залізничних цистерн європейських виробників і сімейств типів танк-контейнерів для СВГ і аміаку, крім того, понад десять типів найпоширеніших стаціонарних резервуарів. Є можливість уведення до 100 типів нових градуювальних таблиць.

РЕЖИМИ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ РІВНЕМІРОМ-АНАЛІЗАТОРОМ ANALIQ-M

Вимірювання або введення швидкості звуку (ШЗ) до рівнеміра можна виконувати за п'ятьма режимами. Від цього залежать точності визначення об'єму й маси рідини.

1. Пряме вимірювання (калібрування) ШЗ за фактично виміреною мірною базою

Якщо резервуар або цистерна повірені (калібровані), мірна база, як внутрішній діаметр у місці вимірювання ШЗ, визначається з максимальною точністю й повинна наводитися в градуювальній таблиці. Тому з максимально можливою точністю визначається й ШЗ, а, отже, і рівень рідини та її густина. Ураховуючи похибку індивідуальної градуювальної таблиці резервуара або цистерни, яку можна легко ввести до рівнеміра Analіq-M, можна вийти на границі похибки вимірювання маси рідини $\pm (0,3...0,4) \%$.

За вимірювання ШЗ термодатчик і антену встановлюють на бічну стінку резервуара або цистерни, як показано на рис. 2 і 5. Мірною базою слугує отриманий під час повірки її фактичний внутрішній діаметр у цьому перетині цистерни. До рівнеміра потрібно також увести фактичну товщину стінки резервуара.

2. Пряме вимірювання (калібрування) ШЗ за номінальною мірною базою

Мірну базу можна визначити за номінальними (проектними) розмірами резервуара або цистерни, для яких вони відомі й уведені до бази даних рівнеміра. Вимірник задає у приладі Analіq-M лише тип, наприклад, 25, 25а, 53, 53А, 61, 62 тощо для залізничних цистерн. Під час задання типу Analіq-M відкриває дані стосовно номінальних (проектних) геометричних розмірів резервуара або цистерни, товщини стінки, величини мірної бази, а також дані градуювальної таблиці, складеної за номінальними геометричними розмірами. Очікувана похибка визначення маси рідини при цьому, порівняно з першим режимом, підвищується до $\pm (0,4...0,65) \%$. Додаткову похибку для деяких типів цистерн вносить істотна відмінність їхніх номінальних розмірів і градуювальної таблиці від фактичних, що робить актуальним завдання їх повірки.



Рис. 2. Місця установлення термодатчика й антени Analіq-M за вимірювання ШЗ

Fig. 2. Location of installation temperature sensor and antenna Analіq-M just as the speed of sound is measure

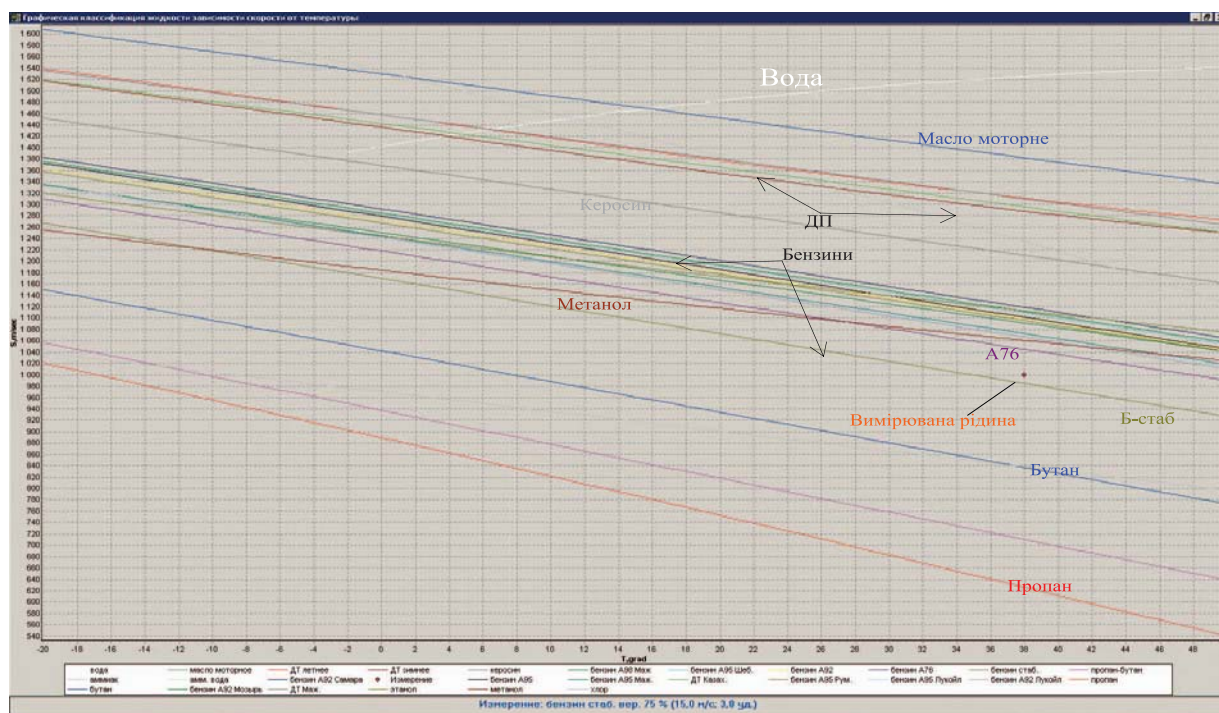


Рис. 3. Графіки залежності швидкості звуку в різних рідинах від температури

Fig. 3. Graphs relation of sound speed in various liquids on the temperature

3. Пряме вимірювання ШЗ за введеною вручну мірною базою

Вимірювання ШЗ за введеною вручну мірною базою застосовують у тих випадках, коли потрібно визначити приблизно лише рівень наповнення, наприклад, за вимірювань у балонах, трубах, каністрах, виносних вимірювальних камерах тощо. При цьому мірну базу вимірюють або беруть за кресленням й уводять до рівнеміра вручну.

4. Уведення ШЗ вручну

Вимірювання рівня й густини рідини за введеною вручну ШЗ можна застосовувати в тих випадках, коли контролюють масу рідини у великій кількості залізничних цистерн або резервуарів з однаковими рідинами. Тоді ШЗ визначають за однією з цистерн, а для інших це значення вводиться вручну. Це знижує точність вимірювання маси, але значно підвищує оперативність вимірювань.

5. Уведення ШЗ за типом рідини

У базі даних приладу вибирають тип рідини, що міститься в резервуарі або цистерні. Вимірюють або вводять вручну температуру рідини. За цими даними прилад обчислює й використовує, для вимірювань рівня й густини, ШЗ у рідині відповідно до аналітичних залежностей, отриманих із досліджень (рис. 3). Цей режим застосовують за вимірювань малих рівнів рідини, а також у тих випадках, коли немає можливості виконати вимірювання ШЗ будь-яким іншим способом.



Рис. 4. Місце встановлення антени за вимірювання рівня

Fig. 4. Place the antenna just as the level is measure

Графіки залежності ШЗ від температури, апроксимовані поліномами 3 і 4 порядків, представлено на рис. 3.

Необхідно відзначити, що точність вимірювання густини, а відповідно й маси нафтопродуктів, залежить від стабільності їхнього складу. Якщо підприємство виготовляє бензин з однорідної сировини, за однією й тією ж технологією, не змінюючи суттєво хімічного складу й процентного вмісту домішок і присадок у бензині, розбіжності між масою, обчисленою рівнеміром, і зазначеною в накладних за результатами зважування становлять (0,15...0,5)%. Якщо процентний вміст домішок і присадок у бензині перевищує (15...20)% і не є стабільним за кількістю і складом, похибка визначення густини, а отже й маси, зростає в кілька разів.

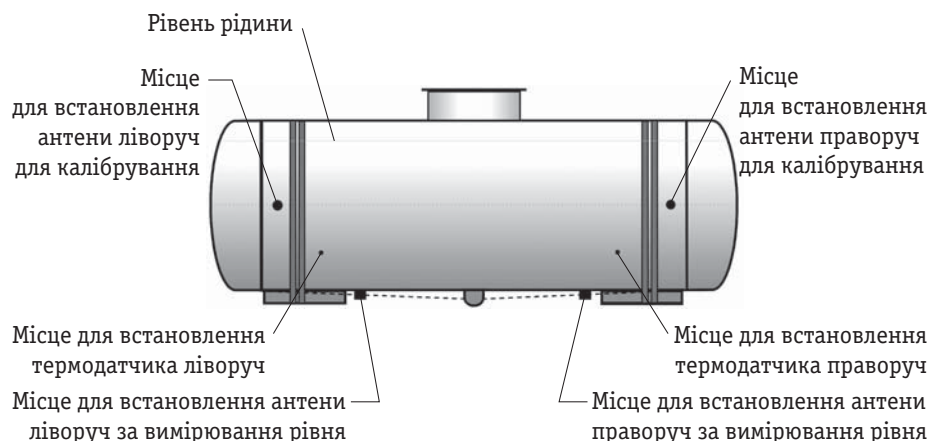


Рис. 5 Вимірювання з двох сторін цистерни зі скрапленим пропан-бутаном

Fig. 5 Measurements on both sides of the tank with liquefied propane-butane

Недоліком методу є те, що для реалізації першого й другого режимів, коли ШЗ у рідині вимірюють безпосередньо й точно за відомою мірною базою, необхідно, щоб резервуари були заповнені більше ніж наполовину. Для цистерн, як правило, цієї проблеми не виникає, оскільки їх завжди перевозять заповненими більше ніж на 80 % за об'ємом.

РЕЖИМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ В ЗАЛІЗНИЧНІЙ ЦИСТЕРНІ

За вимірювання рівня антену встановлюють під днище резервуара або цистерни (рис. 4). Термодатчик залишається на попередньому місці (рис. 2).

Для усунення похибки вимірювань, пов'язаної з ухилом залізничного шляху, вимірювання проводяться з двох сторін цистерни (рис. 5). Результати вимірювань усереднюють.

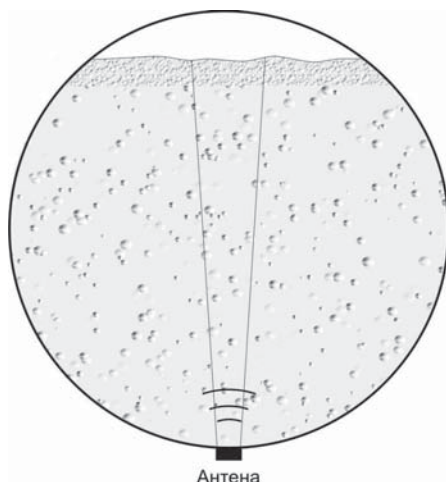


Рис. 6. Кипіння пропан-бутанової суміші за зниження тиску

Fig. 6. Boiling propane-butane mixture just as pressure decrease

ТРУДНОЩІ ВИМІРЮВАННЯ МАСИ СВГ

Вимірювання маси і складу скрапленого пропан-бутану є найбільш складним внаслідок ряду причин:

1. Пропан-бутанова суміш — це рідина, піддана кипінню (рис. 6) від зниження тиску за зливання рідини або істотного підвищення температури. Під час кипіння рідина насичується великою кількістю пухирців, що представляє додаткові ревербераційні перешкоди в процесах вимірювань, оскільки від кожного з них, що потрапив до зони локації антени, може бути додатковий відбитий луна-сигнал.

2. Скупчення великої кількості пухирців газу в приповерхньому шарі створює складності під час вимірювань рівня киплячої рідини. Типову осцилограму киплячого пропан-бутану наведено на рис. 7.

3. Велика нерівномірність за густиною в процесі тривалого зберігання, при цьому більш важкий бутан накопичується знизу резервуара, а більш легкий пропан займає верхні шари.

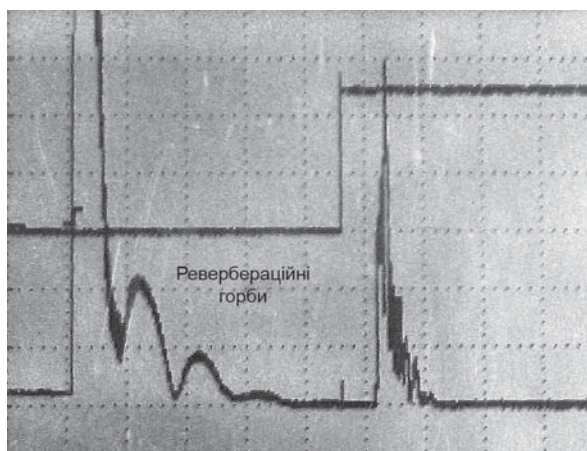


Рис. 7. Швидке зливання пропан-бутану із резервуара (осцилограма луна-сигналів)

Fig. 7. Quick draining of propane-butane from the tank (oscilloscope trace echoes)

Вимірювання процентного співвідношення пропан-бутан у резервуарах проводять з найменшою похибкою, коли резервуар заповнено стандартно на (80...85) % об'єму або близько до цього. Під час зливання зменшується об'єм рідини в резервуарі й, внаслідок цього, зменшується процентне співвідношення пропану в рідкій фракції. Відбувається це через появу додаткового вільного об'єму для переважного випаровування більш легкого пропану із рідини. За від'ємних температур цей процес відбувається більш явно, внаслідок того, що бутан взагалі перестає випаровуватися.

РЕЖИМ І ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕНТНОГО ВМІСТУ ГАЗІВ У СВГ

Визначення процентного вмісту пропану й бутану в суміші виконують у такий спосіб:

За визначення процентного вмісту пропану й бутану, густини й маси пропан-бутанової суміші в резервуарі точка, відповідна до пари чисел Ш (швидкість) і Т (температура), міститься між двома сусідніми графіками для ШЗ у пропані й бутані (рожева лінія між лініями для пропану й бутану на рис. 3). За Ш і Т програмне забезпечення приладу обчислює координати цієї точки відносно координат точок на кривих для чистих пропану й бутану, тим самим визначається процентний вміст основних компонентів: пропану й бутану, — в суміші.

Визначення процентного вмісту пропану й бутану в суміші дає можливість рівнеміру-аналізатору Analіq-M обчислити густину як рідкої, так і парової фракції, що важливо для визначення повної маси пропан-бутанової суміші.

Експериментальним шляхом встановлено, що, коли кількість домішок у суміші пропан-бутан

не перевищує (5...7) %, похибка визначення її густини міститься у межах $\pm(0,2...0,3)$ %, а похибка визначення процентного складу пропану й бутану в межах $\pm(1...2)$ %. Це досягається за рахунок того, що домішки більш легкі, ніж пропан, відносяться за результатами вимірювань приладом, до пропану, а більш важкі, ніж бутан, — до бутану. Перевірку досягнутої точності здійснювали після відбору проб із цистерн і резервуарів для СВГ і вимірювання складу суміші газів на хроматографі. Похибки визначення густини й процентного вмісту суттєво (у кілька разів) зростають, якщо в суміші міститься велика кількість газів, далеких за властивостями від пропану й бутану, наприклад, пропилену.

ВИСНОВКИ


1. Застосування методу ультразвукової луна-локації за вимірювання маси рідин, у тому числі СВГ, що містяться у закритих резервуарах і залізничних цистернах дозволяє вирішити проблему незалежного визначення маси без їхньої розгерметизації й значною мірою прискорити процес вимірювань.

2. Застосування рівнеміра-аналізатора Analіq-M для визначення процентного складу пропану й бутану в суміші дозволить з достатньою точністю контролювати якість суміші без застосування дорогих хроматографів і тривалої процедури відбору проб.

3. Завдання визначення складу суміші із трьох газів, наприклад, пропану, бутану й пропилену, методом ультразвукової луна-локації поки що не вирішується, а віднесення одного з газів до домішку (пропилену) суттєво знижує точність визначення процентного вмісту пропану й бутану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Инструкция по определению веса наливных грузов в цистернах. Таблицы калибровки железнодорожных цистерн (включая типы 105 и 106). Издательство «Транспорт»

(Guidance on determining the weight of liquid cargo in tanks. Calibration table rail tank cars (including types 105 and 106). Publisher «Transport»), 2008. 

Отримано / received: 13.01.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.М. Величком та к.х.н., с.н.с. М.С. Рожновим (Україна).
Prof. O. M. Veluchko, D. Sc. (Techn.), and M.S. Rozhnov, C. Sc. (Chem.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 681.121.84

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИТРАТОМІРА, ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ТОЧНІСТЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Л. Лесовой, доктор технічних наук, доцент кафедри автоматизації теплових і хімічних процесів,
В. Фединець, доктор технічних наук, доцент кафедри,
В. Кузик, аспірант кафедри,
Б. Чабан, аспірант кафедри,
Інститут енергетики та систем керування Національного університету «Львівська політехніка»

Представлено розроблені авторами нові аналітичні залежності для розрахунку параметрів витратоміра змінного перепаду тиску, оптимального за точністю вимірювання витрати природного газу, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання відповідно до чинних стандартів. Розроблено аналітичні залежності дозволяють розрахувати значення діаметра отвору діафрагми з точністю, яка задовольняє вимоги, зазначені у національних стандартах щодо обліку природного газу. Наведено алгоритм вибору верхньої межі вимірювання дифманометра для такого витратоміра.

The article is devoted to the problem of determining parameters the flow meter of optimal measurement accuracy flow and the quantity of the natural gas. The analysis showed that the uncertainty of the measurement result of the natural gas flow has

minimum depending from the diameter ratio of the orifice plate. The authors received values of the diameter ratio of orifice plate, use which gives of minimal uncertainty of the measurement result of the natural gas flow. These values were obtained when applying the new dependencies to determine the coefficients of the natural gas flow equation, which were introduced in DSTU GOST 8.586.2:2009. According to these values obtained new equations to calculate of the diameter ratio of orifice plate. A comparative analysis between values the diameter ratio of the orifice plate calculated by iteration method and for new equations showed that the maximum uncertainty between them does not exceed 0,05 %. These equations can be applied to calculate parameters flow meter of optimal the accuracy of measurement the flow and quantity of the natural gas and for the application of ISO5167:2003 in measurement this flow. The authors developed an algorithm for selecting the upper limit of the measurement of differential pressure gauges for that flow.

Ключові слова: витратомір змінного перепаду тиску, діафрагма, відносний діаметр, невизначеність, число Рейнольдса, перепад тиску.
Keywords: flow meter of differential pressure, orifice plate, diameter ratio, uncertainty, number of Reynolds, differential pressure.

Для вимірювання витрати та кількості природного газу широкого застосування набув метод змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями, до яких належить і діафрагма з кутовим способом відбирання тиску. Хоча цей метод використовується вже давно, але він постійно поновлюється шляхом уведення нових аналітичних виразів для визначення коефіцієнтів рівняння витрати природного газу, що мають меншу невизначеність, яка приписана їх функціональним залежностям. За вимірювання витрати природного газу зазначеним методом необхідно застосовувати витратоміри змінного перепаду тиску, які забезпечують найменшу невизначеність результату вимірювання витрати та кількості природного газу. Для цих витратомірів застосовують діафрагми, оптимальні

за точністю вимірювання витрати природного газу. Однією з найважливіших задач у процесі розрахунку параметрів такого витратоміра, оптимального за точністю вимірювання витрати природного газу, є розрахунок відносного діаметра отвору діафрагми і перепаду тиску на ній з наступним вибором верхньої межі вимірювання диференціального манометра, для яких відносна розширена невизначеність результату вимірювання витрати природного газу приймає мінімальне значення. На базі аналітичних залежностей коефіцієнтів рівняння витрати та відносної похибки результату вимірювання витрати природного газу, наведених у РД 50-213-80 [1], отримані рівняння [2] для розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати газу. Із набуттям чинності Національних

стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,5:2009 [3–5] всі рівняння для визначення коефіцієнтів і параметрів рівняння витрати змінені. У зв'язку з цим, отримання нових аналітичних залежностей для розрахунку параметрів витратоміра, оптимального за точністю вимірювання витрати та кількості природного газу, є актуальною задачею.

В Україні оплата здійснюється за об'єм природного газу, приведений до стандартних умов, до розрахунку якого входить визначення об'ємної витрати q_c природного газу, приведеної до стандартних умов. Об'ємну витрату природного газу відповідно до нормативного стандарту РД 50-213-80 [1] і Національного стандарту України ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2:2009 [3, 4] за вимірювання густини ρ природного газу поточним густиноміром визначають за рівнянням:

$$q_c = (\pi/4)\beta^2 D^2 C E K_{\text{ш}} K_{\text{н}} \varepsilon \sqrt{2\Delta p \rho} / \rho_c \quad (1)$$

де β — відносний діаметр отвору діафрагми; D — внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу за робочої температури природного газу; C — коефіцієнт витікання діафрагми; E — коефіцієнт швидкості входження; $K_{\text{ш}}$ — поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу; $K_{\text{н}}$ — поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канти діафрагми; ε — коефіцієнт розширення газоподібного середовища; Δp — перепад тиску на діафрагмі.

У процесі визначення густини ρ природного газу за робочих умов (за абсолютного тиску p і термодинамічної температури T природного газу) та рівнянням стану, наведеним у ГОСТ 30319.1–1996 [6]:

$$\rho = \rho_c p T_c / p_c T K, \quad (2)$$

рівняння для визначення витрати q_c природного газу запишеться як [1, 3, 4]

$$q_c = (\pi/4)\beta^2 D^2 C E K_{\text{ш}} K_{\text{н}} \varepsilon \sqrt{2\Delta p p T / \rho_c p_c T K}, \quad (3)$$

де ρ_c — густина природного газу за стандартних умов (за абсолютного тиску $p_c = 101325$ Па і термодинамічної температури $T_c = 293,15$ К природного газу); K — коефіцієнт стисливості природного газу за робочих умов, значення якого розраховують за одним із рівнянь, наведених у ГОСТ 30319.2–1996 [7].

Відносний діаметр отвору діафрагми відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [3] визначається за рівнянням:

$$\beta = d / D, \quad (4)$$

де d — діаметр отвору діафрагми за робочої температури природного газу.

Проаналізувавши рівняння (1) та (3), автори [2, 8] отримали вхідні величини, які застосовуються під час визначення відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірюван-

ня витрати природного газу, і не залежать від нього. Ці вхідні величини об'єднані у безрозмірний комплекс B , який визначається за рівняннями [2, 8] у процесах:

- вимірювання густини природного газу поточним густиноміром:

$$B = (8 / p \rho) (q_c \rho_c / \pi D^2)^2; \quad (5)$$

- визначення густини природного газу за рівнянням стану

$$B = (8 \rho_c p_c T K / T_c) (q_c / p \pi D^2)^2. \quad (6)$$

Визначивши характер поведінки складових відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати природного газу як функції відносного діаметра отвору діафрагми, отримано [2, 8], що деякі складові невизначеності мають характер, такий, що спадає, інші — такий, що зростає. Тобто, відносна розширена невизначеність результату вимірювання витрати природного газу має мінімум. Зменшуючи невиключену систематичну відносну розширену невизначеність, ми тим самим зменшуємо і відносну розширену невизначеність результату вимірювання витрати природного газу. Авторами [2, 8] отримані аналітичні рівняння для визначення відносної площі m діафрагми і відповідно її відносний діаметр β отвору як

$$m = \beta^2 = f(B, Re, D), \quad (7)$$

де Re — число Рейнольдса.

Число Рейнольдса характеризує гідродинамічну подібність потоків і відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [3] визначається за рівнянням:

$$Re = 4 q_c \rho_c / \pi D \mu, \quad (8)$$

де μ — динамічна в'язкість природного газу за робочих умов, значення якої розраховують за рівнянням, наведеним у ГОСТ 30319.1–1996 [6].

Обчисливши за рівнянням (7) значення відносної площі діафрагми, відповідно до [8, 9] вибирають верхню межу вимірювання диференціального манометра.

Рівняння (7), (8) з урахуванням рівняння (5) або (6) дозволяють розраховувати відносну площу діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати та кількості природного газу, а за рівнянням, наведеним у [2, 8], — перепад тиску на діафрагмі. Але ці рівняння отримані на базі коефіцієнтів, що входять до рівняння (1) або (3) для визначення об'ємної витрати природного газу, приведеної до стандартних умов, які застосовані у РД 50-213-80 [1].

Із набуттям чинності Національного стандарту України ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4] всі коефіцієнти, що входять до рівняння (1) або (3) для визначення об'ємної витрати природного газу, приведеної

до стандартних умов, змінені. Тому рівняння (7) і рівняння, наведені у [2, 8], отримані для розрахунку параметрів витратоміра, оптимального за точністю вимірювання витрати та кількості природного газу, втрачають сенс щодо застосування.

Мета дослідження — записати рівняння для розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми і на їх основі отримати нові рівняння для розрахунку значення відносного діаметра отвору діафрагми, а отже і діаметра отвору діафрагми, а також удосконалити алгоритм вибору верхньої межі вимірювання диференційного манометра для витратоміра, оптимального за точністю вимірювання витрати природного газу.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗНАХОДЖЕННЯ МІНІМУМУ ВІДНОСНОЇ РОЗШИРЕНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Застосовуючи вимоги, що ставляться до розрахунку невизначеності вимірюваної величини непрямым методом, наведені в ISO 5168:2005 [9], ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [5], і рівняння (3), запишемо відносну розширену невизначеність результату вимірювання об'ємної витрати q_c природного газу:

$$U'_{q_c} = \left[U'^2_C + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 U'^2_d + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 U'^2_D + U'^2_{K_m} + U'^2_{K_n} + U'^2_{\epsilon} + \left(U'^2_{\Delta p} + U'^2_p + U'^2_T + U'^2_{\rho_c} + U'^2_K \right)^{0,5} \right], \quad (9)$$

де $U'_C, U'_d, U'_D, U'_{K_m}, U'_{K_n}, U'_{\epsilon}, U'_{\Delta p}, U'_p, U'_T, U'_{\rho_c}$ і U'_K — відповідно відносні розширені невизначеності коефіцієнта витікання; результату вимірювання діаметра отвору діафрагми і внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу за робочої температури природного газу; поправкових коефіцієнтів, які враховують шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, притуплення вхідного канта діафрагми; коефіцієнта розширення природного газу; результатів вимірювання перепаду тиску на діафрагмі, абсолютного тиску і температури природного газу, густини природного газу за стандартних умов та коефіцієнта стискуваності природного газу.

Приклад розрахунку за рівнянням (9) значень відносної розширеної невизначеності U'_{q_c} результату вимірювання об'ємної витрати природного газу, приведеної до стандартних умов, як функції відносного діаметра β отвору діафрагми і перепаду тиску Δp на ній, наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, відносна розширена невизначеність U'_{q_c} має мінімум залежно від відносно-

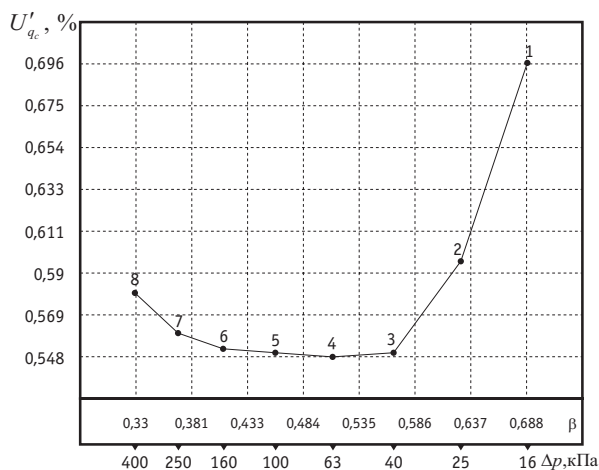


Рис. 1. Відносна розширена невизначеність результату вимірювання витрати природного газу

Fig. 1. The relative expanded uncertainty of measurement result of the natural gas flow rate

го діаметра отвору діафрагми, а також є однозначна залежність між перепадом тиску Δp на діафрагмі й відносним діаметром β отвору діафрагми [10]. Тобто, кожному значенню перепаду тиску на діафрагмі за одних і тих же вхідних даних відповідатиме своє значення відносного діаметра отвору діафрагми і своє значення відносної розширеної невизначеності U'_{q_c} .

ВИМОГИ, ЩО СТАВЛЯТЬСЯ ЗА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДІАФРАГМИ, ОПТИМАЛЬНОЇ ЗА ТОЧНІСТЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

За розрахунку параметрів діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати природного газу, необхідно враховувати:

- однозначну залежність між перепадом тиску на діафрагмі й її відносним діаметром отвору [10];
- допустимі межі застосування діафрагми з кутовим способом відбору тиску, наведені в ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4] та ISO 5167.2:2003 [11] та зведені у табл. 1.

Якщо відносна шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу задовольняє вимоги [4, 9]:

$$\left(10^4 Ra / D \right)_{\min} \leq 10^4 Ra / D \leq \left(10^4 Ra / D \right)_{\max}, \quad (10)$$

поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, приймає таке значення, що дорівнює одиниці, а відносна розширена невизначеність U'_{K_m} — значення, що дорівнює нулю.

Таблиця 1. Допустимі межі застосування діафрагм з кутовим способом відбору тиску

Table 1. Limits of use for orifice plates with corner tappings

Величина	Позначення	ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4], ISO 5167.2:2003 [11]
Мінімальне значення діаметра отвору діафрагми за робочої температури природного газу	d_{\min}	0,0125
Мінімальне значення внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу за робочої температури природного газу	D_{\min}	0,05
Максимальне значення внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу за робочої температури природного газу	D_{\max}	1
Мінімальне значення відносного діаметра отвору діафрагми	β_{\min}	0,1
Максимальне значення відносного діаметра отвору діафрагми	β_{\max}	0,75
Мінімальне значення числа Рейнольдса	Re_{\min}	5000 для $0,1 \leq \beta \leq 0,56$ 16000 β^2 для $0,56 < \beta \leq 0,75$
Максимальне значення числа Рейнольдса	Re_{\max}	10^8
Максимальне відношення перепаду тиску на діафрагмі до абсолютного тиску природного газу	$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{\max}$	0,25
Мінімальне значення відносної шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу	$\left(10^4 \frac{Ra}{D}\right)_{\min}$	Формула (12)
Максимальне значення відносної шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу	$\left(10^4 \frac{Ra}{D}\right)_{\max}$	Формула (13)
Максимальне значення відношення	$\left(\frac{r_k}{d}\right)_{\max}$	0,0004

Ra — середній арифметичний відхил профілю шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу;
 r_k — радіус вхідного канта діафрагми.

Якщо відношення r_k / d задовольняє вимогу, наведеному в ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4] та ISO 5167.2:2003 [11]:

$$r_k / d \leq (r_k / d)_{\max}, \quad (11)$$

вхідний кант діафрагми вважається гострим, а поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми, приймає таке значення, що дорівнює одиниці. При цьому відносна розширена невизначеність U'_{K_n} приймає таке значення, що дорівнює нулю.

Reader-Harris [12] встановив, що мінімальне і максимальне значення відносної шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу залежать від відносного діаметра отвору діафрагми і числа Рейнольдса, а отримані значення у виді таблиць уведено до ISO 5167.2:2003 [11].

На базі експериментальних даних [12] авторами [13] установлені рівняння для розрахунків мінімального і максимального значень відносної шор-

сткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, введені до ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4]. Мінімальне значення розраховують за рівнянням [12]:

$$\left(10^4 Ra / D\right)_{\min} = \begin{cases} 7,1592 - 12,387\beta - (2,0118 - 3,469\beta) \lg(Re) + \\ + (0,1382 - 0,23762\beta) [\lg(Re)]^2 & \text{для } \beta < 0,65 \\ -0,892353 + 0,24308 \lg(Re) - 0,0162562 [\lg(Re)]^2 & \text{для } \beta \geq 0,65 \\ 0 & \text{для } Re < 3 \cdot 10^6 \end{cases} \quad (12)$$

Якщо в результаті розрахунку, виконаного за рівнянням (12), отримане значення $\left(10^4 Ra / D\right)_{\min} \leq 0$, приймають $\left(10^4 Ra / D\right)_{\min} = 0$, в іншому випадку значення $\left(10^4 Ra / D\right)_{\min}$ округлюють до трьох значимих цифр після коми.

Максимально допустиме значення $(10^4 Ra / D)_{\max}$ розраховують за рівнянням [13]:

$$(10^4 Ra / D)_{\max} = \begin{cases} \frac{0,718866}{\beta^{3,887}} + 0,364 & \text{для } Re \leq 10^4 \text{ та } \beta < 0,65 \\ 4,2 & \text{для } Re \leq 10^4 \text{ та } \beta \geq 0,65; \\ A_0 \beta^{A_1} + A_2 & \text{для } Re > 10^4 \text{ та } \beta < 0,65 \\ A_0 0,65^{A_1} + A_2 & \text{для } Re > 10^4 \text{ та } \beta \geq 0,65 \end{cases} \quad (13)$$

$$A_i = \sum_{k=0}^3 B_{ik} [\lg(Re)]^k, \quad i = \{0, 1, 2\}, \quad (14)$$

де B_k — постійні коефіцієнти, значення яких наведено у табл. 2.

Якщо в результаті розрахунку, виконаного за рівнянням (13), отримано значення $(10^4 Ra / D)_{\max} \geq 15$, приймають $(10^4 Ra / D)_{\max} = 15$. Значення $(10^4 Ra / D)_{\max}$ округлюють до двох значимих цифр.

Застосувавши рівняння (1) і (3), визначимо безрозмірний комплекс B_0 , який залежить від вхідних величин і не залежить від відносного діаметра отвору діафрагми та перепаду тиску на ній. Безрозмірний комплекс B_0 розраховуватиметься за рівняннями:

► за вимірювання густини природного газу потоковим густиноміром:

$$B_0 = 4q_c \rho_c / \pi D^2 \sqrt{2p_r}; \quad (15)$$

► за визначення густини природного газу за рівнянням стану (2)

$$B_0 = (4q_c / p \pi D^2) \sqrt{\rho_c p_c T_K / 2T_c}. \quad (16)$$

Урахувавши рівняння (1) і (15) або (3) і (16), а також умови (10) і (11), запишемо рівняння для визначення безрозмірного комплексу B_0 як функції відносного діаметра отвору діафрагми і перепаду тиску на ній:

$$B_0 = \beta^2 C E \epsilon \sqrt{\Delta p / p}. \quad (17)$$

Застосувавши рівняння (17), визначимо межі безрозмірного комплексу $B_{0\min}$ і $B_{0\max}$, які задовольнятимуть умовам застосування методу змінного перепаду тиску із діафрагмою, наведеним у табл. 1. Проведеними дослідженнями встановлено, що мінімальне значення безрозмірного комплексу $B_{0\min}$ становить 0,001, а максимальне — $B_{0\max}$ становить 0,098.

Оскільки відносна розширена невизначеність U'_{q_c} результату вимірювання витрати природного газу залежить від значення самої витрати q_c , за критерій оптимальності під час проектування витратоміра змінного перепаду тиску потрібно прийняти значення цієї невизначеності за певного конкретного значення витрати. Зазвичай, у процесі оцінювання точності вузлів обліку природного газу, застосовують значення відносної розширеної невизначеності за максимального значення об'ємної витрати природного газу, приведеної до стандартних умов.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів B_k рівняння (14)

Table 2. The coefficients B_k of equation (14)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнтів B_k		
	A_0	A_1	A_2
$10^4 < Re \leq 10^5$			
B_0	8,87	6,7307	-10,244
B_1	-3,7114	-5,5844	5,7094
B_2	0,41841	0,732485	-0,76477
B_3	0	0	0
$10^5 < Re \leq 3 \times 10^6$			
B_0	27,23	-25,928	1,7622
B_1	-11,458	12,426	-3,8765
B_2	1,6117	-2,09397	1,05567
B_3	-0,07567	0,106143	-0,076764
$3 \times 10^6 < Re \leq 10^8$			
B_0	16,5416	322,594	-92,029
B_1	-6,60709	-132,2	37,935
B_2	0,88147	17,795	-5,1885
B_3	-0,039226	-0,799765	0,23583

Отже, таке значення невизначеності, а саме, відносну розширену невизначеність результату вимірювання об'ємної витрати природного газу, приведеної до стандартних умов, за максимального значення витрати $U'_{q_c}(q_{\max})$ і приймемо за критерій оптимальності під час проектування витратоміра змінного перепаду тиску:

$$F = U'_{q_c}(q_{\max}). \quad (18)$$

Для цього критерію оптимальності постановка задачі оптимізації витратоміра змінного перепаду тиску запишеться так: досягнення мінімуму відносної розширеної невизначеності U'_{q_c} результату вимірювання витрати середовища за максимальної об'ємної витрати q_{\max} природного газу, приведеної до стандартних умов,

$$\min[U'_{q_c}(q_{\max}, \beta)]. \quad (19)$$

Застосувавши (17), запишемо рівняння для визначення відносного діаметра отвору діафрагми:

$$\beta = \sqrt{B_0 / C \cdot E \cdot \epsilon \cdot \sqrt{\Delta p / p}}. \quad (20)$$

СИСТЕМА РІВНЯНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВИХ ДАНИХ, НЕОБХІДНИХ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВІДНОСНОГО ДІАМЕТРА ОТВОРУ ДІАФРАГМИ, ОПТИМАЛЬНОЇ ЗА ТОЧНІСТЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Урахувавши:

* умови застосування методу змінного перепаду тиску, наведені у табл. 1, та умови (10) і (11);

* рівняння для розрахунку відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання діафрагми [4, 11, 13]:

$$U'_C = U'_{C_0} = \begin{cases} 0,7 - \beta & \text{для } 0,1 \leq \beta < 0,2 \\ 0,5 & \text{для } 0,2 \leq \beta \leq 0,6; \\ 1,667\beta - 0,5 & \text{для } 0,2 \leq \beta \leq 0,6 \end{cases} \quad (21)$$

* рівняння для розрахунку відносної розширеної невизначеності коефіцієнта розширення природного газу [4, 5, 13]:

$$U'_\varepsilon = \left[(3,5\Delta p / p_k)^2 + ((\varepsilon - 1) / \varepsilon)^2 (U'^2_{\Delta p} + U'^2_p + U'^2_k) \right]^{0,5}, \quad (22)$$

де k — показник адіабати природного газу, значення якого розраховують за рівнянням, наведеним у ГОСТ 30319.1–1996 [6]; U'_k — відносна розширена невизначеність показника адіабати природного газу;

* рівняння для визначення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання діаметра отвору діафрагми [5, 13]:

$$U'_d = 0,04; \quad (23)$$

* рівняння для визначення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу [5, 13]:

$$U'_D = 0,2; \quad (24)$$

* рівняння (9) для визначення відносної розширеної невизначеності U'_{q_c} ;

* рівняння (20) для визначення відносного діаметра отвору діафрагми;

* рівняння для визначення коефіцієнта витікання C діафрагми, коефіцієнта швидкості входження E та коефіцієнта розширення природного газу ε , наведені у [4, 13],

отримаємо систему рівнянь для розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати природного газу.

РІВНЯННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОГО ДІАМЕТРА ОТВОРУ ДІАФРАГМИ, ОПТИМАЛЬНОЇ ЗА ТОЧНІСТЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Для отримання відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати, необхідно розв'язати рівняння типу

$$\partial U'_{q_c} / \partial \beta = 0. \quad (25)$$

Розв'язавши рівняння (25) ітераційним шляхом, автори отримали значення відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати природного газу, як функції безрозмірного комплексу B_0 та числа Рейнольдса Re , представлений графіком на рис. 2.

Аби отримати аналітичну залежність між відносним діаметром отвору діафрагми, оптимальної

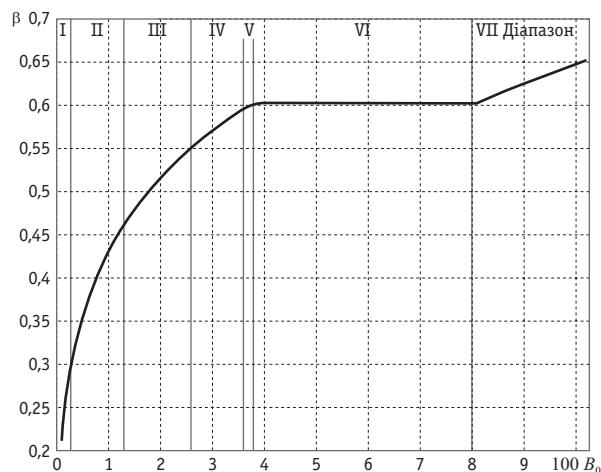


Рис. 2. Залежність відносного діаметра від безрозмірного комплексу B_0

Fig. 2. Curve of the diameter ratio from the dimensionless complex B_0

за точністю вимірювання витрати, як функції безрозмірного комплексу B_0 і числа Рейнольдса Re , для якої відносна розширена невизначеність, приписана цій функціональній залежності, буде якомога найменшою, авторами запропоновано розділити вхідні значення на сім діапазонів відносно величини $100B_0$.

Проаналізувавши отримані дані, встановлено, що рівняння для визначення відносного діаметра β як функції безрозмірного комплексу B_0 у діапазонах I–IV, тобто для $0,001 \leq B_0 \leq 0,036$, запишеться як

$$\beta = X / (a + bX)^{0,833333}, \quad (26)$$

де

$$X = (100B_0)^c; \quad (27)$$

a, b — коефіцієнти, які залежать від числа Рейнольдса; c — постійний коефіцієнт, значення якого наведено в табл. 3.

Коефіцієнти a і b , які залежать від числа Рейнольдса, визначатимуться за рівняннями:

$$a = Re_0 / (a_0 + b_0 Re_0)^{c_0}; \quad (28)$$

$$b = Re_1 / (a_1 + b_1 Re_1)^{c_1}, \quad (29)$$

де

$$Re_0 = [\lg(Re)]^{d_0}; \quad (30)$$

$$Re_1 = [\lg(Re)]^{d_1}; \quad (31)$$

$a_0, b_0, c_0, d_0, a_1, b_1, c_1, d_1$ — постійні коефіцієнти, значення яких, залежно від діапазону застосування рівняння, наведено в табл. 3–5.

Якщо значення безрозмірного комплексу B_0 міститься у діапазоні V, для якого $0,036 \leq B_0 \leq B_{k1}$, де значення B_{k1} розраховують за формулою:

$$B_{k1} = 1 / [-0,165 + 1,01 \cdot \lg(Re)]^5 + 0,03651, \quad (32)$$

то значення відносного діаметра отвору діафрагми в цьому діапазоні розраховуватиметься за

Таблиця 3. Коефіцієнти рівнянь (27)–(31) для діапазонів I–IV

Table 3. The coefficients of (27)–(31) for ranges I–IV

Re	$10^4 \leq \text{Re} < 10^6$	$10^6 \leq \text{Re} \leq 10^8$	$10^4 \leq \text{Re} < 10^6$	$10^6 \leq \text{Re} \leq 10^8$
B_0	$0,001 \leq B_0 \leq 0,003$		$0,003 < B_0 < 0,013$	
a_0	-0,059077	0,000568868	-0,053705	0,013737
b_0	0,519883	0,490791	0,606774	0,569544
c_0	0,95	1	0,96	1,007
d_0	0,48	0,48	0,5	0,51
a_1	-4,043301	-0,404483	-1,466793	-0,236458
b_1	4,35578	1,76342	1,948912	1,14019
c_1	0,672	0,933	0,737	0,941
d_1	0,58	0,58	0,58	0,58
c	0,3665		0,4	
B_0	$0,013 \leq B_0 < 0,026$		$0,026 \leq B_0 \leq 0,036$	
a_0	0,105598	0,061427	0,286488	0,108196
b_0	0,542983	0,568467	0,450167	0,556623
c_0	1,069	1,033	1,25	1,063
d_0	0,52	0,52	0,5	0,5
a_1	-1,69076	-0,306441	-1,88881	-0,333055
b_1	1,98408	1,11245	2,02556	1,08419
c_1	0,705	0,923	0,686	0,918
d_1	0,58	0,58	0,6	0,6
c	0,412		0,423	

рівнянням:

$$\beta = a + b \cdot X. \quad (33)$$

Значення параметра X і коефіцієнтів a , b розраховують відповідно за формулами (27) — (29), в яких значення коефіцієнтів c , a_0 , b_0 , c_0 , d_0 , a_1 , b_1 , c_1 , d_1 наведені в табл. 4.

Якщо значення безрозмірного комплексу B_0 міститься у діапазоні VI, для якого $B_{k1} \leq B_0 \leq B_{k2}$, де значення B_{k1} розраховують за формулою (32), а значення B_{k2} — за формулою:

$$B_{k2} = 1 / [-0,276 + 0,899 \cdot \lg(\text{Re})]^5 + 0,07753, \quad (34)$$

то значення відносного діаметра β отвору діафрагми в цьому інтервалі приймається таким, що дорівнює 0,6.

Якщо значення безрозмірного комплексу B_0 міститься у діапазоні VII, для якого $B_{k2} \leq B_0 \leq 0,098$, а значення B_{k2} розраховують за формулою (34), то значення відносного діаметра отвору діафрагми в цьому інтервалі визначатиметься за формулою (33). Значення параметра X і коефіцієнтів a , b розраховують відповідно за формулами (27)–(29), в яких значення коефіцієнтів c , a_0 , b_0 , c_0 , d_0 , a_1 , b_1 , c_1 , d_1 наведені в табл. 5.

Значення максимальної відносної розширеної невизначеності, приписаної функціональній залежності (26) або (33), не перевищує 0,05 %.

За значенням відносного діаметра β визначають діаметр отвору діафрагми за робочої температури

Таблиця 4. Коефіцієнти рівнянь (27) — (31) для діапазону V

Table 4. The coefficients of (27) — (31) for range V

Re	$10^4 \leq \text{Re} < 10^6$	$10^6 \leq \text{Re} \leq 10^8$
a_0	-15.0867	-18.7652
b_0	-1.26599	-1.266301
c_0	1	1
d_0	4.29	4.43
a_1	0.781267	0.258042
b_1	0.257316	0.664588
c_1	2.05	1.11
d_1	0.58	0.58
c	0.1	

Таблиця 5. Коефіцієнти рівнянь (27)–(31) для діапазону VII

Table 5. The coefficients of (27)–(31) for range VII

Re	$10^4 \leq \text{Re} < 10^6$	$10^6 \leq \text{Re} \leq 10^8$
a_0	-3942.92	-35.9934
b_0	-7.76535	-7.52026
c_0	1	1
d_0	5.613	2.501
a_1	1.15604	0.929497
b_1	0.0467228	1.59613
c_1	7.8	1.15
d_1	0.72	0.58
c	0.287	

за рівнянням:

$$d = \beta \cdot D. \quad (35)$$

Після цього розрахунку перевіряють виконання додаткових умов застосування методу змінного перепаду тиску, наведених у табл. 1. Якщо ці додаткові умови виконуються, розраховують значення діаметра отвору d_{20} діафрагми за температури газу 20 °C за рівнянням [3, 13]:

$$d_{20} = d / [1 + \alpha_{\text{гп}}(t - 20)], \quad (36)$$

де $\alpha_{\text{гп}}$ — температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу виготовлення діафрагми; t — температура природного газу.

АЛГОРИТМ ВИБОРУ ВЕРХНЬОЇ МЕЖИ ВИМІРЮВАННЯ ДИФМАНОМЕТРА

Під час визначення верхньої межі вимірювання дифманометра $\Delta p_{\text{в}}$ застосовують рівняння [10] для визначення перепаду тиску на діафрагмі:

$$\Delta p = p / a_{\text{е}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{1}{3} \arccos (1 - 9 a_{\text{е}} B_0^2 / C^2 E^2 \beta^4) \right] \right\}, \quad (37)$$

де

$$a_{\text{е}} = 1,5(0,351 + 0,256\beta^2 + 0,93\beta^8) / \kappa.$$

Верхню межу вимірювання дифманометра вибирають як найближче більше значення зі стандартного

ряду, наведеного у ГОСТ 18140–84 [14]. При цьому перевіряють виконання умови застосування методу змінного перепаду тиску:

$$\Delta p_b / p \leq (\Delta p_b / p)_{\max}. \quad (38)$$

У разі її виконання визначають ітераційним шляхом відносний діаметр отвору діафрагми за рівнянням (20), в якому за значення Δp береться значення Δp_b .

Якщо умова (38) не виконується, верхню межу вимірювання дифманометра вибирають як найближче менше значення зі стандартного ряду [14] і перераховують відносний діаметр отвору діафрагми за рівнянням (20).

Отримані значення відносного діаметра β отвору діафрагми, діаметра отвору d_{20} діафрагми та верхньої межі вимірювання дифманометра Δp_b є параметрами витратоміра змінного перепаду тиску, оптимального за точністю вимірювання витрати та кількості природного газу, тобто витратоміра, який забезпечує найменшу невизначеність вимірювання витрати та кількості природного газу.

ВИСНОВКИ

За результатами виконаної авторами роботи проведено аналіз наявного методу розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати природного газу. Рівняння методу, отримані для аналітичних залежностей коефіцієнтів, що входять до рівняння об'ємної витрати

природного газу, приведеної до стандартних умов, уведених у РД50-213–80.

У процесі проведення досліджень:

► показано, що між відносним діаметром отвору діафрагми і перепадом тиску на ній існує одназначна залежність;

► записано систему рівнянь для визначення базових даних, необхідних для отримання рівняння для розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми, оптимальної за точністю вимірювання витрати природного газу;


► уточнено рівняння безрозмірного комплексу, який залежить від вхідних величин, необхідних для розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми;

► отримано нові рівняння (26) — (34) для розрахунку відносного діаметра отвору діафрагми з кутовим способом відбору тиску, оптимальної за точністю вимірювання витрати природного газу, як функції безрозмірного комплексу і числа Рейнольдса, яке не суперечить вимогам Національного стандарту України ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,5:2009 і Міжнародного стандарту ISO 5167:2003. Відносна розширена невизначеність, приписана отриманим рівнянням, не перевищує 0,05 %;

► наведено уточнений алгоритм визначення верхньої межі вимірювання дифманометра і розрахунок відносного діаметра отвору діафрагми під вибрану верхню межу вимірювання дифманометра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50-213-80. — Офиц. Док. — М.: Изд-во стандартов. (Rules for measuring gas and liquid flow standard primary device: RD 50-213-80. — Official Document — М.: Publishing Standards). 1982. — 320 с/р. — (Руководящий нормативный документ) / (The steering normative document).
- Пистун Е.П. Аналитическое определение предельного номинального перепада давления дифференциальных манометров и относительной площади стандартных диафрагм расходомеров газа и пара [Текст] / Пистун Е.П., Лесовой Л.В., Крук И.С. // Измерительная техника. — М.: Изд-во стандартов, (Pistun E.P. Analytical determination of the limit of nominal differential pressure of the differential pressure gauges and the relative area of the standard orifice plates flowmeter gas and steam [Text] / Pistun E.P., Lesovoi L.V., Crook I.S. // Measurement Technique. — М.: Publishing Standards). — 1987. — №10. — С/Р. 30—33.
- Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювань та загальні вимоги. (ГОСТ 8.586.1-2005 (ІСО 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003,NEQ): ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. — [Чинний від 2010-04-01]. — К.: Держспоживстандарт України. (Metrology. Measurements of liquid and gas flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 1. Principle method of the of measurements general requirements. (GOST 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003,NEQ): DSTU GOST 8.586.1:2009. — [Effective as of 2010-04-01]. — K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine). 2010. — 98 с/р. — (Національний стандарт України)/ (National Standard of Ukraine).
- Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужуючих пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.2-2005 (ІСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003,NEQ): ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. — [Чинний від 2010-04-01]. — К.: Держспоживстандарт

- України. (Metrology. Measurement of liquid and gas flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 2. Orifice plates. Technical requirements. (GOST 8.586.2-2005 (ISO 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, NEQ): DSTU GOST 8.586.2:2009. — [Effective as of 2010-04-01]. — К.: Derzhspozhivstandard of Ukraine). 2010. — 90 с/р. — (Національний стандарт України)/ (National Standard of Ukraine).
5. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужуючих пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. (ГОСТ 8.586.5-2005, IDT): ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. — [Чинний від 2010-04-01]. — К.: Держспоживстандарт України. (Metrology. Measurement of liquid and gas flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 5. Measurement procedure. (GOST 8.586.5-2005, IDT): DSTU GOST 8.586.5:2009. — [Effective as of 2010-04-01]. — К.: Derzhspozhivstandard of Ukraine). 2010. — 196 с/р. — (Національний стандарт України)/ (National Standard of Ukraine).
 6. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-1996. — [Действующий от 1997-07-01]. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. (Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Definition of physical properties of natural gas, its components and processing products: GOST 30319.1-1996. — [Effective as of 1997-07-01]. — Minsk: Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification). 1997. — 20 с/р. (Межгосударственный стандарт) / (Interstate standard).
 7. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-1996. — [Действующий от 1997-07-01]. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. (Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Definition of compressibility coefficient: GOST 30319.2-1996. — [Effective as of 1997-07-01]. — Minsk: Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification). 1997. — 43 с/р. (Межгосударственный стандарт) / (Interstate standard).
 8. Айрапетов В.А. Методика расчета диафрагм, оптимальных по точности измерения расхода и количества природного газа / Айрапетов В.А., Сошина Ж.С., Степкина Л.А., Пистун Е.П., Крук И.С., Лесовой Л.В. // — М.: Всесоюз. науч.-произв. об-ние «Союзгазавтоматика». (Airapetov V.A. Method of calculating the optimum orifice plates for the accuracy of flow measurement and quantity of natural gas / Airapetov V.A., Soshina J.C., Stepkina L.A., Pistun E.P., Crook I.S., Lesovoi L.V. // — М.: All-Union Scientific-Manuf. union «Soyuzgazavtomatika»). 1983. — 30 с/р.
 9. Measurement of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties: ISO 5168:2005.
 10. Лесовой Л.В. Вибір верхньої границі перепаду тиску дивманометра під задані параметри діафрагми та трубопроводу / Лесовой Л.В., Кузык В.А. // Вимірювальна техніка та метрологія — Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». (Lesovoi L.V. Selecting the top limit of the differential pressure of differential pressure gauges under the specified parameters diaphragm and pipeline / Lesovoi L.V., Kuzyk V.A. // Measuring equipment and metrology — Lviv: Publishing Nat. Univ. «Lviv Polytechnic»). 2013. — №74. — С/Р. 48—53.
 11. Measurement of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 2: orifice plates: ISO 5167-2:2003.
 12. Reader-Harris, M.J. Pipe roughness and Reynolds number limits for the orifice plate discharge coefficient equation [Text]/ M.J. Reader-Harris // In Proc. of 2nd Int. Symp. On Fluid Flow Measurement, June 1990, Calgary, Canada, Arlington, Virginia: American Gas Association. — Calgary, 1990. — P. 29—43.
 13. Пістун Є.П. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску [Текст]/ Пістун Є.П., Лесовой Л.В. — Львів: Вид-во ЗАТ «Ін-т енергоаудиту та обліку енергоносіїв». (Pistun E.P. Rationing of the flow meter of variable differential pressure [Text] / Pistun E.P., Lesovoi L.V. — Lviv: Publishing ZAT «In-t enerhoaudytu ta obliku enerhonosiiv»). 2006. — 576 с/р.
 14. Манометры дифференциальные ГСП. Общие технические условия. ГОСТ 18140-84. [Действующий от 1985-07-01]. — М.: Изд-во стандартов. (SSI differential pressure gauges. General specifications: GOST 18140-84. — [Effective as of 1985-07-01]. — М.: Publishing Standards). 2003. — 15 с/р. (Межгосударственный стандарт) / (Interstate standard). 

Отримано / received: 06.03.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.П. Пістуном (Україна).

Prof. E.P. Pistun, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 681.2.66 (0754.8)

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ МЕТОДОМ КВАДРАТУР

Й. Стенцель, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління,

К. Літвінов, аспірант кафедри,

О. Проказа, кандидат технічних наук, доцент кафедри,

А. Рябіченко, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри,

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Северодонецьк

Сучасні методи розрахунку перехідних процесів складних систем контролю та регулювання є наближеними, що призводить до значних похибок вимірювального контролю та автоматичного регулювання. Для розрахунку перехідних процесів та їх дослідження пропонується використати метод квадратур, за допомогою якого складні динамічні системи ідентифікуються до другого порядку з новими сталими часу. Описано методи визначення сталих часу ідентифікованої системи. Показано, що сталі часу такої системи повністю визначаються дійсною та уявною частотними характеристиками.

Modern methods for calculation of transients in complex systems control and regulation are approximate, which leads to sig-

nificant errors of measuring control and automatic regulation. For the calculation of transients and their research are encouraged to use the method of quadratures by which complex dynamic systems are identified up to the second order with a new time constants. Describes methods for determining the time constant of the identified system. It is shown that the time constants of the system are completely determined by the real and imaginary frequency characteristics. Since the curves of transients, which are calculated by the method of quadratures, always have a point of maximum change in the process variable, then it is possible to determine by the position the accuracy of the measuring control. This is important in the development of application software for processes of the measurement information processing in computer-integrated systems of control.

Ключові слова: метод, перехідний процес, система, контроль, регулювання, квадратура, рівняння, точність.

Keywords: method, transient, system, control, regulation, quadrature, equation, accuracy.

Технологічні процеси в хімічній, нафтохімічній, харчовій, інших галузях господарства, як правило, є інерційними та характеризуються такими параметрами, як часом чистого запізнення, значним у багатьох випадках, часом перехідного процесу, аперіодичністю, коливальністю тощо. Усі технологічні процеси забезпечуються інформаційно-вимірювальними системами (ІВС), системами автоматичного регулювання (САР), сигналізації та блокування. Ці системи також є інерційними та описуються відповідними динамічними характеристиками. Якщо час перехідного процесу технологічного об'єкта контролю та управління (ТОКУ) у (5–10) разів перевищує такий же час ІВС, інерційністю останньої можна з певною вірогідністю знехтувати за оцінювання точності контролю чи управління. У всіх інших випадках, з метою підвищення точності й достовірності вимірювального контролю (ВК) та управління, інерційністю нехтувати не можна. У реальних технологіч-

них процесах практично немає статичних режимів, а зміна витрат теплових і матеріальних потоків призводить до появи перехідних процесів вихідних координат ТОКУ, за якими оцінюються якісні показники роботи об'єкта й визначаються налагоджувальні параметри регуляторів САР. Окрім того, технологічні процеси супроводжуються реологічними перетвореннями імпульсу маси, енергії та кількості руху, які також належать до інерційних. Отже, ТОКУ можуть описуватися диференціальними рівняннями високого порядку, що не мають аналітичного розв'язку, або наявні методи є наближеними і не забезпечують відповідної точності розрахунку перехідних процесів.

Методи розрахунку перехідних процесів САР описано у значній кількості наукових праць [1–5]. До основних з них належать такі: метод коренів (класичний), зворотного перетворення Лапласа [6] і частотні, серед яких є метод трапецій [7]. До найбільш

точних належить класичний метод, але проблема його використання пов'язана з відсутністю способів визначення коренів диференціального рівняння високого порядку. Така сама проблема стосується й методу зворотного перетворення Лапласа, незважаючи на те, що його широко використовують в програмному забезпеченні комп'ютерно-інтегрованих систем контролю та управління технологічними процесами (КІСКУ ТП). Частотні методи засновано на інтегруванні дійсної (ДЧХ) чи уявної (УЧХ) частотних характеристик, але вимагають великих витрат часу для розрахунку перехідних процесів. Окрім того, точність розрахунку є недостатньо високою, оскільки ці методи засновано на розділенні ДЧХ на елементарні площини (наприклад, трапеції), для кожної з яких розраховується частковий перехідний процес. Звідси випливає, що зі збільшенням кількості таких елементарних площин, а відповідно точності перехідного процесу, збільшується й час розрахунку таких процесів. Питанням точності перехідних процесів ІБК та САР приділяють значну увагу. Це видно з того, що практично у всіх дисертаційних роботах з автоматизації процесів керування є розділи щодо досліджень динамічної та статичної точності. Для оцінювання точності таких систем, як правило, використовують принципи випадкових процесів (випадкових функцій і випадкового контролю), виконують оцінку однорідності дисперсій, визначають кореляційні функції та середнє квадратичне відхилення σ . Абсолютну похибку системи визначають за формулою: $\Delta = \pm k\sigma$, де k — коефіцієнт Стюдента [8, 9]. При цьому використовують метод найменших квадратів з метою визначення деякого дійсного значення випадкової функції чи контролю. Оскільки випадкові функції змінюються в часі, то з метою підвищення точності контролю та регулювання в сучасних КІСКУ ТП виконують розрахунки перехідних процесів (у більшості випадків використовують метод зворотного перетворення Лапласа) з метою визначення швидкості зміни вихідних координат; відхилення їх від деякого значення, прийнятого за дійсне; максимальної амплітуди відхилення цих координат від деяких їхніх номінальних значень за технологічним регламентом; відповідних похибок ВК. Чим більшим є час опрацювання вимірювальної інформації, тим більшою є амплітуда зміни вихідної координати, а значить, тим більшою є похибка ВК вихідних координат. Отже, зменшення часу розрахунку перехідних процесів є важливим науково-практичним завданням.

Мета статті — дослідження перехідних процесів ІБК і САР, що описуються лінійними диферен-

ціальними рівняннями високого порядку. За реальних виробничих умов на ТОКУ постійно впливають різноманітні зовнішні та внутрішні чинники, які призводять до динамічної зміни вихідних координат цього об'єкта як за величиною, так і за швидкістю їх руху. Ліквідацію дії цих чинників здійснюють САР, які формують певну протидію за відповідним законом. Якщо впливний чинник визначено ще на вході до ТОКУ (наприклад, зміну витрати матеріального чи теплового потоку, температури тощо), то його дію на об'єкт можна врахувати ще до зміни тієї чи іншої вихідної координати шляхом внесення випереджувального сигналу до регулятора САР. У цьому разі точність регулювання підвищується, оскільки амплітуда зміни вихідної координати є невеликою. Внаслідок того, що у багатопараметричному ТОКУ одночасно можуть змінюватися як вхідні, так і впливні координати, то, зазвичай, урахувати та визначити їхній вплив є достатньо складною задачею, оскільки не всі вхідні параметри можна контролювати. Тому у більшості випадків технологічні процеси ведуть за зміною вихідних координат. За такого способу управління ТОКУ вимірювальному контролю підлягають вихідні, вхідні і деякі впливні координати. Якщо змінюється той чи інший впливний параметр (наприклад, витрата матеріального потоку), реакція на цю зміну з'явиться на виході ТОКУ лише через час, що називається часом перебування ϑ_{Π} [10]. Сигнал вихідної координати, який сприймається вимірювальним перетворювачем, за лінією зворотного зв'язку САР подається на регулятор, який формує відповідний коригувальний сигнал. Останній змінює вхідну координату (наприклад, витрату матеріального чи теплового потоку) до того моменту, поки вихідна координата не повернеться до попереднього значення. Із цього випливає, що через ТОКУ знову проходить впливний параметр протягом часу ϑ_{Π} . З метою формування управлінських чи контролювальних сигналів, які б ураховували час проходження збурень через технологічний об'єкт, використовують різні методи, до яких належить метод розрахунку перехідних процесів, основною вимогою до яких є мінімум часу цього розрахунку та його точність.

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СКЛАДНИХ ІБК ТА САР МЕТОДОМ КВАДРАТУР

Уперше метод квадратур для розрахунку перехідних процесів описано в [11, 12]. Суть його полягає в тому, що до рівняння ДЧХ складної ІБК чи САР уводиться додатковий поліном, який є різницею поліномів знаменника та чисельника ДЧХ.

Припустимо, що передавальна функція ІБК чи САР описується таким диференціальним рівнянням високого порядку:

$$\tau_n^n \frac{d^n y}{dt^n} + \tau_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \tau_i^i \frac{d^i y}{dt^i} + \dots + \tau_3^3 \frac{d^3 y}{dt^3} + \tau_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_1 \frac{dy}{dt} + y = k \left(\xi_m^m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + \xi_\zeta^\zeta \frac{d^\zeta x}{dt^\zeta} + \dots + \xi_2^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \xi_1 \frac{dx}{dt} + x \right) \quad (1)$$

де τ_n, ξ_m — сталі часу перехідного процесу; $n = 0, 1, 2, \dots, i, m = 0, 1, 2, \dots, \zeta$; y — вихідна координата ІБК чи САР; x — вхідна координата; t — час перехідного процесу; k — коефіцієнт передавання системи.

Передавальна функція таких систем має вид: $W(s) = Y(s) / X(s)$, де $Y(s), X(s)$ — вихідна та вхідна координати ТОКУ, перетворені за Лапласом; s — оператор Лапласа. У частотній області за $k=1$ маємо:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \text{Re}(\omega) - j \text{Im}(\omega) = \frac{C(\omega)}{B(\omega)} - j \frac{D(\omega)}{B(\omega)} \quad (2)$$

де $\text{Re}(\omega), \text{Im}(\omega)$ — ДЧХ та УЧХ відповідно; ω — кутова частота; $C(\omega), B(\omega), D(\omega)$ — поліноми.

Згідно з методом квадратур ДЧХ записуємо у такий спосіб:

$$\text{Re}(\omega) = \frac{C(\omega)}{B(\omega)} = \frac{B(\omega) - K(\omega)}{B(\omega)} = 1 - \frac{K(\omega)}{B(\omega)} \quad (3)$$

де $K(\omega) = B(\omega) - C(\omega)$ — доповнювальний поліном.

Як показали дослідження, поліном $K(\omega)$ завжди має спільний множник ω^2 . Тобто його можна записати так: $K(\omega) = \omega^2 N_2(\omega)$, де $N_2(\omega)$ — поліном з вільним членом. Отже, рівняння (3) набуває такої форми:

$$\text{Re}(\omega) = 1 - \omega^2 N_2(\omega) \quad (4)$$

Якщо ІБК чи САР описується диференціальним рівнянням другого порядку: $\tau_2^2 (d^2 y / dt^2) + \tau_1 (dy / dt) + y = kx$, де τ_1, τ_2 — сталі часу, то за $k=1$ $\text{Re}(\omega) = 1 - \omega^2 \tau_2^2$. Порівнюючи це рівняння з (3), бачимо, що для систем другого порядку $N_2(\omega) = \tau_2^2$. На рис. 1, а показано ДЧХ, яка є характерною для систем другого та вищого порядку.

Із рівняння (3) і рис. 1, а видно, що за $\text{Re}(\omega_{\text{п}}) = 0$ $N_2(\omega_{\text{п}}) = 1 / \omega_{\text{п}}^2$, а для системи другого порядку $N_2(\omega_{\text{п}}) = \tau_2^2 = 1 / \omega_{\text{п}}^2$, де $\omega_{\text{п}}$ — частота переходу ДЧХ через частотну вісь. Отже, для системи другого порядку стала часу $\tau_2 = 1 / \omega_{\text{п}}$. Із цього випливає висновок, що коефіцієнт передавання k впливає лише на амплітуду ДЧХ за $\omega=0$ і не впливає на положення частоти переходу $\omega_{\text{п}}$. Оскільки для полінома $N_2(\omega)$ вільним членом є τ_2^2 , можна записати таку рівність: $N_2(\omega) = H_{2k}^k(\omega) + \tau_2^2$. Якщо пло-

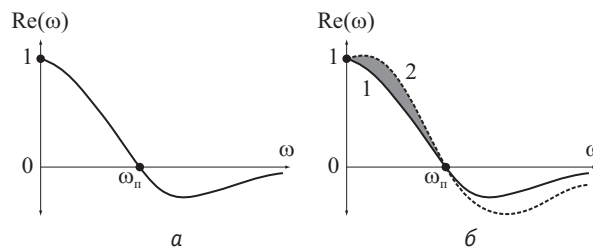


Рис. 1. ДЧХ системи другого і вищого порядку (а) і принцип ідентифікації системи високого порядку другим (б)

Fig. 1. The RFC for system of the second and higher order (a) and the identification principle for the system of high-order by second (b)

ща під кривою функції $H_{2k}^k(\omega)$ є незначною (відносно до площі під кривою $\text{Re}(\omega) = f(\omega)$), складовою $H_{2k}^k(\omega)$ можна знехтувати, і систему ідентифікувати рівнянням другого порядку. Тоді подальша робота полягає у визначенні сталої часу τ_1 . Для цього можна скористатися УЧХ. Оскільки УЧХ САР за каналом регулювання завжди має спільним множником частоту ω , рівняння (2) запишемо у такий спосіб: $\text{Im}(\omega) = D(\omega) / B(\omega) = \omega N_1(\omega)$. Для системи другого порядку маємо: $\text{Im}(\omega) = \omega \tau_1$ або $\tau_1 = \text{Im}(\omega) / \omega$. Для такої системи рівняння для множника $N_1(\omega)$ має вид: $N_1(\omega) = \tau_1 / \left[(1 - \omega^2 \tau_2^2)^2 + (\omega \tau_1)^2 \right]$. Для

визначеної вище частоти переходу $\omega_{\text{п}}$ отримуємо: $N_1(\omega_{\text{п}}) = 1 / \omega_{\text{п}}^2 \tau_1$, звідки стала часу $\tau_1 = 1 / \omega_{\text{п}}^2 N_1(\omega_{\text{п}})$. Як показують дослідження, всі криві ДЧХ, незалежно від сталої часу τ_1 , проходять через такі дві точки: за $\text{Re}(0) = 1$ і $\text{Re}(\omega_{\text{п}}) = 0$. На рис. 1, б показано реальну 1 і ідентифіковану 2 другим порядком криві ДЧХ. Різниця площ між цими кривими характеризує точність ідентифікації за методом квадратур. Як показано у [13, 14], поведінка системи в динамічному режимі роботи практично визначається частотами в діапазоні від 0 до $\omega_{\text{п}}$. Вищі частоти, як правило, чинять незначний вплив на роботу ІБК та САР. Тому за визначення точності перехідного процесу достатньо знайти площу під реальною ДЧХ в діапазоні частот від 0 до $\omega_{\text{п}}$ та площу між кривими реальної та ідентифікованими ДЧХ. Для визначення сталої часу τ_1 пропонується такий алгоритм:

1. Описують ІБК чи САР у формі диференціального рівняння високого порядку і визначають сталі часу перехідного процесу.

2. Визначають передавальну функцію ІБК чи САР, ДЧХ і УЧХ та розраховують графіки: $\text{Re}(\omega) = f(\omega)$ й $\text{Im}(\omega) = g(\omega)$.

3. За ДЧХ визначають частоту переходу $\omega_{\text{п}}$, за якою визначають сталу часу ідентифікованої системи $\tau_{2i} = 1 / \omega_{\text{п}}$.

4. За формулою для УЧХ визначають поліном $N_1(\omega)$ та його значення за частоти переходу ω_{Π} .

5. За формулою $\tau_{11} = 1/\omega_{\Pi}^2 N_1(\omega_{\Pi})$ визначають сталу часу ідентифікованої системи.

6. Записують диференціальне рівняння ідентифікованої ІВС і САР у такій формі:

$$\tau_{21}^2 (d^2 y / dt^2) + \tau_{11} (dy / dt) + y = kx. \quad (5)$$

7. Визначають відношення τ_{11} / τ_{21} і за відповідними формулами розраховують перехідні процеси.

Якщо різниця між реальною та ідентифікованою ДЧХ є великою, то у діалоговому режимі, змінюючи сталу часу τ_{11} , потрібно домогтися мінімуму цієї різниці.

Аналізуючи рівняння $\tau_{11} = 1/\omega_{\Pi}^2 N_1(\omega_{\Pi})$, можна зробити такі висновки. Якщо $\tau_{21}^2 = 1/\omega_{\Pi}^2$, рівняння приводиться до такої форми: $\tau_{11} = \tau_{21}^2 N_1(\omega_{\Pi})$ або

$$\tau_{11} / \tau_{21}^2 = N_1(\omega_{\Pi}). \quad (6)$$

Корені квадратного рівняння (5) визначаються за формулами:

* за аперіодичного перехідного процесу:

$$p_{1,2} = -\tau_{11} / 2\tau_{21}^2 \pm \sqrt{(\tau_{11} / 2\tau_{21}^2)^2 - 1/\tau_{21}^2}; \quad (7)$$

* за коливального перехідного процесу:

$$p_{1,2} = -\tau_{11} / 2\tau_{21}^2 \pm \sqrt{1/\tau_{21}^2 - (\tau_{11} / 2\tau_{21}^2)^2}, \quad (8)$$

де $\alpha = \tau_{11} / 2\tau_{21}^2$ — ступінь загасання перехідного процесу; $\omega_0 = \sqrt{1/\tau_{21}^2 - (\tau_{11} / 2\tau_{21}^2)^2}$ — власна частота коливальних системи.

Порівнюючи рівняння (6) і (7) та (8), видно, що між ними є відповідна подібність. Якщо рівняння (5) поділити на 2, приходимо до таких рівностей:

► для ступеня загасання:

$$\alpha = N_1(\omega_{\Pi}) / 2. \quad (9)$$

► для власної частоти коливальних перехідного процесу:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{\Pi}^2 - [N_1(\omega_{\Pi}) / 2]^2}. \quad (10)$$

Підставивши рівняння (9) у (10), маємо:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{\Pi}^2 - \alpha^2} = \omega_{\Pi} \sqrt{1 - (\alpha / \omega_{\Pi})^2}. \quad (11)$$

Із рівнянь (9) і (11) видно, що параметри перехідних процесів ІВС та САР повністю визначаються частотою переходу ДЧХ через частотну вісь та поліномом $N_1(\omega)$. Перехідний процес, розрахований за рівнянням (5), можна використовувати за дійсний за визначення точності ІВС і САР. Відомо [15], що крива перехідного процесу об'єкта другого порядку в загальному випадку має форму, показану на рис. 2.

Характерним для перехідного процесу об'єкта другого порядку є наявність на її кривій точок «а»,

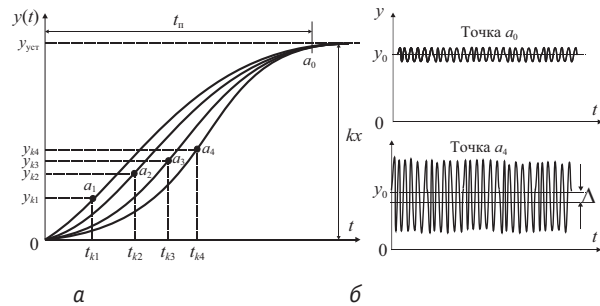


Рис. 2. Графіки перехідних процесів ІВС і САР (а) і трендові криві за зміни максимальної швидкості руху вимірювальної координати (б)

Fig. 2. The graphs of transients IMS and SAR (a) and trend curves by the change of maximum speed movement of the measuring coordinates (b)

в яких швидкість руху вихідного сигналу є максимальною. Зі збільшенням в ІВС чи САР кількості послідовно з'єднаних динамічних ланок крива перехідного процесу зміщується праворуч, а відповідно зміщуватиметься точка максимальної швидкості, наприклад, від «а₁» до «а₄», як показано на рис. 2, а, що призводить до збільшення вихідної координати від y_{k1} до y_{k4} , а відповідно до зростання динамічної похибки вимірювального контролю. Графіки перехідних процесів, показані на рис. 2, а, є характерними для стаціонарних процесів, коли час перехідного процесу є значно меншим від часу зміни впливального параметра. У багатопараметричних ТОКУ на вихідну координату одночасно впливають багато впливних чинників, які призводять до того, що ця координата змінюється за час θ , який є значно меншим від часу t_{Π} . У таких випадках час перехідного процесу координати y може змінюватися, наприклад, від t_{k1} до t_{k4} , а координата y від y_{k1} до y_{k4} . Якщо $\theta \geq t_{\Pi}$, характер трендової кривої має вид, поданий на рис. 2, б. За $\theta < t_{\Pi}$ відхилення вихідної координати може стати суттєвим, що призводить до збільшення похибки вимірювального контролю. Так, наприклад, для точки «а₀» трендова крива має незначне відхилення (рис. 2, б верхній), а для точки «а₄» це відхилення є суттєвим, що призводить до появи похибки вимірювального контролю Δ .

ВИСНОВКИ

Показано, що складну систему вимірювального контролю чи автоматичного регулювання, яка складається з лінійних динамічних елементів та описується диференціальним рівнянням високого порядку, можна привести до систем другого порядку (квадратур). Причому перша квадратура є основною і може бути використана для розрахунку перехідного процесу.

Доведено, що стали часу ідентифікованого диференціального рівняння першої квадратури визначаються за дійсною та уявною частотними характеристиками реальної складної системи вимірювального контролю чи регулювання. За ДЧХ реальної системи визначається стала часу, яка є множником другої похідної цього рівняння, а за УЧХ — стала часу, яка є множником першої похідної. Окрім того показано, що ступінь загасання коливальної системи визначається поліно-

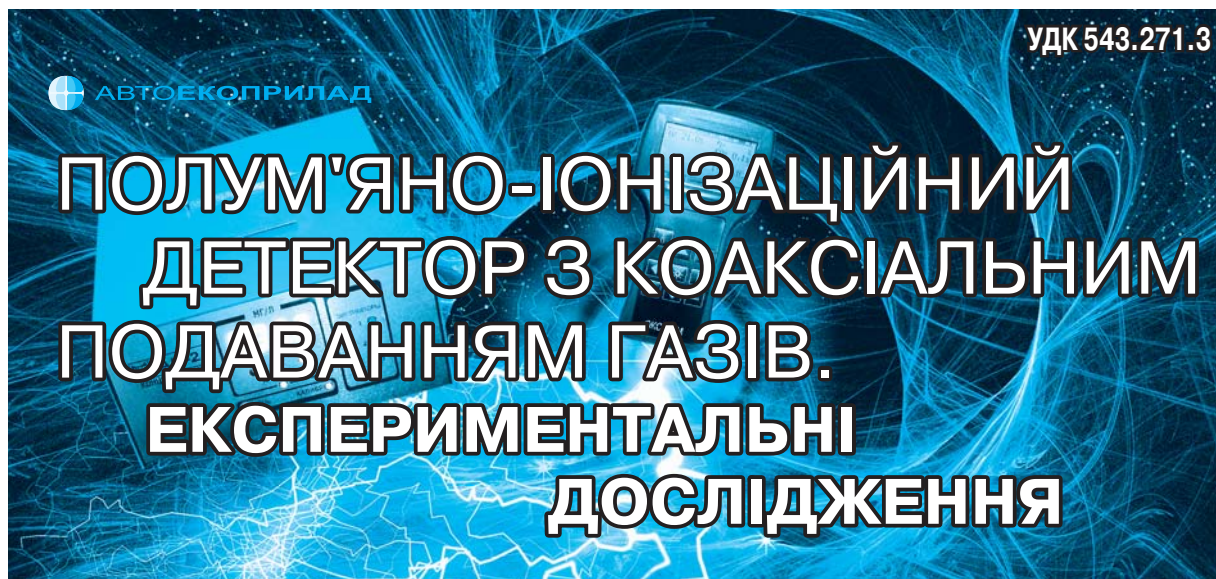
мом УЧХ. Оскільки криві перехідних процесів, розраховані за методом квадратур, завжди мають точку максимального руху технологічного параметра, за її положенням можна визначати точність вимірювального контролю чи регулювання, що є важливим за розроблення прикладного програмного забезпечення процесів опрацювання вимірювальної інформації в комп'ютерно-інтегрованих системах контролю та управління технологічними процесами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] // В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — М.: Наука (Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija. Moscow: Nauka), 1972. — 768 с/р.
2. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления [Текст] // А.А. Воронов. — М.: Энергия (Voronov A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Jenergija), 1980. — 312 с/р.
3. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование [Текст] // Н.Н. Иващенко. — М.: Машиностроение (Ivashhenko N.N. Avtomaticheskoe regulirovanie. Moscow: Mashinostroenie), 1978. — 736 с/р.
4. Нетушил А.В. Теория автоматического управления [Текст] // Под ред. А.В. Нетушила. — М.: Высшая шк. (Netushil A.V. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Vysshaja shk.), 1983. — 488 с/р.
5. Фельбаум А.А. Методы теории автоматического управления [Текст] // А.А. Фельбаум, А.Г. Бутковский. — М.: Наука (Fel'baum A.A., Butkovskij A.G. Metody teorii avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Nauka), 1971. — 743 с/р.
6. Макаров И.М. Линейные автоматические системы [Текст] // И.М. Макаров, Б.М. Менский. — М.: Машиностроение (Makarov I.M., Menskij B.M. Linejnye avtomaticheskie sistemy. Moscow: Mashinostroenie), 1982. — 504 с/р.
7. Солодовников В.В. Частотный метод построения переходных процессов [Текст] // В.В. Солодовников, Ю.И. Топчиев, Г.В. Крутикова. — М.: ГИТТЛ (Solodovnikov V.V., Topcheev J.I., Krutikova G.V. Chastotnyj metod postroenija perehodnyh processov. Moscow: GITTL), 1955. — 196 с/р.
8. Уланов Г.М. Статистические и информационные вопросы управления по возмущению [Текст] // Г.М. Уланов. — М.: Энергия (Ulanov G.M. Statisticheskie i informacionnye voprosy upravlenija po vozmushheniju. Moscow: Jenergija), 1970. — 256 с/р.
9. Уланов Г.М. Динамическая точность и компенсация возмущений в системах автоматического управления [Текст] // Г.М. Уланов. — М.: Машиностроение (Ulanov G.M. Dinamicheskaja tochnost' i kompensacija vozmushhenij v sistemah avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Mashinostroenie), 1971. — 260 с/р.
10. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления [Текст] // В.С. Пугачев. — М.: Физматгиз (Pugachev V.S. Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Fizmatgiz), 1960. — 884 с/р.
11. Стенцель Й.И. Автоматизация технологических процессов химических производств [Текст] // Й.И. Стенцель. — К.: ІСДО (Stencel' J.I. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobniectv. Kiev: ISDO), 1995. — 360 с/р.
12. Стенцель Й.И. Розрахунок перехідних процесів складних систем регулювання методом квадратур [Текст] // Й.И. Стенцель, І.Є. Киричук, О.В. Савельєва // Наук.-техн. збірник «Автоматизація технологічних процесів та промислова екологія». — Київ (Stencel' J.I., Kirichuk I.E., Savel'eva O.V. (1997). Rozrahunok perehidnih procesiv skladnih sistem reguljuvannja metodom kvadratur. Nauk.-tehn. zbirnik «Avtomatizacija tehnologichnih procesiv ta promislova ekologija»), 1997. — № 1. — С/Р. 2—5.
13. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации [Текст] // Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков. — М.: Химия (Polockij L.M., Lapshenkov G.I. Avtomatizacija himicheskix proizvodstv. Teorija, raschet i proektirovanie sistem avtomatizacii. Moscow: Himija), 1987. — 296 с/р.
14. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] // Г.Ф. Зайцев. — К.: Высшая шк. Главное изд-во (Zajcev G.F. Teorija avtomaticheskogo upravlenija i regulirovanija. Kiev: Vysshaja shk. Glavnoe izd-vo), 1989. — 431 с/р.
15. Стенцель Й.И. Автоматизация технологических процессов химических производств [Текст] // Й.И. Стенцель, О.В. Поркуян — Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля (Stencel' J.I., Porkujan O.V. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobniectv. Lugans'k: vid-vo Shidnoukr. nac. un-tu im. V.Dalja), 2010. — 300 с/р. ■

Отримано / received: 12.02.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Г. Архиповим (Україна).
Prof. O.G. Arkhyrov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



ПОЛУМ'ЯНО-ІОНІЗАЦІЙНИЙ ДЕТЕКТОР З КОАКСІАЛЬНИМ ПОДАВАННЯМ ГАЗІВ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В. Приміський, кандидат технічних наук,
доцент кафедри аналітичного екологічного приладобудування,

В. Івасенко, аспірант кафедри,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Проаналізовано особливості конструкції полум'яно-іонізаційного детектора. Розглянуто варіанти підключення трьох газових каналів: водню, повітря, аналізованої проби з вуглеводнями, — до детектора. Обґрунтовано вибір коаксіальної схеми введення газових потоків на пальник детектора. Проведено експериментальні дослідження впливу витрати аналізованої проби на вихідний сигнал. Досліджено вплив витрати водню, конструкції пальника, форми і конфігурації полум'я на вихідний сигнал. Надано рекомендації щодо побудови двоканального полум'яно-іонізаційного газоаналізатора для вимірювання фонових концентрацій вуглеводнів.

Peculiar properties of the flamingly-ionized detector were analyzed. The variants of the connection of three gas pipes: hydrogen, air, analyzed sample of carbon dioxide to the detector were examined. The choice of the coaxial schema of the gas flows injection to detector's burner was proved. The experimental investigations of the influence on the usage of the analyzed sample to the outcoming signal were held. The influence of the hydrogen usage, construction of the burner, the distribution of the flame according to the outcoming signal was analyzed. The recommendations for the dual-channel flamingly-ionized gas sensor building, which is used for measurement of the carbon dioxide background concentration, were given.

Ключові слова: вуглеводні, детектор, випаровування, газоаналізатор, пальник, електрод, водень, повітря, аналіз.

Keywords: carbon dioxide, detector, vaporization, gas sensor, burner, electrode, hydrogen, air, analysis.

Станом на початок 2014 року в Україні налічувалося більше 9,0 млн. одиниць автотранспортних засобів, що належать приватним власникам, державним і комунальним підприємствам. Для обслуговування та забезпечення усіх цих транспортних засобів паливом на всій території країни створено широкую мережу автозаправних станцій (АЗС). Наявна мережа АЗС в Україні складає більше 6000 станцій [1]. Різке збільшення кількості автомобілів призводить до техногенного навантаження на довкілля відпрацьованими газами автотранспорту. Кожна АЗС є джерелом викиду забруднювальних речовин (ЗР) [2, 3]. Бурхливе зростання кількості АЗС у країнах Західної Європи призвело до необхідності розроблення відповідних методик, які дозволяють визначити обсяги рівня випаровувань палива в процесі експлуатації АЗС [4, 5]. Кількість АЗС, що постійно зростає, а також об'єми реалізованого пального передбачають необхідність детального підходу до вивчення впливу роботи АЗС на навколишнє середовище. Ступінь токсичності компонентів відпрацьованого пального неоднаковий: одну з найбільших загроз становлять ароматичні вуглеводні — C_nH_m , які справляють різноманітний фізіологічний вплив на організм людини і характеризуються мінімальними значеннями гранично допустимих концентрацій у повітрі [6, 7]. Також випаровування АЗС є реальним джерелом утворення вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій і відповідно необхідності нормування [8, 9].

За нормативами Правил Європейської економічної комісії ООН з транспорту (ЄЕК ООН), Правила 49 і 83 для вимірювання вуглеводнів C_nH_m у складі відпрацьованих



В. Приміський



В. Івасенко

газів і викидів АЗС рекомендують застосовувати полум'яно-іонізаційний метод газового аналізу (полум'яно-іонізаційний детектор (ПІД)). За допомогою ПІД-методу можна створити високочутливий автоматичний газоаналізатор для вимірювання концентрацій сумарних вуглеводнів на рівні $0,00001\%$ [10]. Принцип вимірювання за цим методом полягає у тому, що аналізований газ направляється у водневе полум'я. За температури $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається дисоціація молекул вуглеводнів на СН-групи, їхнє окислення з утворенням вільних електронів та позитивних іонів CHO^+ . Якщо до зони водневого горіння прикласти електричне поле, виникає іонізаційний струм, пропорційний кількості СН-груп у молекулі вуглеводню. ПІД має більш рівномірну чутливість до різних видів вуглеводних сполук, тому на сьогодні він прийнятий як стандартний для вимірювання сумарної кількості вуглеводнів [11, 12]. Вимірювальна кількість вуглеводнів за ПІД-методом є у $(1,8-2,5)$ рази більшою, ніж за інфрачервоним (NDIR) методом. До недоліків ПІД-методу можна віднести відносну складність конструкції первинного перетворювача та необхідність створення трьох газових потоків:

- аналізованого газу: випаровувань АЗС, відпрацьованого газу з вихлопної труби;
- водневого палива;
- повітря для горіння.

У відомих дослідженнях полум'яно-іонізаційного методу значну увагу приділяють безпосередньо процесу іонізації, інтервалу напруги живлення детектора, вибору конструкції електродів, джерела чистого водню, електрометричним підсилювачам іонізаційного струму тощо; вплив же витрат зазначених газових потоків на вихідний сигнал досліджено не повною мірою [13]. Найбільш суттєвий дестабілізуючий вплив на вихідний сигнал ПІД справляють: іонізаційний струм на рівні $(10^{-12} - 10^{-9})\text{ А}$, зміни об'ємної витрати аналізованої проби. Зменшення впливу зміни витрати на вихідний сигнал і відповідно вибір оптимального значення інтервалу витрати є актуальним завданням.

ПОЛУМ'ЯНО-ІОНІЗАЦІЙНИЙ ДЕТЕКТОР З КОАКСІАЛЬНО РОЗТАШОВАНИМИ ГАЗОВИМИ КАНАЛАМИ

З метою усунення зазначеного вище явища сконструйовано і випробувано ПІД із коаксіально розташованими газовими каналами: аналізованого газу, повітря для горіння, чистого водню (рис. 1). Тобто всі три газові канали: водню, повітря, аналізованої проби входять до пальника одночасно і коаксіально [14, 15].

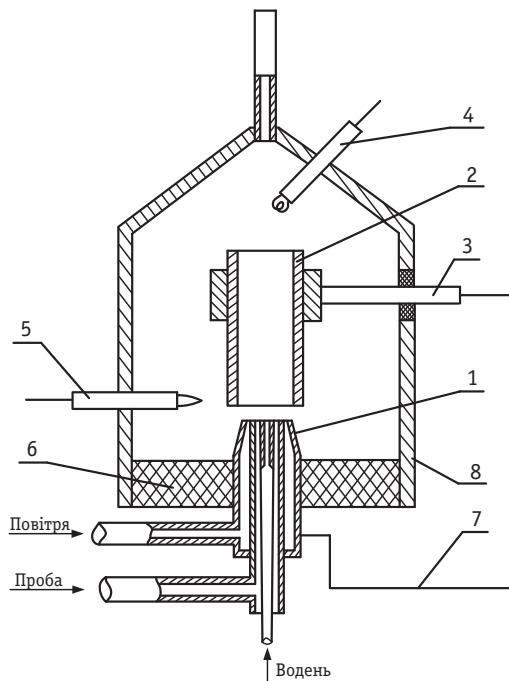


Рис. 1. Полум'яно-іонізаційний детектор

Fig. 1. Flamingly-ionized detector

1 — вузол пальника; 2 — колектор;
3, 7 — електроди; 4 — пальник; 5 — термопара;
6 — основа; 8 — корпус.

Результати експериментів з дослідження впливу зміни витрат газів: повітря, проби, водню, — що надходять до пальника, на вихідний сигнал ПІД наведено на рис. 2, 3. Залежність сигналу ПІД від витрати проби (рис. 2), має ділянку насичення, що дозволяє вибрати робоче значення витрати, коливання якого в межах похибки пневматичних елементів викликає незначні зміни вихідного струму ПІД.

Залежність сигналу ПІД від витрати повітря для горіння має такий же характер, як і в детекторі із загальним каналом водню і проби. Рівень флуктуаційних завад детектора коаксіальної конструкції не перевищує $5 \cdot 10^{-14}\text{ А}$, чутливість зберігається на рівні $1,25 \cdot 10^{-5}\text{ А/мг}$, за метаном. Розрахунковий поріг чутливості при цьому становить $4 \cdot 10^{-9}\text{ мг/с}$.

Особливістю роботи детектора цієї конструкції є те, що максимальному значенню сигналу за аналізу фонових концентрацій вуглеводнів в атмосфері відповідає визначення співвідношень лінійних швидкостей газової проби і водню, постійне для кожного значення діаметра водневого пальника. Подібна закономірність зберігається і за відсутності проби, коли виконується вимірювання початкового фоновому струму, і потік водню взаємодіє з повітрям для горіння. По суті, вимірювання проби, якщо це є повітря, і вимірювання початкового фоновому струму відрізняються в ПІД з коаксіальним подаванням

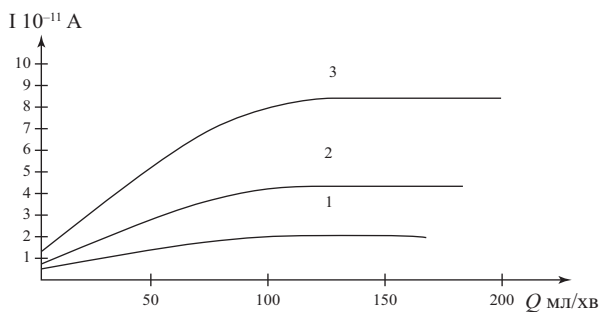


Рис. 2. Залежність сигналу від витрати аналізованого повітря

Fig. 2. The dependence of signal with the analyzed air usage

Витрата водню: 1. $Q_{H_2} = 20$ мл/хв; 2. $Q_{H_2} = 30$ мл/хв.; 3. $Q_{H_2} = 50$ мл/хв.

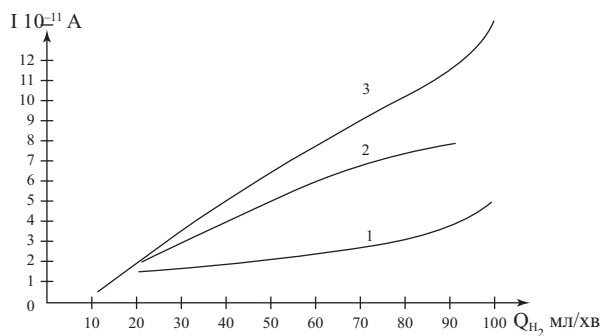


Рис. 3. Залежність сигналу датчика від витрати водню

Fig. 3. The dependence of sensor signal with the hydrogen usage

Витрата аналізованого повітря 1. $Q_{П} = 34,5$ мл/хв; 2. $Q_{П} = 69$ мл/хв; 3. $Q_{П} = 80,5$ мл/хв

газів умовами подавання проби до водневого полум'я.

Вплив витрати водню на сигнал ПД графічно представлено на рис. 3. Робоче значення витрати водню вибирають за умови отримання високої чутливості та низького рівня шуму.

Окрім співвідношення лінійних швидкостей проби водню, чутливість ПД цієї конструкції залежить від ступеня наближення аналізованого газу до полум'я. Як показали експерименти, максимальний сигнал детектора отримано у випадку, коли площа кільцевого перерізу каналу аналізованого газу була найменшою, тобто забезпечувалося надійне і найбільш повне потрапляння молекул вуглеводню до зони полум'я. Вузол пальника датчика (рис. 1) влаштовано у такий спосіб, що водневе сопло омивається потоком проби, а далі за колом розташовано канал подавання повітря для горіння. Канал подавання проби повинен розташовуватися поблизу основи полум'я й має такий прохідний переріз і конфігурацію, щоби розсіювання аналізованої речовини було мінімальним.

Значний вплив на величину чутливості детектора мають розміри водневого полум'я. Встановлено, що зі збільшенням висоти полум'я та його зменшенням в діаметрі, за збільшення лінійної швидкості водню, зростає корисний сигнал, при цьому зменшується горизонтальна ділянка залежності сигналу від витрати проби. За вибору робочого значення лінійної швидкості водню для кожного сопла є верхня межа, перевищення якої призводить до розширення зони низької температури, збільшення турбулентності та зриву полум'я. Низький поріг чутливості, який дозволяє проводити вимірювання мікроконцентрації вуглеводню, можна отримати за використання водневих пальників із внутрішнім діаметром

(0,3÷0,5) мм, верхня межа лінійності детектування при цьому обмежується величиною $1 \cdot 10^{-2} \%$. Чергове зменшення лінійного динамічного діапазону можна пояснити тим, що мікрополум'я має малий об'єм рекреаційної зони і зони термічної дисоціації. Енергія, отримана від згорання водню, може виявитися недостатньою для нормального протікання піролізу великого числа вуглеводневомістких молекул.

Зважаючи на те, що середнє значення вуглеводневих домішок в атмосфері зазвичай не перевищує $(1-5) \cdot 10^{-3} \%$ можна вважати, що отримана верхня границя лінійного динамічного діапазону відповідає нормативам ГДК у повітрі. Очевидно, за аналізу навколишнього повітря можна обійтися без повітря для горіння. Експериментально встановлено, що припинення подавання повітря для горіння до зони полум'я майже не відбивається на величині корисного сигналу. Отже, існує можливість створення двоканального полум'яно-іонізаційного детектора для вимірювання мікрослідів вуглеводнів у навколишньому повітрі. Як вже зазначено, за аналізу подібних сумішей поліпшуються умови іонізації сторонніх домішок, присутніх у пробі, і початковий фоновий струм при цьому зростає. Величина його для двогазового детектора вимірюється за подавання до каналу проби очищеного повітря і може перевищувати фоновий сигнал звичайного ПД приблизно у (2-2,5) рази. Проте рівень флуктуаційних шумів детектора при цьому не перевищує відповідного значення, отриманого за аналізу навколишнього повітря за допомогою стандартних ПД. Залежність сигналу від витрати повітря для горіння має такий же характер, як і в стандартних ПД з окремими каналами водню і проби.

ВИСНОВКИ

Конструкція розробленого детектора дозволяє регулювати величину початкового фонового сигналу


і підбирати рівень необхідної чутливості. Рівень флуктуаційних завад детектора коаксіальної конструкції не перевищує $5 \cdot 10^{-14}$ А, чутливість зберігається на рівні $1,25 \cdot 10^{-5}$ А/мг/с, за метаном. Розрахунковий поріг чутливості при цьому становить $4 \cdot 10^{-9}$ мг/с.

До особливостей конструкції коаксіального ПІД необхідно віднести необхідність забезпечення фіксованої концентричності газових каналів під час ви-

готовлення детектора, що впливає на величину інструментальної похибки.

Доцільність використання ПІД з коаксіальним подаванням газів у диференціальній схемі вимірювання газоаналізатора визначатиметься можливістю отримання детекторів з близькою чутливістю. Для вирішення цього питання необхідно проведення подальшої науково-дослідницької роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Івасенко В.М. Розрахункова модель випаровувань автозаправних станцій [Текст] / В.М. Івасенко // Вісник НТУ «ХПІ» (Ivasenko V.M. The estimated model fumes filling stations. USSR: Visnik NTU «XPI»). — 2014. — № 40 (1083). — С/Р. 51—59.
2. Соколова Е.В. Оценка факторов воздействия выбросов АЗС на воздушную среду их рабочей зоны и прилегающей территории [Текст] / Е.В. Соколова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура (Sokolova E.V. Assessment of impacts of emission gas station on the air environment of the work area and the surrounding area. USSR: Construction and architecture). — 2011. — № 25 (44). — С/Р. 392—397.
3. Франчук Г.М. Анализ данных про токсичность паливно-мастильних матеріалів для людини [Текст] / Г.М. Франчук, М.М. Николяк // Вісник НАУ (Franchuk H. M., Nykoliak M. M. Analysis of data on toxicity lubricants for man. USSR: Visnyk NAU). — 2007. — № 3—4 (33). — С/Р. 54—58.
4. Рота Р. Виділення тепла з резервуарів: моделювання та експерименти [Текст] / Р. Рота, С. Фраттіні (Rota R., Frattini S., Astori S., Paludetto R. Emission from fixed-roof storage tanks: modeling and experiments. Ind and Eng. Chem. Res.), 2001. T/V.40 — № 24. — С/Р. 5847—5857.
5. Андерсон М. Новый метод розрахунку після звітів по викидах бак [Текст] / М. Андерсон // Нафта і газ (Anderson M., Siepel J. New calculation method after tank emission reports. Oil and Gas Journal). 1997 — T/V. 95. — №46. — С/Р. 77—78.
6. Соколова Е.В. Обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия АЗС на атмосферу городских комплексов [Текст] / Е.В. Соколова, С.А. Кошкарёв // Вестник Северо-Кавказского федерального университета (Sokolova E.V. Justification of measures to reduce the level of exposure to the gas station on the atmosphere of urban complexes. USSR: Bulletin of the North Caucasus Federal University). — 2013. — № 3 (36). — С/Р. 102—107.
7. Азаров В.Н. К обоснованию размера санитарно-защитной зоны АЗС при снижении выбросов паров тяжелых углеводородов [Текст] / В.Н. Азаров, С.А. Кошкарёв, Е.В. Соколова // Строительство и реконструкция (Azarov V.N., Koshkarev S.A., Sokolova E.V. On the justification of the size of the sanitary protection zone of the gas station with a decrease in vapor emissions of heavy hydrocarbons. Stroitelstvo y rekonstruktsiya). — 2013. — № 4 (48). — С/Р. 57—59.
8. ДСТУ EN 14604:2009. Системи пожежної сигналізації. Сигналізатори диму пожежні [Текст] / Чинний від 2011-07-01. — К.: Держспоживстандарт України (ISO EN 14604: 2009. Fire alarm systems. Signaling fire smoke. Effective as of 2011-07-01. — Kiev, USSR: State Committee of Ukraine), 2009. — VII, 50 с/р.
9. ДСТУ EN 45544-1:2009. Повітря робочої зони. Сигналізатори та аналізатори токсичних газів і парів електричні. Частина 1. Загальні вимоги та методи випробування [Текст] / Чинний від 2011-07-01. — К.: Держспоживстандарт України (ISO EN 45544-1: 2009. The air of the working area. Signaling and analyzers of toxic gases and vapors Electric. Part 1: General requirements and test methods [Text] / Effective as of 2011-07-01. — Kiev, USSR: State Committee of Ukraine), 2009. — VII, 76 с/р.
10. Приміський В.П. Полум'яно-іонізаційний метод та газоаналізатор вимірювання вуглеводнів у відпрацьованих газах автомобіля [Текст] / В.П. Приміський, Л.Т. Мошковська, Є. Кряж // Стандартизація, сертифікація, якість (Prymiskiy V.P. Polumyano ionization method and analyzer measurement of hydrocarbons in the exhaust gases of the car. USSR: Certification and quality). — 2011. — № 3. — С/Р. 48—52.
11. Івасенко В.М. Сучасні засоби інструментального контролю (газоаналізатори і газоаналітичні системи) відпрацьованих газів автомобілів [Текст] / В.М. Івасенко, В.П. Приміський, Д.Г. Корнієнко, А.В. Ватаву, А.В. Жужа // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Нові рішення в сучасних технологіях (Ivasenko V.M. Modern tool control (gas analyzers and gas analysis systems) flue gas vehicles. USSR: Visnyk National Technical University «XPI». Ser.: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh). — 2012. — № 68. — С/Р. 135—141.
12. Рыжков В.Ф. Портативный пламенно-ионизационный газоанализатор [Текст] / В.Ф. Рыжков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (Ryzhkov V.F. Portable flame ionization gazoanalizator. USSR: Technology and design of electronic equipment). — 2004. — № 1. — С/Р. 27—29.
13. Пат. України № 49063 G01N 2762. Полум'яно-іонізаційний газоаналізатор для поста екологічного контролю автомобілів [Текст] / В.П. Приміський, В.О. Румбешта // Бюл. винаходів (Primiskiy V.P. Flame ionization analyzer for office environmental control car. USSR: Pat. Ukraine № 49 063 G01N 2762). — 2002, — № 9.
14. Приміський В.П. Заявка на винахід a201410822 G01 N 27/62 G. Полум'яно — іонізаційний газоаналізатор випаровувань палива / В.П. Приміський, А.В. Жужа, В.М. Івасенко: заявл. (Primiskiy V.P., Zhuzha A.V., Ivasenko V.M. Ardent — ionization analyzer fuel fumes. USSR: An application for an invention a201410822 G01 N 27/62 G). 08.10.2014.
15. Пат. України №51533 G01N 27/62. Швидкодійний полум'яно-іонізаційний газоаналізатор [Текст] / В.П. Приміський, А.В. Жужа, В.О. Румбешта // Бюл. винаходів (Primiskiy V.P. Instantaneous flame ionization analyzer. USSR: Pat. Ukraine №51533 G01N 27/62) — 2014, — № 13. 

Отримано / received: 26.03.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.Р. Козубовським (Україна).

Prof. V.R. Kozubovskyy, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 621.314

КОНТРОЛЬ МЕТРОЛОГІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ПЕРВИННИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕСТОВИХ ВПЛИВІВ

С. Кондрашов, професор, доктор технічних наук,
завідувач кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»,

М. Опришкіна, доцент кафедри,

О. Мацак, магістр,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Стаття присвячена вирішенню задачі підвищення точності вимірювання електричних вимірювальних перетворювачів з нелінійними дробово-раціональними функціями перетворення засобами вбудованого тестового контролю.

Проведено аналіз лінеаризувальних і стабілізувальних властивостей реляційно-різницевих операторів корекції вхідних сигналів для таких перетворювачів. Розглянуто оператори корекції для датчиків з нелінійними функціями перетворення, що дозволяють користуватися результатами вимірювання вхідного сигналу. Запропоновано метод лінеаризації дробово-раціональної функції перетворення узагальненою гіперболою, що дозволяє вирішити задачу корекції та оцінити похибки нелінійності дробово-раціональних функцій перетворення. Розроблено інженерний метод визначення параметрів систем тестового контролю, який дозволяє за заданою точністю вимірювань отримати кількість необхідних розрядів АЦП.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the accuracy of measurement of electrical measuring converters with non-linear transfer functions by means of built-in test control.

Not demount test control allows to measure the actual values of the input signals controlled mea-

suring instruments without removing it from the site of operation and stop the operation of the process through the introduction of test inputs.

The work was further developed the theory of test methods to improve the accuracy concerning electric measuring converters that have a non-linear polynomial and rational functions of transformation. The linearizing and stabilizing properties of the relational-difference operators correcting input was analysed.

It is proved that the operators can obtain an estimate of the correction input signal of the formation test additive effects of two types of the same size and opposite signs or identical sign, but different magnitude. Found that the multiplicative and combined tests do not allow to determine the estimation of the actual value of the input signal. We propose a method of quasi-linearization a rational transfer function of a generalized hyperbole that can solve the problem of error correction and assess the nonlinearity.

Designed engineering method of determining the parameters of test control systems, which allows us to solve the problem of synthesis and analysis of test control systems: by the specified accuracy of measurements to obtain the necessary number of ADC bits, or to solve the inverse is more often encountered in practice, the problem and calculate the accuracy of the system for a given bit ADC.

Ключові слова: електричні вимірювальні перетворювачі, методи підвищення точності, тестовий контроль, дробово-раціональна функція перетворення, метрологічні характеристики, реляційно-різницеві моделі операторів корекції, похибка нелінійності.

Keywords: electrical measuring converters (EMC), methods to improve the accuracy, test control, fraction of a rational function transformation (FRFT), metrological characteristics, relational-differential operators correction model, the error nonlinearity.

У практиці вимірювань електричних величин широкого застосування отримали первинні електричні вимірювальні перетворювачі (ЕВП) з вихідними сигналами генераторного та параметричного типів. Зручність опрацювання вихідних сигналів опору, напруги, термоелектрорушійної сили, струму в кодових сигналах зумовила широке поширення таких ЕВП у складі інформаційно-вимірювальних систем.

У процесі довготривалої експлуатації на технологічних об'єктах на точнісні характеристики ЕВП впливають як зовнішні, так і внутрішні дестабілізуювальні чинники. Виникає проблема втрати інформації, зниження рівня її достовірності внаслідок



С. Кондрашов



М. Опришкіна



О. Мацак

Використання змішаних та мультиплікативних тестів не призводять до появи РРМ та не дозволяють виключити адитивну похибку вимірювання. Із результувальної похибки зникає лише мультиплікативна складова [3–6].

Це має велике практичне значення для приладів, у яких неможливо сформувати мультиплікативні тести.

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЛЯЦІЙНО-РІЗНИЦЕВИХ МОДЕЛЕЙ ОПЕРАТОРІВ КОРЕКЦІЇ ПОХИБОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З НЕЛІНІЙНОЮ ДРОБОВО-РАЦІОНАЛЬНОЮ ФУНКЦІЄЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Нормативні документи у сфері метрології передбачають завдання для будь-якого типу засобу вимірювання математичної приписаної моделі у виді номінальної функції перетворення f_H :

$$f_H = f(a_{0H}, a_{1H}, \dots) = a_0 + \frac{a_{1H}}{x_H} + \frac{a_{2H}}{x_H^2} + \dots = \sum_{i=0}^n \frac{a_{iH}}{x_H^i} = \sum_{i=0}^n a_{iH} x_H^{-i},$$

де a_{0H}, a_{1H} — параметри номінальної моделі.

Реальна функція перетворення нам не відома, але можна вважати відомою її реальну модель f_P , якщо задано вид моделі та відомі її параметри:

$$f_P = f(a_{0P}, a_{1P}, \dots) = a_0 + \frac{a_{1P}}{x_P} + \frac{a_{2P}}{x_P^2} + \dots = \sum_{i=0}^n \frac{a_{iP}}{x_P^i} = \sum_{i=0}^n a_{iP} x_P^{-i}.$$

У [7] уведено поняття оператора корекції. Реляційно-різницевою моделлю оператора корекції РРМ вхідного сигналу ЕВП називають безрозмірний коефіцієнт ψ_R , значення якого обчислюються через різницеві величини першого, другого або і вищих порядків у ході вимірювального експерименту, який визначає співвідношення значення оцінки вхідного сигналу x і міри x_M

$$\frac{\hat{x}}{x_M} = \psi_R = \psi_R(\Delta^{(1)} y_i, \Delta^{(2)} y_j, \dots, \Delta^{(n)} y_k). \quad (4)$$

Для виключення впливу адитивної складової систематичної похибки переписемо систему рівнянь (2) у різницевій формі з урахуванням результату основного вимірювання (1):

$$\begin{cases} \Delta y_{10} = y_1 - y_0 = a_1 \{ [L_1(x)]^{-1} - x^{-1} \} + \dots + a_n \{ [L_1(x)]^{-n} - x^{-n} \}; \\ \Delta y_{20} = y_2 - y_0 = a_1 \{ [L_2(x)]^{-1} - x^{-1} \} + \dots + a_n \{ [L_2(x)]^{-n} - x^{-n} \}; \\ \dots \\ \Delta y_{n0} = y_n - y_0 = a_1 \{ [L_n(x)]^{-1} - x^{-1} \} + \dots + a_n \{ [L_n(x)]^{-n} - x^{-n} \}. \end{cases}$$

Квазілінеаризована математична модель НФП матиме вид:

$$\Delta y_{10} = a_1 \{ [L_1(x)]^{-1} - x^{-1} \},$$

$$\Delta y_{20} = a_1 \{ [L_2(x)]^{-1} - x^{-1} \}.$$

Для виключення впливу мультиплікативної складової систематичної похибки отримано реляційно-різницеву модель [7–10]:

$$\psi = \frac{\Delta y_{20}}{\Delta y_{10}} = \frac{[L_2(x)]^{-1} - x^{-1}}{[L_1(x)]^{-1} - x^{-1}}.$$

У табл. 1 зведено оператори корекції для різних видів ДРФП та тестових впливів.

Переписемо (3) для тестової номінальної ($\delta_a, \delta_m = 0$) та реальної ($\delta_a, \delta_m \neq 0$) РРМ:

$$x_H = \theta \frac{\Delta y_{20H} - \Delta y_{10H}}{\Delta y_{20H} + \Delta y_{10H}} = \theta \cdot \psi_H^*.$$

$$x_P = \theta \frac{\Delta y_{20P} - \Delta y_{10P}}{\Delta y_{20P} + \Delta y_{10P}} = \theta \cdot \psi_P^*.$$

Тоді,

$$\psi_R = \frac{x_P}{x_H} = \frac{\psi_P^*}{\psi_H^*}.$$

Отже, оцінку дійсного (номінального) значення вхідного сигналу x можна отримати за допомогою реляційного оператора корекції ψ_R :

$$x_H = \hat{x} = \frac{x_P}{\psi_R}.$$

У випадку, коли $\psi_R = 1$, $x_P = x_H$.

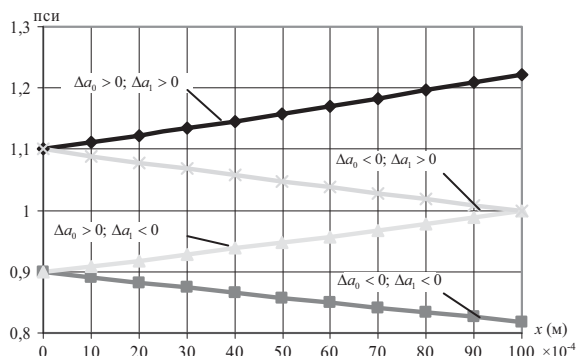
Із формули (4) видно, що оператор корекції ψ_R є багатопараметровою функцією значення похибок ЕВП для номінального вхідного сигналу x_H [8, 9]

$\psi_R = \psi_R(a_{0H}, a_{1H}); (\Delta a_{0H}, \Delta a_{1H}); \delta\theta; x_H$, де a_{1H} — номінальна чутливість ЕВП у точці шкали x_H ; $\Delta a_{0H}, \Delta a_{1H}$ — абсолютні значення адитивної і мультиплікативної похибки; $\delta\theta$ — відносна похибка формування тестових впливів; $x_H = f_H^{-1}(y_0)$ — розрахункове значення вхідного сигналу ЕВП для номінальної моделі ФП; y_0 — вимірене значення вихідного сигналу ЕВП.

Щоби визначити структуру оператора корекції ψ для нелінійних дробово-раціональних функцій перетворення та провести його функціональний аналіз, запишемо реальну і номінальну функції перетворення вимірювального перетворювача з ДРФ та знайдемо значення вхідного сигналу ЕВП з ДРФ:

$$\begin{cases} y_P = a_{0P} + \frac{a_{1P}}{x_P}, & \begin{cases} x_H = f_H^{-1}(y_H) = \frac{a_{1H}}{y_H - a_{0H}}, \\ x_P = f_P^{-1}(y_P) = \frac{a_{1P}}{y_P - a_{0P}}. \end{cases} \end{cases}$$

Оператор ψ є відношенням реального і номінального значень вхідних сигналів, отже, враховуючи,

Рис. 2. Визначення метрологічних характеристик ψ_R Fig. 2. The determination of metrological characteristics ψ_R

Функція ψ залежить від зміни адитивної Δa_0 і мультиплікативної Δa_1 складових похибок. Аналіз отриманих функцій ψ показує, що значення PPM оператора корекції близьке до одиниці.

Аналіз отриманих функцій ψ підтверджує, що значення PPM оператора корекції близьке до одиниці. Його зміна зумовлена зміною адитивної та мультиплікативної складових похибки. Відносні відхилення значення ψ мають порядок відносних значень δa_0 та δa_1 . Коефіцієнт ψ змінюється у діапазоні $\psi \in [0,9976; 1,0024]$ для похибок на рівні 0,1 %. Для похибок у 1 % цей діапазон значно ширший: $\psi \in [0,98; 1,02]$. А для похибок порядку 10 % діапазон варіювання становить: $\psi \in [0,8; 1,25]$.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ

Для вирішення цієї задачі проведено оцінку похибки непрямих вимірювань за нелінійних залежностей [10, 11].

Оскільки функція оператора корекції (5) є нелінійною, для оцінки її похибки запропоновано використати метод лінеаризації, що передбачає розкладання в ряд Тейлора. На практиці залишковим членом ряду R нехтують, як правило, без перевірки умови:

$$R \leq 0,8 \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \Delta y_{ij}^2} \left(\Delta(\Delta y_{ij}) \right)^2}.$$

Але у системах тестового контролю ця перевірка стає необхідною, оскільки значення вимірюваного вихідного електричного сигналу є на порядок більшим, ніж значення різниць Δy_{ij} . Також, за використання різницевої величини підсилюється вплив випадкової похибки. У найгіршому випадку ця складова похибки подвоюється. Випадкові похибки вимірювання різниць сигналів дорівнюють кроку квантування $\Delta(\Delta y_{01}) = \Delta(\Delta y_{20}) = q$ засобу вимірювання, отже

$$\frac{q(\beta+1)(1+\psi)}{\Delta y_{01}(\psi-\beta)} \leq 0,8 \frac{1}{\sqrt{6k}} \sqrt{1+\psi^2}, \quad (6)$$

де k — кількість додаткових вимірювань для забезпечення заданої точності контролю.

Ураховуючи, що крок квантування ЗВ дорівнює $q = Y_{\max} / (2^n - 1) \cong Y_{\max} / 2^n$ (6) матиме вид:

$$\frac{1}{2^n} D_y D_{\Delta y} \frac{(\beta+1)(1+\psi)}{(\psi-\beta)} \leq 0,8 \frac{1}{\sqrt{6k}} \sqrt{1+\psi^2},$$

де $D_y = Y_{\max} / Y$ — динамічний діапазон значення вхідного сигналу ЕВП; $D_{\Delta y} = Y / \Delta y_{01}$ — динамічний діапазон значення тестового впливу.

У роботі отримано розрахункову формулу для знаходження числа розрядів n АЦП ЗВ, яке забезпечує необхідну точність системи тестового контролю:

$$n = \log_2 \frac{1,6 D_y D_{\Delta y} (\beta+1) \sqrt{1+\psi^2}}{\delta x_p \sqrt{6k} (\psi-\beta)(\psi+1)},$$

та константу для заданої різницевої моделі оператора корекції

$$C = \delta x_p \cdot k = 0,213 \cdot (1+\psi^2) / (1+\psi)^2.$$

Константа C дозволяє за заданої похибки вимірювання δx_p визначити кількість додаткових вимірювань k , необхідних для забезпечення точності контролю δx_p . Для того, щоб підвищити точність системи тестового контролю, слід мінімізувати константу моделі C . Аналізуючи отримані дані, зроблено висновок, що значення C залежить від відношення тестів $\gamma = \theta_1 / \theta_2$, або $\beta = \theta_2 / \theta_1$.

На основі проведених розрахунків побудовано графічні залежності (рис. 3) та запропоновано метод визначення параметрів систем тестового контролю.

Для визначення параметрів систем тестового контролю запропоновано виконати такі операції:

- визначити модель оператора корекції;
- задати необхідну точність за шкалою $-\lg \delta x_p$ (наприклад, 3);
- зі знайденої точки провести перпендикуляр до кривої, що відповідає константі моделі C ;
- визначити відповідну кількість додаткових вимірювань k на шкалі $\lg k$, яка забезпечить задану точність вимірювання;
- перейти за лініями кількості вимірювань до кривої, що визначає розрядність АЦП;
- визначити число розрядів n , що забезпечить задану точність вимірювання.

Так, наприклад, за заданої похибки вимірювання $\delta x_p = 0,001$ ($-\lg \delta x_p = 3$) кількість розрядів АЦП становить $n = 12,55 \approx 12-13$.

На практиці виникає зворотна задача аналізу точності системи тестового контролю. За заданих

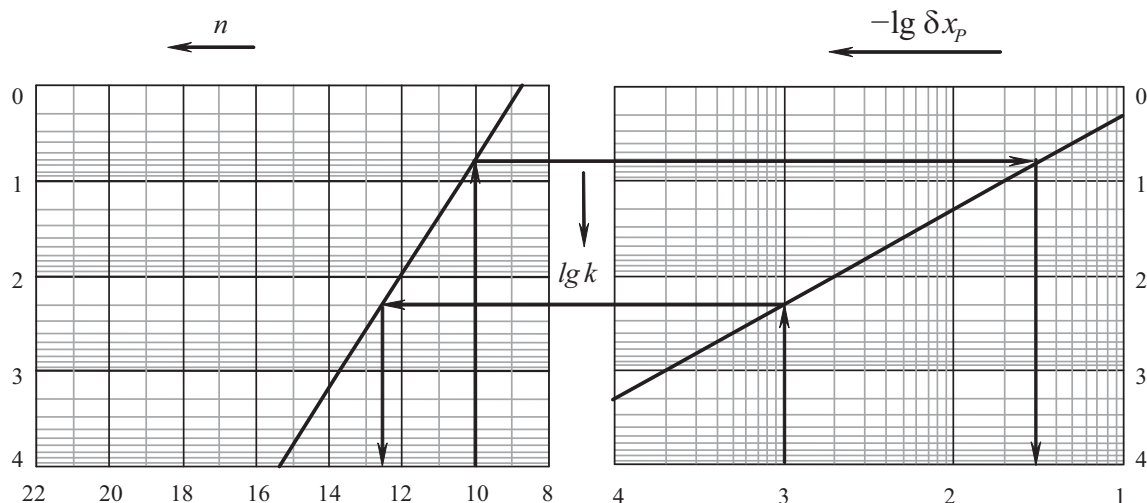


Рис. 3. Функціональні залежності для розрахунку параметрів системи тестового контролю

Fig. 3. The functional depends for test control system parameters

параметрів розрядності АЦП потрібно визначити кількість додаткових вимірювань k та точність системи контролю.

Схему послідовності дій показано на рис. 3 стрілками в напрямку, зворотному до прямої задачі.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНЕАРИЗУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОПЕРАТОРА КОРЕКЦІЇ ψ ДЛЯ ДРОБОВО-РАЦІОНАЛЬНИХ ФП. ОЦІНКА ПОХИБКИ НЕЛІНІЙНОСТІ

Для оцінки похибки нелінійності коефіцієнта корекції ψ ДРФП отримано формулу [12]

$$\psi = \frac{1 + \frac{x}{\theta_1}}{1 - \frac{x}{\theta_2}} (1 + \delta_H),$$

де δ_H — похибка нелінійності.

Остання формула вказує на ефект зменшення похибки нелінійності, що відбувається за умови $\delta_H \ll 1$. Так, наприклад, для значень $x \leq 0,1 \cdot a_1$, $y \geq 11 \cdot a_0$ — це діапазон максимальних чутливостей. Мінімальне значення x визначається технологічними вимогами на границі зони контролю.

За проведеними розрахунками розроблено метод аналізу похибок нелінійності операторів корекції різних структур:

1. Вибираємо модель узагальненого оператора корекції (табл. 1), наприклад, $\psi^*_1(\psi_1, \theta_1, \beta)$; $\beta = |\theta_2/\theta_1|$

для ДРФП $y = a_0 + a_1/x_{-\theta_2}^{+\theta_1}$: $\psi^*_1 = -\frac{2\psi_1}{\psi_1(\beta-1)-(1+\beta)}$.

2. Визначаємо диференційний коефіцієнт чутливості узагальненого оператора ψ^*_1 відносно оператора ψ^* :

$$\frac{\partial \psi^*_1}{\partial \psi_1} = \frac{2(1+\beta)}{[\psi_1(\beta-1)-(1+\beta)]^2}. \quad (7)$$

3. Оскільки оператор ψ^* сам є функцією відносно оператора $\psi_1 = \Delta y_{20}/\Delta y_{10}$, визначаємо

$$\Delta_{\text{нел.}} \psi^*_1(\psi_1, \theta_1, \beta) = \frac{\partial \psi^*}{\partial \psi^*_1} \Delta_{\text{нел.}} \psi_1$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial \psi} = \frac{2}{(\psi+1)^2}. \quad (8)$$

4. Обчислюємо значення оператора корекції:

$$\psi = \left\{ \theta_2(x + \theta_1) \left[\frac{1}{\theta_2} + \frac{2x - \theta_2}{\theta_1 x(x - \theta_2)} \right] \right\} /$$

$$/ \left\{ \theta_1(x - \theta_2) \left[\frac{1}{\theta_2} + \frac{2x + \theta_1}{\theta_1 x(x + \theta_1)} \right] \right\}. \quad (9)$$

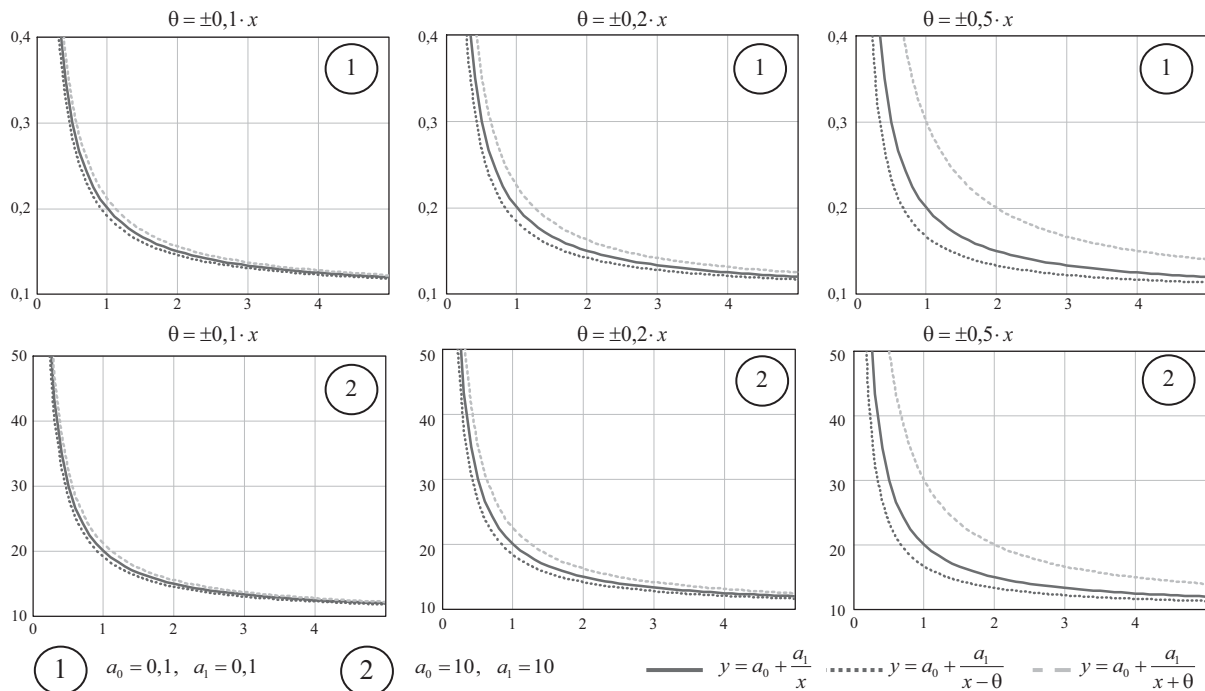
5. Отримуємо оператор для цієї моделі, що дозволить оцінити похибку нелінійності. Для цього необхідно (9) підставити у формулу похідної (8), а отриманий результат дасть змогу визначити диференційний коефіцієнт чутливості (7).

Для дослідження лінеаризувальних властивостей РРМ для ДРФП запропоновано оцінювати окремо дві складові похибки нелінійності [12]:

- перша виникає за рахунок того, що вид функції перетворення відрізняється від «ідеальної» гіперболи $y = a_0 + a_1/x$;

- друга є наслідком нелінійності самого оператора корекції ψ , який є результатом ділення.

Перша складова. Під час проектування пристроїв, що мають у своєму складі ЕВП з ДРФП, як правило, приймаються припущення, що ФП має «ідеальний» характер і майже не відрізняється від $y = a_0 + a_1/x$. Але за реальних умов експлуатації, завдяки впливу зовнішнього середовища, чинників старіння

Рис. 4. Оцінка похибки нелінійності коефіцієнта ψ Fig. 4. The estimate of the error nonlinearity for coefficient ψ

тощо, ФП може змінюватися і суттєво відрізнятися від номінальної (приписаної). Припустимо, що реальна функція відрізняється від номінальної на квадратичний a_2/x^2 та кубічний a_3/x^3 доданки. Також у процесі експлуатації можуть змінюватися коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 , a_3 .

Зважаючи на це припущення, у роботі отримано графіки, з яких зроблено висновки: зміна коефіцієнта a_0 не впливає на вид нелінійності функції, а лише зміщує криву вздовж осі y ; чим ближче значення коефіцієнта a_1 до максимального рівня вхідного сигналу, тим менше відрізняється реальна функція перетворення від номінальної. Це відбувається незалежно від кількості доданків.

Друга складова. Виникає за рахунок нелінійності оператора корекції ψ . Оцінити цю складову похибки пропонуємо за допомогою розкладання функції перетворення у ряд Тейлора:

$$f(x + \theta) = f(x) + \frac{\theta}{1!} f'(x) + \dots + \frac{\theta^{n-1}}{(n-1)!} f^{(n-1)}(x).$$

Усі доданки розкладання, починаючи з третього, характеризують похибку нелінійності. Для спрощення розрахунків обмежуємо кількість членів розкладання квадратичним доданком.

Отримуємо реляційно-різницевий оператор корекції: $\psi = \Delta y_{20} / \Delta y_{10}$.

$$\psi = \frac{\theta_2}{\theta_1} \left(\frac{1 + \theta_2/x}{\theta_1/x - 1} \right). \quad (10)$$

Формула (10) дозволяє оцінити похибку неліній-

ності різницево-реляційного оператора корекції ψ .

Із графіків (рис. 4) зроблено висновок, що, незалежно від кількості доданків ДРФП та величини коефіцієнтів a_i , значення тестових впливів, для зменшення похибки нелінійності, необхідно вибирати якомога меншими відносно значень вимірюваних сигналів. Величина тесту обмежується можливостями блока формування тестів та розрядністю АЦП.

ВИСНОВКИ

Отже, представлено розв'язання науково-практичної задачі підвищення точності ЕВП шляхом тестових випробувань за бездемонтажного контролю в робочих режимах на основі використання теорії реляційно-різницевого оператора корекції. Вони дозволяють здійснювати тестовий контроль ЕВП одночасно з дією вхідного сигналу. Подальшого розвитку отримала теорія структурно-алгоритмічних методів підвищення точності, а саме, методів корекції результатів вимірювання ЕВП без зміни ФП шляхом визначення узагальнених функціональних реляційно-різницевого оператора корекції вхідних сигналів.

Доведено, що тестові методи підвищення точності для ЕВП з ДРФП дозволяють коригувати результати вимірювання вхідного сигналу лише за умови формування адитивних тестових впливів однакової величини, але різних за знаками або однакових за знаками, але різної величини. Мультиплікативні та змішані адитивні й мультиплікативні тести не до-

звояють визначити оцінку дійсного значення вхідного сигналу ЕВП.

Вирішено завдання синтезу системи контролю ЕВП з ДРФП за критерієм заданої точності. Розроблено інженерний метод визначення параметрів систем тестового контролю, що дозволяє за заданою точністю вимірювань отримати кількість необхідних розрядів АЦП або вирішити зворотну задачу і розрахувати точність системи за заданою розрядністю АЦП.

Розв'язано задачу оцінки похибок нелінійності для узагальнених моделей ДРФП за обмеження моделі першими двома членами ряду. Розроблено метод

оцінювання похибки нелінійності ДРФП. Ця похибка залежить від значень параметрів a_i ДРФП і співвідношення тестового впливу й сигналу $\gamma = \theta/x$. Метрологічні властивості оператора корекції обумовлюються значеннями похибок параметрів a_0 та a_1 ДРФП. Зменшення похибки нелінійності відбувається за умови $\delta_H \ll 1$. Так, наприклад, для значень $x \leq 0,1 \cdot a_1$, $y \geq 11 \cdot a_0$ — це діапазон максимальних чутливостей. Мінімальне значення x визначається технологічними вимогами на границі зони контролю. Для зменшення похибки нелінійності значення тестових впливів необхідно вибирати якомога меншими відносно значень вимірюваних вхідних сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Туз Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. — Киев: Вища школа (Tuz Yu.M. Structural methods to improve the accuracy of measuring devices / Yu.M. Tuz. — Kiev: Vishcha School), 1976 — 256 с/р.
2. Лиманова Н. И. Тестовый метод повышения точности измерений датчиков с нелинейными дробно-рациональными функциями преобразования. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика (Limanova N.I. The test method to improve the accuracy of measurement sensors with non-linear rational function transformation. // Devices and systems. Management, control, diagnostics). — 2000. — № 10. — С/Р. 28—31.
3. Кондрашов С. И., Опришкіна М. И. Реляційно-різницевої моделі операторів корекції вимірювальних перетворювачів з дробово-раціональними функціями перетворення. Вестник НТУ «ХПИ». — Харьков. (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Relational-difference correction operators models measuring transducers with fractional rational functions transformation. Vestnik NTU «KPI». — Kharkov). — 2005. — № 7. — С/Р. 77—80.
4. Кондрашов С. И., Опришкіна М. И. Тестовые методы исключения систематических погрешностей из результатов измерений. Сборник научных трудов по материалам 2-го международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития МРФ-2005» Т. VII. — Харьков (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Test method exception of systematic errors from the measurement results. Collection of scientific papers based on the 2nd International Forum «Applied electronics. Status and prospects of MRF-2005» T. VII. — Kharkov). — 2005. — С/Р. 87—90.
5. Кондрашов С.И., Опришкіна М.И. Реперные реляционно-разностные модели в задачах коррекции систематических погрешностей. Сборник научных трудов по материалам 2-го международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития МРФ-2005» Т. VII. — Харьков (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Fiducial relational-difference model in the correction of systematic errors. Collection of scientific papers based on the 2nd International Forum «Applied electronics. Status and prospects of MRF-2005» T. VII. — Kharkov). — 2005. — С/Р. 102—105.
6. Кондрашов С.И., Опришкіна М.И. Тестовий метод підвищення точності електричних вимірювальних перетворювачів з нелінійними дробово-раціональними функціями перетворення. «Український метрологічний журнал». — Харків (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Test method to improve the accuracy of electrical measuring transducers with non-linear fractional transformation of rational functions. «Ukrainian Journal of Metrology». — Kharkov). — 2009. № 2. С/Р. 51—56.
7. Кондрашов С.И. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах тестових впливів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05. 11. 05 / С.И. Кондрашов. — Харків (Kondrashov S.I. Improving the accuracy of measuring transducers with the formation of the real world impact test: Abstract. Thesis. for obtaining sciences. degree of Dr. Sc. sciences specials. 05. 11. 05 / S.I. Kondrashov. Harkov), 2004. — 38 с/р.
8. Кондрашов С.И., Опришкіна М.И. Функціональний аналіз РРМ оператора корекції похибок ЕВП з нелінійною дробово-раціональною функцією перетворення. Наук. праці В МНТК «Метрологія та вимірювальна техніка» (Метрологія-2006). Т. 2. — Харків: ННЦ «Інститут метрології» (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Functional analysis of PPM operator error correction ERP with nonlinear fractional rational function transformation. Science. Labour V IRTC «Metrology and Measuring

- Equipment» (Metrology 2006). Т. 2. — Kharkov: NNU «Institute of Metrology», 2006. — С/Р. 368—371.
9. Кондрашов С.І., Скрипник Ю.О., Опришкіна М.І. Лінеаризація оператора корекції похибок вимірювального перетворювача методом гіпербол. VI МНТК «Метрологія та вимірювальна техніка» (Метрологія-2008). — Харків (Kondrashov S.I., Skrypnyuk Y.O., Oprishkina M.I. Linearizatsiya operator korektsii pohibok vimiryuvalnogo Peretvoriuvach method giperbol. VI IRTC «Metrologiya that vimiryuvalna tehnika» (Metrologiya 2008). — Kharkiv). — 2008. Т. 2. — С/Р. 297—300.
 10. Кондрашов С.І., Опришкіна М.І. Метод визначення параметрів систем тестового контролю вимірювальних перетворювачів з дробово-раціональними функціями перетворення. «Український метрологічний журнал». — Харків (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Method of determining the parameters of the test control measuring transducers with fractional rational functions transformation. «Ukrainian Journal of Metrology». — Kharkov). — 2010. № 1. — С/Р. 55—60.
 11. МИ 2083-90. Государственная система обеспечения единства измерений. Рекомендация. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценка их погрешностей (МИ 2083-90. State system for ensuring the uniformity of measurements. Recommendation. Indirect measurement. Determination of measurement results and evaluation of their errors).
 12. Кондрашов С.І., Опришкіна М.І. Оцінка похибки нелінійності при тестовому контролі. Вісник НТУ «ХПИ». — Харків (Kondrashov S.I., Opryshkina M.I. Nonlinearity error of assessment in test control. Proceedings of the NTU «KPI». — Kharkov), 2011. — № 11. — С/Р. 72—75. ■

Отримано / received: 09.12.2014.

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.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ТЕХНОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ
РЕДАКЦІЯ МІЖНАРОДНОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ЖУРНАЛУ «ВОТТІП»
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О.С.ПОПОВА
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РЕДАКЦІЯ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ВІСНИК ХНУ»
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МОРДОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. Н.П. ОГАРЬОВА (Саранск, Росія)
ВИДАВНИЦТВО «ТЕХНОСФЕРА» (Москва),
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ «ФОТОНІКА»**

**ТОМСЬКА ГРУПА
ВІДДІЛЕННЯ ІНСТИТУТУ ІНЖЕНЕРІВ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ та РАДІОЕЛЕКТРОНИКИ (Томськ, Росія)**



**ЧОТИРНАДЦЯТА
Міжнародна науково-технічна конференція
ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ
(ВОТТІП-14-2015)
м.Одеса (Затока) 5—10 червня 2015 р.**

Голова організаційно-програмного комітету МНТК ВОТТІП 14-2015 П.П. Воробієнко, проф., д.т.н., член-кор. НАПН України, ректор ОНАЗ ім. Попова.
Заступник голови І.В. Троцишин, академік УТА, академік МАІТ, проф., д.т.н, головний редактор МНТЖ «ВОТТІП».

На конференції працюватимуть секції:

1. Загальні питання метрології та вимірювальної техніки;
2. Оптичні та фізико-хімічні вимірювання;
3. Електричні та радіотехнічні вимірювання;
4. Інформаційно-вимірювальні та обчислювальні системи і комплекси в технологічних процесах;
5. Біомедичні вимірювання і технології;
6. Обмін досвідом та технологіями;
7. Телекомунікаційні та інформаційні технології;
8. Прецизійні вимірювання та новітні технології.

За матеріалами конференції буде видано збірник тез доповідей до початку її роботи.

Доповіді, оформлені як наукові статті та рекомендовані оргкомітетом до опублікування, за результатами роботи конференції включатимуться до друку в міжнародному науково-технічному журналі «ВОТТІП» та наукових журналах «Вісник ХНУ», «Цифрові технології» (РИНЦ).

**Адреса оргкомітету: 65029, м. Одеса, вул. Ковалевського, 5, ОНАЗ, к.494,
тел: 097-684-34-29,
e-mail: vottp.tiv@gmail.com**

УДК 389.64:536.5.51



Н. Гоц, доктор технічних наук, доцент кафедри метрології, стандартизації та сертифікації, Національний університет «Львівська політехніка»

Представлено огляд методів удосконалення системи метрологічного забезпечення (МЗ) термометрії за інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням. Запропоновано методологію розвитку системи МЗ термометрії за випромінюванням. Розроблено метод передавання температурної шкали термометрам ІЧ випромінювання на основі закону випромінювання Планка. Обґрунтовано доцільність упровадження багатосмугових методів вимірювання температури за випромінюванням термометрами ІЧ випромінювання. Розроблено критерії формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінювання. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення системи нормативного забезпечення термометрії за випромінюванням та формування сучасної термінології цього виду вимірювань.

This paper is devoted to the development of metrological assurance for infrared radiation thermometry. A methodology for system development of metrological assurance system for radiation thermometry is proposed. The method of the temperature scale realization to thermometers of infrared radiation according to the Planck radiation law is developed. The expediency of introducing multiband methods for measuring the temperature of infrared radiation thermometer is justified, generalized models of the thermodynamic temperature by different methods are formed. Criteria of spectral channels of multi-channel radiation thermometer are elaborated. Recommendations are elaborated concerning the improvement of the regulatory assurance for radiation thermometry and the formation of modern terminology of this measurement type.

Ключові слова: система метрологічного забезпечення, термометрія за ІЧ випромінюванням, термометр випромінювання.
Keywords: metrological assurance, infrared radiation thermometry, radiation thermometer.

Останніми десятиліттями термометрія за випромінюванням (ТВ) досягла значного прогресу. Висока швидкодія, низьке значення основної похибки, можливість реалізації вимірювань температури складнодоступних та рухомих об'єктів, в агресивному середовищі та під високим електричним потенціалом зробили термометри випромінювання (ТМВ) конкурентоспроможними до контактних термометрів [1].

Разом із тим, застосування в ТМВ сучасних приймачів випромінювання з високими технічними можливостями, структурних методів підвищення точності та мікропроцесорної техніки дали потужний поштовх розвитку термометрії за інфрачервоним випромінюванням в діапазоні температур від -50 до $+1500$ °С. Кількість модифікацій термометрів ІЧ випромінювання, які працюють у спектральному діапазоні від 1 до 14 мкм та застосовуються в металургії, електроенергетиці, транспортних технологіях, військовій техніці та електронній промисловості зростає. Знаними світовими виробниками є фірми «Raytek», «Land» та «Fluke», а вітчизняними — підприємства «Харківприлад» та «Термоприлад».

Але значним недоліком ТВ в інфрачервоній області спектра залишається низька точність вимірювань температури. На точність вимірювання температури за ІЧ випромінюванням впливає не лише такий загальновідомий факт, як методична похибка процесу вимірювання, але й ряд інших чинників. Наявне метрологічне забезпечення ТВ розроблено переважно для візуальної термометрії. На сьогодні найбільш розвиненими є засоби та методи вимірювання температури від 1000 до 2500 °С у видимій області випромінювання, а саме: моделі візуальних пірометрів, методи передавання їм температурної шкали з використанням температурної лампи, монохроматичні методи вимірювання,



калібрування, нормативне забезпечення тощо. Все це призвело до необхідності удосконалення окремих елементів метрологічного забезпечення цього виду вимірювань, оскільки наявні методи і засоби, які застосовуються для видимої області спектра, не відповідають вимогам термометрії за ІЧ випроміненням. Тому необхідним є вдосконалення системи МЗ ТВ для потреб термометрії за ІЧ випроміненням, а саме, наукової, технічної та нормативної основ МЗ ТВ.

Мета роботи — удосконалення метрологічного забезпечення термометрії за інфрачервоним випроміненням шляхом розроблення наукових підходів та методів, розвитку комплексу технічного та нормативного забезпечення термометрії за випроміненням на базі математичних методів опрацювання інформації та спеціальних технічних рішень. При цьому згідно з міжнародною метрологічною термінологією під поняттям метрологічне забезпечення розуміємо сукупність правил, технічних засобів та методів, застосування яких необхідне для забезпечення єдності результатів вимірювань у метрології [2].

Для реалізації поставленої мети нами виконано комплексний аналіз стану системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням та виявлено три основні проблеми, що стримують розвиток вимірювань температури за випроміненням (ВТВ) в ІЧ області спектра.

По-перше, точність передавання температурної шкали термометрам ІЧ випромінення залежить від методів та властивостей засобів передавання температурної шкали (ТШ), що згідно з МТШ-90 реалізується двома різними методами в двох температурних інтервалах: від 0 до 961,78 °C та від 961,78 до 2500 °C [3]. Передавання ТШ у температурному діапазоні від 0 до 961,78 °C ґрунтується на еталонних платинових термометрах опору (ПТО), як еталонах-переносниках ТШ, апаратурі для реалізації реперних точок у виді випромінювача типу абсолютно чорного тіла (АЧТ) та степеневому інтерполяційному рівнянні. Основними недоліками цього методу передавання температурної шкали для термометрів ІЧ випромінення (ТМІЧВ) є залежність температурної шкали від властивостей використаного еталонного ПТО; використання інтерполяційних рівнянь, які мають емпіричний характер; вплив на результати передавання ТШ неізотермічності порожнини випромінювача АЧТ. Передавання ТШ в діапазоні понад 961,78 °C відбувається за законом Планка через екстраполяцію на основних реперних точках з використанням температурної лампи як еталона-переносника ТШ та спектрокомпаратора. Основними недоліками цього методу передавання ТШ для ТМІЧВ є обмеженість спектраль-

ного пропускання випромінення температурною лампою лише до (1,5–2) мкм та необхідність урахування спектральної чутливості термометра випромінення, що на практиці є проблематичним. Оскільки ТШ передається цим методом на довжині хвилі 0,65 мкм, його доцільно використовувати лише для ТМВ, які працюють у видимій області спектра. Тому необхідно розробляти метод передавання ТШ для ТМІЧВ на основі первинної термометрії незалежно від властивостей речовин та засобів вимірювання.

По-друге, в промислових моделях ТМВ реалізуються методи з низькою точністю вимірювання температури. Аналіз наявних методів показав, що багатосмугові методи спрямовані на підвищення точності ВТВ за рахунок використання спектральної інформації стосовно значень температури, тому актуальним є впровадження таких термометрів у багатоканальних ТМІЧВ. Це вказує на доцільність розроблення технічних засад для реалізації багатосмугових методів багатоканальними ТМІЧВ [4–6].

По-третє, за результатами аналізу нормативного забезпечення ТВ встановлено невідповідність окремих положень нормативних документів міжнародним метрологічним вимогам. Ситуацію, яка склалася у сфері термінології термометрії за випроміненням, можна охарактеризувати так: використання нестандартизованих термінів та синонімів; відмінність змісту міжнародних та українських термінів; недостатнє врахування наукових положень під час формування термінів. Для розроблення методу передавання ТШ для ТМІЧВ на основі закону Планка потрібно також розроблення ряду методик. Отже, ці недоліки свідчать, що необхідно вдосконалювати нормативне забезпечення термометрії за випроміненням.

Для формування концепції вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за ІЧ випроміненням запропоновано модель удосконалення системи МЗ ТВ [7], яка розкриває залежність процесу вдосконалення останньої системи від її окремих елементів.

$$\left\{ \begin{array}{l} MZ = \bigcup_{i=1}^n E_i \\ E_i = e_{i1} \bigcup e_{i2} \dots \bigcup e_{ij} \\ u(MZ) = \bigcup_{i=1}^n [K_i u(E_i)] \\ \bigcup_{i=1}^n K_i = 1 \\ u(E_i) = \sqrt{\sum_{p=1}^P c_{ip}^2 u(e_{ip})^2 + 2^P \sum_{p=1}^1 \sum_{k=p+1}^P u(e_{ip}) u(e_{ik}) r(e_{ip}, e_{ik})} \\ u(E_i) \leq u_{ich}(E_i) \end{array} \right. \quad (1)$$

де MZ — вихідний стан системи МЗ ТВ; W — оператор системи, що визначає зв'язки між елементами

моделі; i — номер елемента системи МЗ ТВ; e_{ij} — j -та складова i -го елемента системи МЗ ТВ, а саме, засоби, методи та методики реалізації окремих елементів; $u(MZ)$ — стан системи МЗ ТВ; $u(E_i)$ — сумарна непевність i -го елемента системи МЗ ТВ; K_i — показники впливу окремих елементів МЗ на ефективність усієї системи; $u(E_i)$ — сумарна непевність i -го елемента системи МЗ ТВ; $r(E_i, E_m)$ — коефіцієнти взаємодії впливу непевностей елементів системи МЗ; c_{ij} — коефіцієнти впливу j -ї складової i -го елемента системи МЗ ТВ; $u(e_{ip}), u(e_{ik})$ — непевності окремих складових елементів МЗ ТВ; $r(e_{ip}, e_{ik})$ — коефіцієнт кореляції, який визначає взаємозалежність між елементами системи МЗ; p, k — складові елементів системи МЗ.

Запропонована модель показує, що зменшення непевності окремої складової МЗ ТВ зменшить непевність окремого елемента системи МЗ ТВ та як результат зменшить сумарну непевність вимірювання температури за випромінюванням загалом, що призведе до підвищення точності вимірювання температури за ІЧ випромінюванням. Удосконалення системи

МЗ ТВ для потреб термометрії за ІЧ випромінюванням реалізується за такими етапами: формування докладної структури системи МЗ ТВ з виділенням окремих елементів та їх складових; аналітичне дослідження елементів системи МЗ ТВ з позиції її застосування для термометрії за ІЧ випромінюванням; визначення окремих складових системи МЗ ТВ, що потребують удосконалення для потреб термометрії за ІЧ випромінюванням; дослідження сучасних тенденцій розвитку та визначення шляхів удосконалення кожної з цих складових системи МЗ ТВ; формування вимог щодо методів удосконалення складових МЗ ТВ; розроблення методів удосконалення складових системи МЗ ТВ для потреб термометрії за ІЧ випромінюванням.

На рис. 1 наведено основні напрями вдосконалення системи МЗ ТВ для потреб термометрії за ІЧ випромінюванням.

Для реалізації методу передавання ТШ для ТМГЧВ на засадах первинної термометрії запропоновано використати метод прямого передавання значень температури від еталонного випромінювача

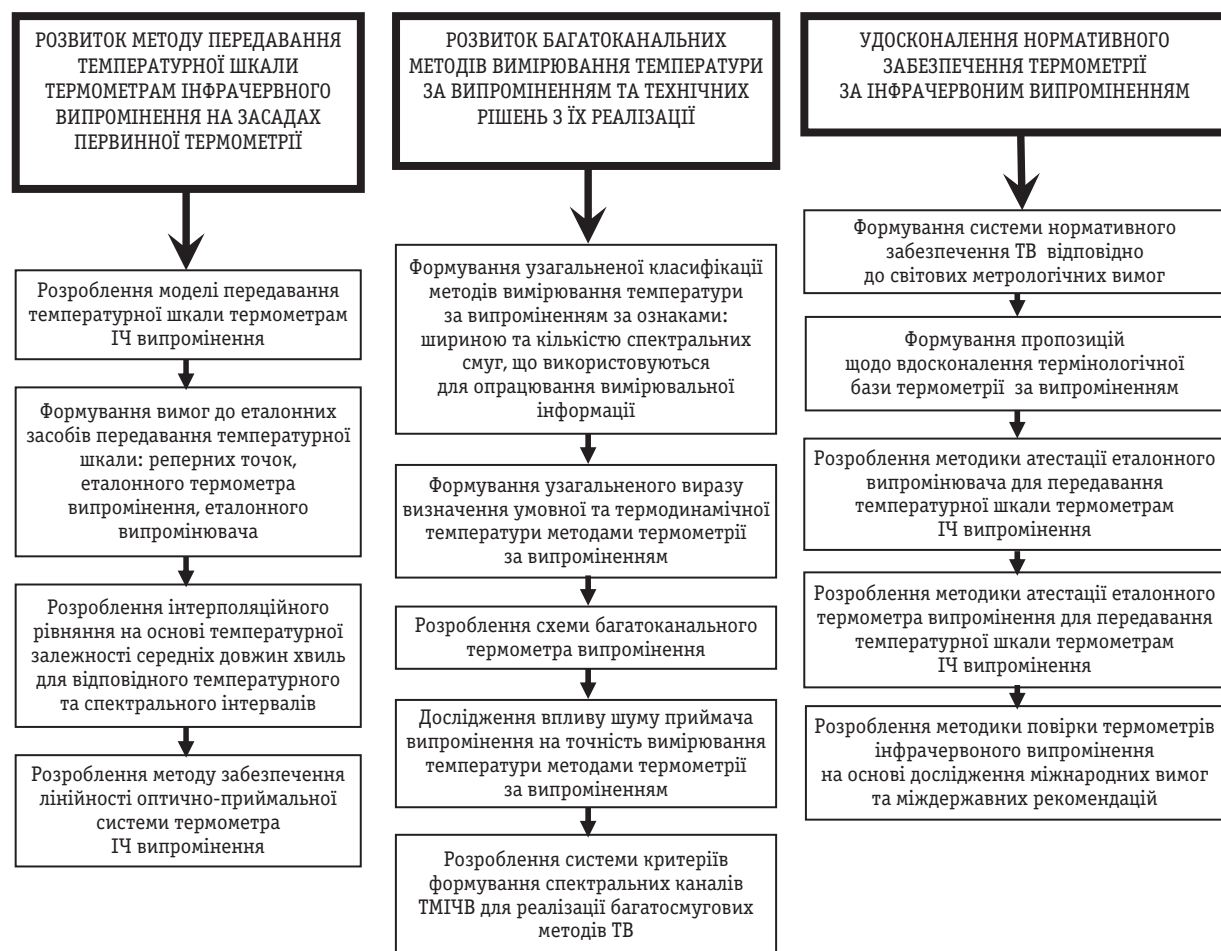


Рис. 1. Основні напрями вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випромінюванням для потреб термометрії за інфрачервоним випромінюванням

Fig.1. The main directions of improvement of metrological assurance for infrared radiation thermometry

до ТМІЧВ на основі закону випромінення Планка [8, 9]. Передавання ТШ робочому ТМІЧВ відбувається прирівнюванням значень температури еталонного випромінювача $T_{PACT i}$ та робочого ТМІЧВ $T_{PTB i}$. При цьому еталонний випромінювач атестується з використанням еталонного ТМІЧВ. Цей процес описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} S_{ETB}(\lambda, T_{PACT i}) = \int_{\lambda_{ETB}}^{\lambda_{PTB}} k \cdot R_{ETB}(\lambda) \cdot \varepsilon_{PACT}(\lambda, T) \cdot \Phi(\lambda, T_{PACT i}) d\lambda \\ T_{PACT i} = T_{ETB i} = T_{PTB i} \\ S_{PTB}(\lambda, T_{PACT i}) = \int_{\lambda_{PTB}}^{\lambda_{PTB}} k_{PTB} \cdot R_{PTB}(\lambda) \cdot \varepsilon_{PACT}(\lambda, T) \cdot \Phi(\lambda, T_{PACT i}) d\lambda \end{cases}, \quad (2)$$

де $S_{ETB}(\lambda, T_{PACT i})$ — вихідні сигнали еталонного термометра випромінення; $R_{PTB}(\lambda)$ — спектральна чутливість робочого ТМВ; ε_{PACT} — коефіцієнти випромінення еталонного регульованого випромінювача типу АЧТ, значення якого міститься в межах від 0,999 до 0,99997 згідно з вимогами CCT-WG5; k_{PTB} — коефіцієнт перетворення робочої моделі ТМІЧВ; $S_{PTB}(\lambda, T_{PACT i})$ — вихідний сигнал робочого ТМВ; $R_{PTB}(\lambda)$ — спектральна чутливість робочого ТМВ; $\lambda_{1PTB} \div \lambda_{2PTB}$ — робочий спектральний діапазон робочого ТМІЧВ; $\Phi(\lambda, T_{PACT i})$ — потік випромінення від еталонного випромінювача.

Відомі з високою точністю значення температури реперних точок послідовно передаються на еталонний ТМВ (ЕТМВ), еталонний регульований випромінювач типу АЧТ та робочий ТМІЧВ. Процес передавання ТШ відбувається за законом випромінення Планка незалежно від термометричних властивостей речовин та засобів вимірювання. При цьому значення сумарної непевності методу передавання ТШ не перевищує 0,54K, що в два рази менше від непевності передавання ТШ відомими методами.

Для реалізації передавання ТШ для ТМІЧВ на основі закону Планка в роботі обґрунтовано доцільність використання експоненціального інтерполяційного рівняння (ІР), яке враховує температурну залежність довжини хвилі $\lambda(T)$. Для побудови інтерполяційного рівняння запропоновано методику визначення температурної залежності середніх довжин хвиль для відповідного температурного та спектрального інтервалів. Для цього введено поняття інтерполяційної довжини хвилі (ІДХ) $\lambda_{int} = f(\lambda_{ci}, T_i)$ відповідного температурного та спектрального діапазону [10]. Це дозволяє монохроматизувати ІР, врахувати взаємну залежність температури та довжини хвилі випромінення, позбавляє необхідності обчислювати спектральну чутливість ТМВ.

Розроблено методику побудови ІР на основі інтерполяційної довжини хвилі, яка полягає у реалізації таких дій. Задаємо температурний $T_H - T_B$ і спектральний $\lambda_1 - \lambda_2$ інтервали, в яких проходять вимірювання, а також фіксовані значення температури T_1, \dots, T_n , які вибираємо з основних та додаткових реперних точок МТШ-90. Отримуємо значення вихідних сигналів $S(\lambda_i, T_i)$ ЕТМВ у фіксованих точках температури T_1, \dots, T_n . Із формули закону Планка у фіксованих точках температури T_1, \dots, T_n за значеннями вихідних сигналів $S(\lambda_i, T_i)$ обчислюємо значення середніх довжин хвиль λ_{ci} та будуємо температурну залежність середніх довжин хвилі $\lambda_{int}(T) = f(\lambda_{ci}(T))$. ІР ТШ та обернене ІР ТШ на основі закону Планка мають вид:

$$S_{int}(T) = \frac{C_1 \lambda_{int}(T)^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda_{int}(T) \cdot T}} - 1}, \quad T_i = \frac{C_2}{\lambda_{int}(T_i) \cdot \ln \left(\frac{C_1 \lambda_{int}(T_i)^{-5}}{S(T_i)} + 1 \right)}. \quad (3)$$

Результати моделювання ІР температурної шкали подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати моделювання ІР температурної шкали

Table 1. The simulation results of the temperature scale interpolation equation

Температурний діапазон, К	Спектральний діапазон, м · 10 ⁻⁶	Математичний вираз інтерполяційного рівняння	
		$S_{int}(T) = C_1 (A/T + B)^{-5} \cdot \left[\exp \left(\frac{C_2}{(A/T + B) \cdot T} \right) - 1 \right]^{-1}$	
692,677 ÷ 1235,000	1,0 ÷ 1,2	A=1,918·10 ⁻⁵	B=1,089·10 ⁻⁶
	1,3 ÷ 1,5	A=1,369·10 ⁻⁵	B=1,389·10 ⁻⁶
	1,5 ÷ 1,7	A=1,167·10 ⁻⁵	B=1,589·10 ⁻⁶
	1,8 ÷ 2,0	A=1,112·10 ⁻⁵	B=1,887·10 ⁻⁶
429,748 ÷ 692,677	3,0 ÷ 3,5	A=2,354·10 ⁻⁵	B=3,204·10 ⁻⁶
	3,5 ÷ 4,0	A=3,372·10 ⁻⁵	B=3,676·10 ⁻⁶
	4,0 ÷ 4,5	A=-1,132·10 ⁻⁴	B=4,494·10 ⁻⁶
	4,5 ÷ 5,0	A=-2,235·10 ⁻⁵	B=4,791·10 ⁻⁶
273,160 ÷ 429,748	8,0 ÷ 12,0	A=-2,262·10 ⁻⁴	B=1,073·10 ⁻⁵
	8,0 ÷ 14,0	A=1,146·10 ⁻³	B=8,121·10 ⁻⁶
	10,0 ÷ 12,0	A=2,066·10 ⁻⁴	B=1,048·10 ⁻⁵
	10,0 ÷ 14,0	A=2,928·10 ⁻⁴	B=1,121·10 ⁻⁵

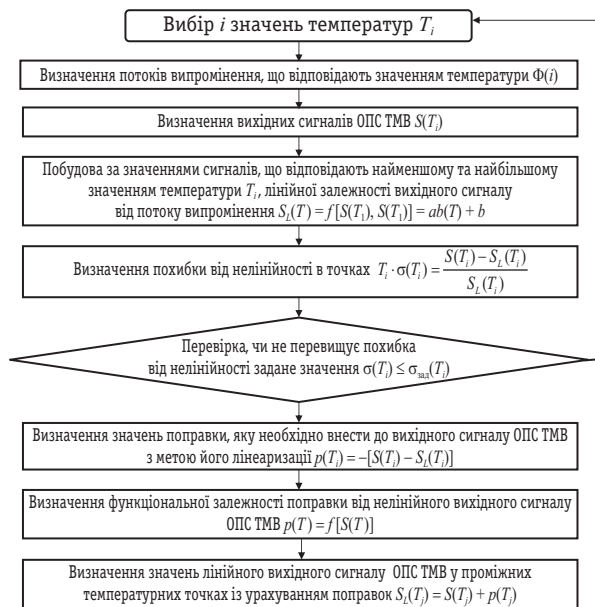


Рис. 2. Алгоритм реалізації методики забезпечення лінійності оптично-приймальної системи ЕТМВ на основі формування функції поправок

Fig. 2. Algorithm implementation methodology ensure linearity of the optical system of standard radiation thermometer

Для реалізації методу передавання ТШ для ТМГЧВ на основі закону Планка необхідно забезпечити лінійність функції перетворення оптично-приймальної системи (ОПС) ЕТМВ, а саме, лінійну залежність вихідного сигналу $S[T]$ від потоку випромінювання $\Phi[\lambda, T]$, що надходить на ОПС ЕТМВ. Розроблено методику, забезпечення лінійності ОПС ЕТМВ, яка ґрунтується на визначенні відхилень від лінійності функції перетворення ОПС у декількох фіксованих точках температури, побудові функціональної температурної залежності поправок на нелінійність з подальшим їх уведенням до вихідного сигналу. Алгоритм методики подано на рис. 2.

Для збільшення кількості фіксованих значень температури T , за якими проводиться контроль лінійності функції перетворення ОПС ТМВ, обрано методи визначення нелінійності останньої, засновані на виборі точок температури шляхом двократного послаблення потоку випромінювання, що надходить на цю систему, для вузькосмугового та широко-смугового сприйняття випромінювання. Застосування функції поправок на нелінійність дає змогу врахувати випадковий характер зміни в часі функції перетворення ОПС ЕТМВ та значення спектральної чутливості приймача випромінювання.

Отже, реалізація цих заходів дозволяє реалізувати передавання ТШ на принципах первинної термометрії, зробити ТШ незалежною від термометрич-

них властивостей речовин та матеріалів і підвищити точність її передавання термометрам ГЧ випромінювання, а відтак наблизити температурну шкалу до термодинамічної температурної шкали, підвищити точність вимірювання температури за випромінюванням загалом.

Розвиток вимірювання температури за випромінюванням триває шляхом розроблення багатосмугових методів. Нами запропоновано узагальнені математичні вирази умовної $T_{\text{ум}}$ та термодинамічної T температур різними методами ТВ:

$$T_{\text{ум}} = \frac{C_2}{\Lambda_{\text{ум}} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \ln(S_i))}, T = \frac{T_{\text{ум}} \cdot C_2}{C_2 - k_i T_{\text{ум}} \cdot \Lambda_{\text{ум}} \cdot \sum_{i=1}^n (\Phi_i \ln(\epsilon_i))}, \quad (4)$$

де a_i та b_i — коефіцієнти, які залежать від вибраного методу; i — кількість робочих спектральних каналів ТМВ; $\Lambda_{\text{ум}}$ — еквівалентна довжина хвилі відповідного методу; $k_i = \pm 1$ залежно від методу; S_i — вихідний сигнал.

Застосування цих узагальнених моделей уможливорює: одночасну реалізацію декількох методів ТВ за наявності у ТМВ декількох спектральних вимірювальних каналів; оптимальний вибір методу ТВ та алгоритму обчислення термодинамічної температури залежно від умов вимірювання та властивостей об'єкта; розроблення ТМВ з різними алгоритмами обчислення умовної та термодинамічної температур, коли переходити на різні методи ТВ можна, змінюючи коефіцієнт a_i , b_i , $\Lambda_{\text{ум}}$.

За результатами моделювання похибок вимірювання температури за випромінюванням різними методами встановлено таке. Максимальна кількість спектральних каналів ТМВ не може перевищувати чотирьох, інакше значення похибок ВТВ на окремих ділянках стрімко зростають. Збільшення кількості спектральних каналів веде до зменшення методичної складової, але зростає інструментальна складова похибки ВТВ, внаслідок чого необхідно створювати ТМВ з низьким значенням основної похибки — до 0,3%. Для конкретних температурних та спектральних діапазонів, умов вимірювання та властивостей об'єкта доцільно використовувати відповідні методи ТВ, що дасть змогу визначати температуру з вищою точністю. Реалізація багатосмугових методів ТВ потребує розроблення вимог для формування окремих спектральних каналів. Доцільно розробляти багатоканальні ТМВ, які можуть реалізовувати декілька методів ТВ. ТМВ може мати надлишкову кількість спектральних каналів. Оптимальний вибір методу ТВ та алгоритму обчислення здійснюється залежно від переваг їх використання за конкретних умов вимірювання, а перехід на різні методи ТВ відбувається зміною алгоритму обчислення, коефіцієнтів a_i , b_i , $\Lambda_{\text{ум}}$ виразу (4) та робочих спектральних каналів.

Для зменшення інструментальної похибки багатоканального ТМВ потрібно вибрати оптимальне співвідношення сигнал/шум приймачів випромінювання (ПВ) [11]. Для цього ми дослідили різні види шумів ПВ, які використовуються в ТМВ, вплив сигналу шуму S_N на точність визначення температури та сформували вирази співвідношення шуму та похибки ВТВ. З метою визначення впливу шуму на похибку ВТВ отримано вирази, що описують відносну похибку ВТВ різними методами ТВ. Узагальнений вираз залежності між заданою похибкою визначення температури δT_{30} , значеннями вихідних сигналів ПВ $S_i(T)$ та значеннями сигнал/шум $S_N R_i$ окремих ПВ для методів спектрального відношення ТВ має вид:

$$\delta T_{30} = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\prod_{i=1}^n S_i(T)^p \cdot \left[\prod_{i=1}^n ((S_N R_i + 1)^p) \cdot S_N R_i^p - 1 \right]}{T \cdot \partial \left(\prod_{i=1}^n S_i(T)^p \right) / \partial T} \quad (5)$$

за $p \in \{-1; 0; 1\}$.

Із рівняння (5) можна зробити висновок, що вплив шуму на результат ВТВ методами спектрального відношення буде мінімальним, якщо значення $S_N R$ окремих робочих спектральних каналів будуть близькі між собою за значеннями. За збільшення кількості спектральних каналів ТМВ вплив шуму на точність вимірювання температури зростає. Зазначені в літературі вимоги до відношення сигналу до шуму (3...5) дБ, у разі використання багатосмугових методів пірометрії не відповідають вимогам щодо точності ВТВ багатосмуговими методами. Отже, для реалізації багатосмугових методів у ТМВ необхідно використовувати ПВ зі співвідношенням сигнал/шум понад 10 дБ.

Концепція оптимального вибору параметрів робочих спектральних каналів ТМВ передбачає розроблення ряду критеріїв для реалізації багатосмугових методів ТВ. На основі проведеного аналізу похибок встановлено, що максимальна кількість робочих спектральних смуг ТМІЧВ не має перевищувати чотирьох [12]. Але можливе застосування і надлишку спектральних смуг з оптимальним їх вибором залежно від методу, який доцільніше використовувати за конкретних умов, та випромінювальних властивостей об'єкта. Запропоновано систему критеріїв для формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінювання.

Критерій формування сигналу окремого спектрального каналу: максимальне виявлення корисного сигналу випромінювання від об'єкта $S_i(\lambda_{ci}, T)$ на фоні шумів S_N ; забезпечення максимальної потужності сигналу відповідно до спектрального та температурного діапазонів вимірювання. Основна вимо-

га для реалізації цих критеріїв: ширина та розташування спектрального каналу ТМВ $\Delta \lambda_i = \lambda_{2i} - \lambda_{1i}$ мають забезпечувати сприйняття такої потужності випромінювання (за мінімального значення температури T_{\min} діапазону температур), щоби реалізувати задане співвідношення сигнал/шум, а саме:

$$\frac{S_i(\lambda_{ci}, T)}{S_N} = \frac{\int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} R(\lambda) \Phi(\lambda, T_{\min}) d\lambda}{S_N}, \text{ де } \frac{S_i(\lambda_{ci}, T)}{S_N} = f(\delta T_{30}). \quad (6)$$

Критерій взаємного розташування спектральних каналів: можливість розпізнавання сигналів окремих каналів за вимірювання температури T . Основні вимоги для його реалізації:

1. Для забезпечення співвідношення між сигналами окремих спектральних каналів необхідне рознесення функцій відгуку вихідних сигналів окремих спектральних каналів згідно з рівняннями:

$$S_1(\lambda_{c1}, T) < S_2(\lambda_{c2}, T) < S_i(\lambda_{ci}, T) \\ \text{або } S_1(\lambda_{c1}, T) > S_2(\lambda_{c2}, T) > S_i(\lambda_{ci}, T), \quad (7)$$

$$\Delta S_i(\lambda_{ci}, T) = S_i(\lambda_{ci}, T) - S_{i-1}(\lambda_{ci-1}, T) \geq 10 \cdot S_N. \quad (8)$$

При цьому функції відгуку спектральних каналів під час вимірювання температури T мають різнитися на величину, яка в декілька разів перевищує значення сигналу/шуму.

2. Співвідношення між шириною спектральних каналів $\Delta \lambda_i$ рекомендується вибирати за умовами: $\Delta \lambda_i = \text{const}$ — для видимої та близької ІЧ області спектра; $\Delta \lambda_i = \text{var}$ — для середньої та теплової ІЧ області спектра.

Критерій вибору спектральних каналів залежно від методу багатосмугової термометрії за випромінюванням: мінімальна похибка визначення температури. Для реалізації цього критерію сформульовано такі вимоги до вихідного сигналу ПВ:

1. Однозначність визначення температури багатоканальним методом ТВ за такою, що монотонно зростає або монотонно спадає, функцією перетворення відповідного методу ТВ $f(G)$ у відповідних температурному та спектральному діапазонах вимірювання, тобто:

$$T = f(G), \text{ де } G = F[S_i^p(\lambda_{ci}, T)] \text{ за } p \in \{-1; 0; 1\}. \quad (9)$$

2. Динаміка зміни параметра G має бути достатньою для реалізації обчислень, а значить перевищувати допустиме значення похибки визначення температури та одиниці молодшого розряду $\chi_{\text{доп}}$ засобу вимірювання $dG / dT \geq \chi_{\text{доп}}$.

3. Забезпечення ефективних значень довжин хвиль спектральних каналів ТМВ такими, щоб еквівалентна довжина хвилі $\Lambda_{\text{ум}}$ використовуваного методу ТВ була мінімальною, а саме:

$$\lim[k_i \cdot \Lambda_{\text{ум}} \sum_{i=1}^n (\Phi_i \ln(\epsilon_i(\lambda)))] \longrightarrow 0.$$

4. Температура та похибка її визначення ТМВ із декількома спектральними каналами залежать від параметрів p_i їх взаємного розташування: середніх значень довжин хвиль спектральних каналів λ_{Ci} та відстані між їх центрами $\Delta\lambda_{Ci}$, а саме:

$$\lim \sum_{i=1}^n \partial T / \partial p_i \rightarrow \min.$$

Отже, реалізація сукупності цих вимог дозволить оптимально визначити параметри спектральних каналів багатоканального ТМВ, який функціонує в певних спектральному та температурному діапазонах і реалізує відповідні методи ВТВ. Практична реалізація сформованих критеріїв має бути узгоджена з випромінювальними властивостями об'єкта вимірювання в процесі його апіорного дослідження.

З метою узгодження нормативного забезпечення термометрії за ІЧ випроміненням зі світовими метрологічними вимогами запропоновано модель (рис. 3), яка ґрунтується на поєднанні й узгодженні нормативних документів України та основних міжнародних нормативних документів ТВ. До моделі входять документи різних рівнів як України, так і міжнародних організацій з метрології та стандартизації. Вона базується на засадах формування документації різних видів діяльності.

На основі дослідження термінології ТВ в ДСТУ 3518-97, технічній літературі та міжнародних мет-

рологічних документах подано ряд пропозицій стосовно вдосконалення моделі, зокрема, щодо: уточнення змісту окремих основоположних понять; формування класифікації засобів та методів ТВ; забезпечення термінологічної відповідності між основними температурними і спектральними діапазонами ТМГЧВ; удосконалення змісту ряду термінів та визначень ТВ. Реалізація цих заходів дає змогу ліквідувати неоднозначність трактування термінів під час створення гармонізованої термінологічної системи ТВ в Україні, сформувати сучасну наукову мову ТВ, що сприятиме покращенню взаєморозуміння науковців у цій сфері.

Для забезпечення реалізації різних видів метрологічного контролю у сфері ТВ та реалізації запропонованого методу передавання ТШ для ТМГЧВ розроблено ряд методик:

- оцінювання результатів повірки ТМГЧВ на основі непевності;
- перевірки лінійності функції перетворення ОПС ТМГЧВ;
- оцінювання непевності побудови лінійної функції перетворення для атестації еталонного ТМГЧВ;
- атестації еталонного випромінювача для передавання температурної шкали ТМГЧВ на основі закону Планка;
- повірки багатоканального ТМГЧВ;
- апіорного визначення температурної залежності коефіцієнта випромінювання для промислових об'єктів.

Розроблення цих методик дозволило розробити проекти стандартів на повірку багатоканальних ТМГЧВ, атестацію еталонного ТМВ та еталонного випромінювача.

ВИСНОВКИ

Запропоновано методологію вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням для потреб термометрії за інфрачервоним випроміненням, яка полягає в дослідженні та виявленні елементів метрологічного забезпечення та їх складових, які стримують розвиток у напрямі подальшого підвищення точності вимірювань температури за інфрачервоним випроміненням, а також у визначенні найперспективніших шляхів такого розвитку та розробленні нових методів їх реалізації.

Застосування запропонованих розроблень дає можливість підвищити точність вимірювання температури за випроміненням та розширити застосування термометрів ІЧ випромінення в промисловості.

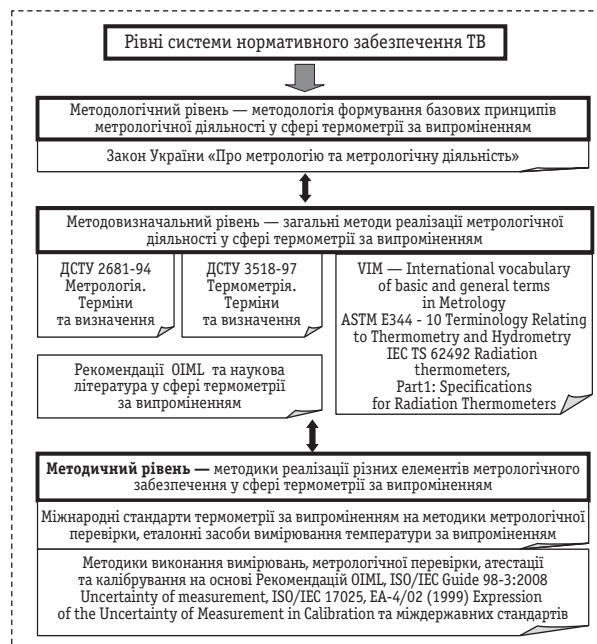



Рис. 3. Модель формування системи нормативного забезпечення ТВ відповідно до сучасних метрологічних вимог

Fig. 3. Model for formation of normative provision system for radiation thermometry

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ/REFERENCES

1. Енциклопедія термометрії / Я.Т. Луцки, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. — Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка» (Entsyklopedia termometrii / Y.T. Lutsyk, L.K. Buniak, Y.K. Rudavskyy, B.I. Stadnyk. — Lviv: Vydavnyystvo NU «Lvivska politekhnika»), 2003. — 428 с/р.
2. OIML Vocabulary. International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML) [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://www.oiml.org/en/technical-work/committee-drafts/files/tc1-viml-3cd.pdf/> — Назва з екрану/
3. Preston-Thomas H. The international temperature scale ITS-90 / H. Preston-Thomas // Metrologia. — 1990. — № 27(1). — Р. 3—10.
4. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. — М: Наука (Svet D.Y. Opticheskie metody izmereniia istinnykh temperatur / D.Y. Svet. — M: Nauka), 1982. — 296 с/р.
5. Снопко В.Н. Широкоспектральная оптическая пирометрия: Часть 1 / В.Н. Снопко. — Минск (Препринт / Ин-т физики АН Беларуси, 679) (Snopko V.N. Shyrokospektralnaia opticheskaia pirometriia: Chast 1 / V.N. Snopko. — Minsk). — 1993. — 26 с/р.
6. Гоц Н.Е. Сравнительная характеристика методов пирометрии / Н.Е. Гоц // Приборы +Автоматика (Hots N.Y. Sravnitelnaia kharakteristika metodov pirometrii / N.Y. Hots // Pribory +Avtomatika). — 2007. — № 7(85). — С/Р. 35—50.
7. Гоц Н.Е. Формування методології розвитку системи метрологічного забезпечення термометрії випромінювання / Н.Е. Гоц // Метрологія та прилади (Hots N.Y. Formuvannia metodologii rosvytku systemy metrologichnogo zabezpechennia termometrii vyprominennia / N.Y. Hots // Metrologia ta prylady). — 2013. — № 2(40). — С/Р. 37—40.
8. Назаренко Л.А. Реалізація температурної шкали нижче від точки тверднення срібла 961,78°C на реперних точках МТШ-90 / Л.А. Назаренко, Н.Е. Гоц // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвід. наук.-тех. зб. — Л.: Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Л. (Nazarenko L.A. Realizatsiia temperaturnoi shkaly nyzhche vid tochky tverdnennia sribla 961,78°C na repornykh tochkakh MTSH-90 / L.A. Nazarenko, N.Y. Hots // Vymiruvalna tekhnika ta metrologiia: mizhvid. nauk.-tech. zb. — L.: Nats. un-t «Lviv. politekhnika». — L.), 2010. — № 71. — С/Р. 77—82.
9. Гоц Н.Е. Розвиток методу передавання температурної шкали інфрачервоним термометрам випромінювання / Н.Е. Гоц, Г.І. Петриченко // Метрологія та прилади (Hots N.Y. Rozvytok metodu peredavannia temperaturnoi shkaly infrachervonym termometram vyprominennia / N.Y. Hots, G.I. Petrychenko // Metrologia ta prylady). — 2013. — № 1(33). — С/Р. 19—25.
10. Гоц Н.Е. Реалізація багатоточкового методу передачі температурної шкали за випромінювання з використанням інтерполяційної довжини хвилі / Н.Е. Гоц // Відбір та обробка інформації: міжвід. зб. наук. пр. / Львів. фіз.-мех. ін-т. НАН України. — Л.: Простір М (Hots N.Y. Realizaciia bagatotochkovogo metodu peredachi temperaturnoi shkaly za vyprominennia, z vykorystanniam interpoliatsiinoi dovzhyny khvyli / N.Y. Hots // Vidbir ta obrobka informacii: mizhvid. zb. nauk. pr. / Lviv. fiz.-mekh. inn-t. NAN Ukrainy. — L.: Prostir M), 2012. — № 36(112). — С/Р. 69—75.
11. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. // Ж. Госсорг. / М.: Мир (Gossorg Zh. Infrakrasnaia termografiia. Osnovy, Tekhnika, primienieniie: per. s fr. // Zh. Gossorg. / M.: Mir), 1988. — 399 с/р.
12. Гоц Н.Е. Критерії формування спектральних каналів для реалізації багатоканальних методів термометрії випромінювання / Н.Е. Гоц // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: техн. науки: зб. наук. пр. / Кам'янець-Подільський національний університет. — Кам'янець-Подільський (Hots N.Y. Kriterii formuvannia spektralnykh kanaliv dla realizacii bagatokanalnykh metodiv termometrii vyprominennia / N.Y. Hots // Matematychna ta komp'iuterna modeluvannia. Seriia: tekhn. nauky: zb. nauk. pr. / Kam'ianets-Podilskyi natsionalnyi universytet. — Kam'ianets-Podilskyi), 2012. — № 6. — С/Р. 58—66. 

Отримано / received: 04.03.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л.А. Назаренком (Україна).
Prof. L.A. Nazarenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 389.14

ОСОБЛИВОСТІ КАЛІБРУВАННЯ ЗВТ ВІДПОВІДНО ДО НОВОЇ РЕДАКЦІЇ ЗАКОНУ УКРАЇНИ «ПРО МЕТРОЛОГІЮ ТА МЕТРОЛОГІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ»

А. Коцюба, кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри, Відокремлений структурний підрозділ «Інститут підвищення кваліфікації фахівців у галузі технічного регулювання та споживчої політики» Одеської державної академії технічного регулювання та якості, м. Київ

Проаналізовано особливості калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) відповідно до вимог нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність».

This paper analyzes the features of the calibration of measuring instruments in accordance with the requirements of the new edition of the Law of Ukraine «On metrology and metrological activity».

Ключові слова: калібрування, засоби вимірювальної техніки, Закон України, методика калібрування, акредитація.
Keywords: calibration, measuring instruments, the Law of Ukraine, methods of calibration, accreditation.

В Україні з 01.01.2016 набуває чинності нова редакція Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] (Закону), яка гармонізує визначення терміну «калібрування» з VIM [2]. Окрім нового тлумачення терміну «калібрування», Закон містить ще цілу низку положень, які вимагають перебудови діяльності калібрувальних лабораторій відповідно до міжнародних вимог. Ця робота присвячена аналізу змін нової редакції Закону в частині, що стосується калібрування ЗВТ.

Основна частина

Згідно з [1] «калібрування — сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому — ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу». Відповідне співвідношення між показами вимірювального приладу та значенням величини, що забезпечується еталонами, може бути визначено через систематичну похибку. Що стосується співвідношення для отримання результату вимірювання з показу, то відповідно до VIM воно може визначатися через функцію, калібрувальну криву чи відповідну таблицю або включати адитивну чи мультиплікативну поправку до показів. VIM також застерігає від плутання калібрування з регулюванням ЗВТ, що іноді в інструкціях з їх експлуатації також помилково називається калібруванням або самокалібруванням (автокалібруванням), якщо воно виконується в автоматичному режимі.

На перший погляд може здатися, що визначення «калібрування», надане в новій редакції Закону, — це один із можливих варіантів калібрування згідно з визначенням цього поняття в редакції чинного (старого) Закону, а саме: визначення за певних умов метрологічних характеристик ЗВТ. Можна показати на дуже простому прикладі,



що це не зовсім так. Розглянемо випробувальну лабораторію, яка проводить кількісний хімічний аналіз деяких продуктів. Частина методик такої лабораторії передбачатиме перед визначенням відповідного показника побудову градувального графіка з використанням стандартних зразків, тобто, фактично, еталонів. З точки зору чинного Закону ця процедура не є калібруванням, однак підпадає повністю під визначення калібрування, надане у VIM та новій редакції Закону.

Необхідно зазначити, що калібрування у визначенні нової редакції Закону не включає контролю придатності ЗВТ до застосування. Це не означає, що калібрувальна лабораторія не може робити висновку стосовно відповідності чи невідповідності тієї чи іншої характеристики ЗВТ вимогам специфікацій, однак вона не повинна робити висновку щодо придатності приладу до застосування в цілому. Це рішення лишається за користувачем. Іноді користувача, зважаючи на специфіку застосування приладу, може влаштовувати ситуація, коли певні характеристики не відповідають вимогам, і тоді він може його використовувати.

Потрібно також звернути увагу на те, що фактично з 01.01.2016 є обов'язковим оцінювання невизначеності вимірювання під час калібрування. Відповідно до статті 7 нової редакції Закону «результати вимірювань можуть бути використані у сфері законодавчо регульованої метрології за умови, що для таких результатів відомі відповідні характеристики похибок або невизначеності вимірювань». Отже, оцінка точності результатів вимірювань є обов'язковою лише в сфері законодавчо регульованої метрології. Оскільки калібрування як вид діяльності не віднесено до сфери законодавчо регульованої метрології (хоча згідно зі статтею 27 калібрування в добровільному порядку можуть підлягати ЗВТ, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології), з цього можна було б зробити висновок стосовно необов'язковості оцінювання невизначеності вимірювання під час калібрування. Однак такий висновок дещо передчасний.

Пункт 3 статті 27 Закону вимагає, щоби калібрування ЗВТ та оформлення його результатів проводилися «...відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології». Щодо оформлення результатів калібрування, то таким національним стандартом є ДСТУ ISO/IEC 17025-2006 [3] (Стандарт), гар-

монізований з міжнародним стандартом [4], адже ДСТУ 3989-2000 [5] не гармонізовано й орієнтовано на «старий» Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» і не гармонізовано розуміння терміну «калібрування». Пункт 5.10.4.1 розділу 5.10 Стандарту, який регламентує вимоги до свідоцтв про калібрування, визначає, що свідоцтва про калібрування повинні містити «невизначеність вимірювання та (або) вказівку на відповідність ідентифікованим метрологічним характеристикам технічних умов або окремим їх положенням». Отже, якщо калібрувальна лабораторія надає у свідоцтві висновок стосовно відповідності (невідповідності) метрологічних характеристик вимогам специфікацій, зазначення невизначеності вимірювання необов'язкове. Однак, згідно з п. 5.10.4.2 Стандарту, «якщо у заяві про відповідність технічним умовам відсутні результати вимірювань та **пов'язані з ними невизначеності** (виділено автором), лабораторія повинна зареєструвати ці результати і зберігати їх для можливих посилань на них у майбутньому. Коли заяви про відповідність мали місце, невизначеності вимірювання повинні бути взято до уваги». Отже, в будь-якому разі, незалежно від вимог замовника, калібрувальна лабораторія повинна оцінювати невизначеність вимірювання під час калібрування, і цю вимогу, фактично, закріплено законодавчо.

Це зовсім не означає, що для ЗВТ необхідно буде нормувати невизначеність і відповідно визначати під час калібрування. У зв'язку зі зміною розуміння поняття «калібрування» немає ніякої потреби для ЗВТ нормувати деякі нові характеристики порівняно з тими, що регламентовані в ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 [6]. Невизначеність вимірювання стосується винятково результатів вимірювань, тобто є характеристикою точності результатів вимірювань, а не характеристикою точності ЗВТ. Тобто, йдеться стосовно того, що, оскільки під час калібрування певні показники ЗВТ фактично вимірюються, то, як і будь-які результати вимірювання, викликають певні сумніви щодо точності, а отже мають супроводжуватися оцінкою точності, якою на міжнародному рівні на сьогодні визнається винятково невизначеність вимірювання. ЕА-4/02 [7] вимагає, щоби під час калібрування оцінювалася розширена невизначеність U для рівня довіри $p = 0,95$.

Для прикладу розглянемо калібрування шкального вимірювального приладу з неістотною випадковою похибкою. Співвідношення між його показами та значенням еталона можна представити через систематичну похибку Δ_c , яка визначається як відхилення показів приладу від істинного значення

фізичної величини, поданої на вхід вимірювального приладу:

$$\Delta_c = x_{\Pi} - x_{icm}, \quad (1)$$

де x_{Π} — покази приладу за значення величини на вході приладу, рівного x_{icm} ; x_{icm} — істинне значення величини, поданої на вхід вимірювального приладу.

Ця формула є ідеальною, оскільки на практиці ні x_{Π} , ні x_{icm} не можуть бути відомі абсолютно точно. Тому за калібрування систематичну похибку оцінюють за формулою:

$$\Delta_c \approx x_k - x_{et}, \quad (2)$$

де x_k — результат вимірювання приладом, що калібрується, величини, поданої на його вхід; x_{et} — значення величини за еталонною установкою (еталоном).

Для шкального приладу з неістотною випадковою похибкою $x_k = x_{\Pi} + \Delta_0$, де Δ_0 — похибка зчитування показів оператором. Отже, вираз для сумарної стандартної невизначеності $u(\Delta_c)$ величини матиме вид:

$$u(\Delta_c) = \sqrt{u^2(\Delta_0) + u^2(x_{et})}. \quad (3)$$

Тут $u(\Delta_0)$ — стандартна невизначеність, зумовлена неточністю зчитування показів приладу оператором, $u(x_{et})$ — стандартна невизначеність визначення величини еталоном, що може мати кілька складових, які за зрозумілих причин не розглядаються. У формулі (3) враховано, що x_{Π} — номінальні покази і тому $u(x_{\Pi}) \equiv 0$.

Для приладу з істотною випадковою похибкою в формулі (2) результат одного вимірювання потрібно замінити на середнє значення x_k із кількох результатів вимірювань x_{ki} . Тоді формула для сумарної стандартної невизначеності набуде виду:

$$u(\Delta_c) = \sqrt{S^2 + u^2(\Delta_0) + u^2(x_{et})}, \quad (4)$$

де $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_k)^2 / (n \cdot (n-1))}$ — статистична

оцінка середнього квадратичного відхилення середнього із n результатів вимірювань приладом, що калібрується. У такий спосіб для вимірювального приладу з істотною випадковою похибкою співвідношення між його показами та значенням еталона встановлюється також через систематичну похибку, а випадкова похибка враховується як одне із джерел невизначеності під час калібрування.

Розширену невизначеність можна отримати як добуток сумарної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення. Її необхідно знати, оскільки вона може впливати на відповідність характеристики, в цьому випадку систематичної похибки приладу, діапазону (норми), встановленому в експлуатаційній документації на прилад.

Цікаво зазначити, що на відміну від чинної редакції Закону його нова редакція, в певних випадках, передбачає або допускає калібрування ЗВТ не лише поза сферою, а й у законодавчо регульованій сфері. Згідно з п. 1 ст. 27 Закону «калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології». Відповідно до ст. 17 Закону в законодавчо регульованій сфері не підлягатимуть періодичній повірці та повірці після ремонту:

- ЗВТ, що використовуються «органами з оцінки відповідності (у тому числі випробувальними та калібрувальними лабораторіями), акредитованими Національним органом України з акредитації чи національними органами інших держав з акредитації, для провадження діяльності, стосовно якої їх було акредитовано». Випробувальні та калібрувальні лабораторії акредитуються на відповідність вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025:2006, який вимагає калібрування ЗВТ. Тому зазначені ЗВТ потрібно буде калібрувати.

- ЗВТ, що використовуються «науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами та калібрувальними лабораторіями, які проводять калібрування засобів вимірювальної техніки відповідно до частини другої статті 27 цього Закону, стосовно ЗВТ, що використовуються ними при калібруванні». Оскільки за калібрування потрібно забезпечувати метрологічну простежуваність, що, згідно з визначенням такого поняття в Законі, можливо лише через ланцюг калібрувань, ці ЗВТ потрібно буде калібрувати.

- Калібруванню під час експлуатації в законодавчо регульованій сфері можуть також піддаватися ЗВТ тих категорій, які не потраплять до переліку категорій законодавчо регульованих ЗВТ, що підлягають періодичній повірці, встановлюваного Кабінетом Міністрів України. За рішенням користувача ці засоби в добровільному порядку можна або калібрувати, або повірять.

Відповідно до Закону калібрування ЗВТ проводитимуть:

- * наукові метрологічні центри (НМЦ).

НМЦ будуть визначені Кабінетом Міністрів України «...з числа державних підприємств, установ та організацій, що належать до сфери управління Центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, й створюють, удосконалюють, зберігають і застосовують національні еталони». На сьогодні на цей статус претендують

ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків), ДП «Укрметрестандарт» (м. Київ), ДП НДІ «Система» (м. Львів), ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» (м. Івано-Франківськ), які є підписантами Угоди про взаємне визнання національних еталонів, сертифікатів калібрування та результатів вимірювання, що виконуються в національних метрологічних інститутах (Угоди CIPM MRA [8]).

* метрологічні центри (МЦ), калібрувальні лабораторії, акредитовані національним органом України з акредитації — Національним агентством України з акредитації (НААУ). Зазначені організації та підприємства повинні пройти процедуру акредитації на відповідність вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 та отримати свідоцтва про акредитацію.

* метрологічні центри, калібрувальні лабораторії, які матимуть документально підтверджену простежуваність своїх еталонів до національних еталонів, еталонів інших держав або міжнародних еталонів відповідних одиниць вимірювання.

Розглянемо, що може бути документальним підтвердженням простежуваності еталонів. Частина еталонів лабораторії, як мінімум вихідні, будуть відкалібровані в іншій, найчастіше більш високого метрологічного рівня, лабораторії. Якщо це калібрування здійснюватиме НМЦ або акредитовані МЦ чи калібрувальна лабораторія, наявність на виданих ними свідоцтвах про калібрування логотипу CIPM MRA (у випадку НМЦ) або логотипу органу з акредитації, що є підтвердженням акредитації (для МЦ або калібрувальної лабораторії), є достатнім доказом метрологічної простежуваності відповідних вихідних еталонів [3,4]. Простежуваність же своїх інших еталонів до вихідних можна продемонструвати за допомогою низки свідоцтв про калібрування, що дозволять продемонструвати ланцюг простежуваності, із зазначеними в них використаними під час калібрування еталонами та відповідними оцінками невизначеності. Існує й інший варіант підтвердження метрологічної простежуваності — через участь у визначених схемах міжлабораторних звірень.

Варіант документального підтвердження простежуваності без акредитації, як видається, більше підійде калібрувальним лабораторіям підприємств, які здійснюють калібрування ЗВТ для власних потреб цих підприємств. Це пов'язано з тим, що така лабораторія не зможе на видаваних нею свідоцтвах про калібрування використовувати логотип органу з акредитації. Відсутність такого логотипу у видаваних свідоцтвах про калібрування для сторонніх замовників (у випадку наявності таких) може усклад-

нювати цим замовникам підтвердження простежуваності власних вимірювань,

Наостанок розглянемо вимоги нової редакції Закону щодо методик калібрування. Чинна (стара) редакція Закону не містить ніяких вимог щодо методик калібрування. ДСТУ 3989-2000 [5] визначає, що калібрування здійснюється за методиками калібрування (без конкретизації рівня документів, в яких вони мають бути викладені), а у разі їх відсутності — за методиками повірки. Однак у рамках нової редакції Закону використовувати методики повірки як методики калібрування не можна. По-перше, методики повірки регламентують, як правило, контроль метрологічних характеристик ЗВТ, іноді взагалі допусканий. По-друге, методики повірки не відповідають вимогам [3,4], оскільки, за деякими винятками, не містять ні оцінок невизначеності вимірювання, ні процедур їх оцінювання.

Як уже зазначалося, згідно з п. 3 ст. 27 нової редакції Закону «калібрування засобів вимірювальної техніки та оформлення його результатів проводяться відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології». Такі вимоги є більш жорсткими, ніж прийняті на міжнародному рівні, що регламентовані в [4]. ISO/IEC 17025:2005 лише рекомендує перевагу надавати стандартизованим методикам, однак допускає застосування нестандартизованих методик, рекомендованих авторитетними технічними організаціями й описаних у відповідних наукових статтях чи журналах або рекомендованих виробником ЗВТ. Розроблені або прийняті лабораторією методики також можуть бути використані, якщо вони придатні та оцінені.

Така, на думку автора, надмірна жорсткість Закону в цій частині не зовсім зрозуміла, тим більше з урахуванням того, що одна з цілей його прийняття — гармонізація законодавства в сфері метрології із законодавством ЄС та з рекомендаціями міжнародних метрологічних організацій. Певною мірою це створює враження, що законодавець тут бажав бути святішим від Папи Римського. Ці вимоги буде достатньо важко, якщо взагалі можливо, виконати. Методик калібрування, викладених в національних гармонізованих стандартах, дуже обмежена кількість. Зрозуміло, що їх кількість до 01.01.2016 якщо й зросте, то дуже незначно. Є рекомендації міжнародних та регіональних метрологічних організацій, наприклад EURAMET, але часто вони мають дуже загальний характер. Крім того, вони не охоплюють


всієї номенклатури ЗВТ. Разом з тим, цікаво відзначити, що законодавством України не передбачено відповідальності за недотримання вимог п.3 статті 27 нової редакції Закону.

ВИСНОВКИ

Отже, основні особливості нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» в частині калібрування ЗВТ полягають у гармонізації самого поняття «калібрування» з VIM та приведенні

діяльності з калібрування у відповідність до міжнародних вимог. Скасовується атестація калібрувальних лабораторій. Діяльність з калібрування можлива за умови акредитації калібрувальної лабораторії або документального підтвердження метрологічної простежуваності її еталонів. Допускається в ряді випадків калібрування ЗВТ і у сфері законодавчо регульованої метрології. До недоліків Закону, на думку автора, слід віднести занадто жорсткі вимоги стосовно вибору методик калібрування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». — Відомості Верховної Ради (ВВР) (Law of Ukraine «On metrology and metrological activity». — Supreme Council (SC), 2014, № 30), 2014, № 30. — с/р. 1008.
2. ISO GUIDE 99: 2007. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM).
3. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (DSTU ISO/IEC 17025:2006. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories).
4. ISO/IEC 17025:2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
5. ДСТУ 3989-2000. Метрологія. Калібрування засобів виміральної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів (DSTU 3989-2000. Metrology. Calibration of measuring instruments. Main provisions, organization, conduct and presentation of results.).
6. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений (DSTU GOST 8.009:2008. SSM. Standardized metrological characteristics of measuring instruments).
7. EA — 4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
8. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificated issued by national metrology institutes. — Paris, October 1999. 


Отримано / received: 12.01.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. В.М. Новіковим (Україна).
Prof. V.M. Novikov, D. Sc. (Phys.-Math.), Ukraine, recommended this article to be published.

ДО УВАГИ ЧИТАЧІВ ЖУРНАЛУ

У нашому журналі №1 за 2015 рік надруковано статтю Кузьменка Ю.В., Черепкова С.Т., Несвідоміної Л.Ю., Потоцького І.О. «Законодавчо регульована метрологія відповідно до OIML Д1 та нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність».

Подана в ній на рис. 1 «Структура законодавчо регульованої метрології» внаслідок обме-

ження кольорів та введення нумерації виявилася такою, що не може представляти роботу авторів. Натомість в електронному виді статті зазначену структурну схему надано в авторському варіанті. Саме такою схемою як чинною треба користуватися за роботи зі статтею. Схему в електронному виді можна отримати в редакції журналу. 



В. Одноралов, кандидат технічних наук,
заступник генерального директора з метрології, стандартизації та наукової діяльності,
ДП «Сумистандартметрологія»

Проведено детальне аналізування методик калібрування та повірки, що використовуються в Іспанії. Показана можливість застосування методик повірки, що використовуються в Україні, для калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).

The detailed analysis of calibration and verification procedures in Spain has been made.

The possibility to use Ukrainian verification procedures for calibration of measurement instruments has been pointed. It was pointed, as well, the possibility to use Ukrainian state hierarchy schemes for measuring instruments traceability. The author expressed an opinion to use general guides for uncertainties calculation at the measuring instruments calibration in Ukraine.

Ключові слова: калібрування, повірка, засіб вимірювальної техніки, простежуваність, невизначеність, національна метрологічна система.
Keywords: calibration, verification, measuring instrument, traceability, uncertainty, national metrology system.

Сьогодні метрологічна спільнота України жваво обговорює проблеми адаптації національної метрологічної системи до відповідних вимог країн Євросоюзу. Одним із її істотних недоліків, на який нам постійно вказують європейські експерти, вважається надмірне застосування повірки ЗВТ на відміну від їх калібрування, яке є найбільш поширеним видом метрологічних послуг у країнах Євросоюзу. Це підтверджують і статистичні дані. Згідно з [1] за 2014 рік державними підприємствами Мінекономрозвитку України повірено 10,154 млн. ЗВТ, а відкалібровано лише 36,1 тис.

Також європейським експертам незрозуміло, в який спосіб ми можемо використовувати методики повірки за проведення калібрування ЗВТ, як це прописано у [2, п. 4.18]. У цій статті наведено матеріали аналізу метрологічної системи країни Євросоюзу у сфері повірки та калібрування ЗВТ на прикладі Іспанії. Вибір цієї країни зумовлено тим, що лише на сайті наукового метрологічного інституту Іспанії СЕМ [3] вдалося знайти викладені для вільного ознайомлення 67 методик калібрування та 26 методик повірки, а також основні законодавчі акти у сфері забезпечення єдності вимірювань.

МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ

Методики калібрування розроблено за єдиною формою, визначеною в [4], та мають таку структуру: Вступ, Призначення, Сфера застосування, Терміни та визначення, Загальні вимоги, Описання методики (обладнання, операції підготовки, операції калібрування, отримання первинних даних та їх опрацювання), Опрацювання результатів (обчислення невизначеностей калібрування, інтерпретація результатів), Літературні джерела, Додатки.



У **Вступі**, перш за все, підкреслено саме безкоштовний статус поширення електронної версії методики з офіційного сайту СЕМ. Зазначено, що електронна версія є ідентичною актуальній версії на папері. Також зазначено, що кожна методика може бути модифікована на вимогу будь-якої установи або навіть фізичної особи. СЕМ приймає обґрунтовані пропозиції щодо поліпшення та модернізації методики.

У розділі **«Призначення»** вказано, на які типи ЗВТ поширюється ця методика.

У розділі **«Сфера застосування»** наведено детальні обмеження стосовно діапазону величини, що вимірюється, а також стосовно метрологічних характеристик ЗВТ та еталонів, на які поширюється ця методика. Зазначено, що цю методику можна використовувати як зразок під час розроблення власних методик користувачами.

У розділі **«Терміни та визначення»** подано визначення фізичної величини, що вимірюється, та терміни, пов'язані із особливостями ЗВТ, що калібруються. Також наведено деякі основні терміни у сфері метрології.

У розділі **«Загальні вимоги»** описано типи та основні конструкційні (методи вимірювання, блок-схеми) та експлуатаційні особливості ЗВТ, що підлягають калібруванню. Також описано методи калібрування та відповідні еталони. Зазначено одиниці вимірювання відповідної величини та їх позначення.

У розділі **«Описання методики»** представлено:

1. **Обладнання.** Зазначено еталони, необхідні для проведення калібрування, а також допоміжне обладнання. Описано особливості застосування та обслуговування цього обладнання.

2. **Операції підготування.** Прописано операції, що передують безпосередньому використанню обладнання за калібрування.

3. **Операції калібрування.** Процес калібрування, взагалі, може відбуватися згідно з трьома основними послідовностями: первинним калібруванням — настроюванням — кінцевим калібруванням; калібруванням без настроювання; настроюванням — кінцевим калібруванням. Зазвичай застосовують першу послідовність, коли за своєю конструкцією ЗВТ дозволяє настроювання. Якщо ЗВТ не дозволяє настроювання, то апіорі розглядають лише другу послідовність. Третю послідовність застосовують, як правило, за калібрування після ремонту. Визначено кількість калібрувальних точок у діапазоні вимірювання ЗВТ, їх послідовність та кількість повторних вимірювань. Наведено схеми з'єднання еталонів із ЗВТ, що калібруються, описано маніпуляції з ор-

ганами управління еталонами. Також прописано додаткові вимоги та операції калібрування, пов'язані зі специфікою кожного типу ЗВТ (час витримки, гістерезис, зміщення точки прикладання навантаження, стабільність нуля тощо).

4. **Отримання первинних даних та їх опрацювання.** Для кожної калібрувальної точки записують значення, що відтворюється еталоном; показання ЗВТ, що калібрується; похибку, визначену для кожної калібрувальної точки. Надалі порівнюють отримані та допустимі значення похибок ЗВТ для визначення необхідності проведення його настроювання. Реєстрацію даних калібрування можна реалізовувати вручну або автоматично. В останньому випадку потрібно виконати атестацію (оцінювання) програмного забезпечення до проведення процедури калібрування та зберегти усі первинні значення параметрів для можливості відтворити реалізований процес автоматичного калібрування.

У розділі **«Опрацювання результатів»** описано:

1. **Обчислення невизначеностей калібрування.**

Установлення та підрахунок складових невизначеностей реалізують відповідно до критеріїв, визначених в документі [5]. Складають рівняння для величини, що вимірюється, як функцію від значення цієї величини. Описують порядок визначення величин складових невизначеності, складають бюджет невизначеностей. Розраховують сумарну та розширену невизначеності. Можуть бути наведені кілька варіантів розрахунку сумарної невизначеності (наприклад, за суттєвої та несуттєвої варіації показань ЗВТ тощо).

2. **Представлення результатів.**

Установлюють певні допустимі границі похибки, починаючи з яких необхідно проводити настроювання ЗВТ або встановлювати обмеження його подальшого застосування. Встановлюють критерії придатності ЗВТ для прийняття рішення щодо ремонту або щодо його подальшого застосування зі збільшеними допустимими границями похибки. Надають рекомендації користувачам із установлення міжкалібрувального інтервалу для певної одиниці ЗВТ. Підкреслюють відповідальність користувача за правильне встановлення міжкалібрувального інтервалу залежно від метрологічної історії (результатів останніх калібрувань, настроювань, ремонтів), умов експлуатації та величини встановленої похибки конкретної одиниці ЗВТ.

У розділі **«Літературні джерела»** зазначають національні та міжнародні нормативні документи, іншу довідкову літературу, використану за складання методики; посилення на настанови з експлуатації еталонів та ЗВТ.

У розділі «Додатки» наведено форми протоколів первинних даних із переліком установлених у методиці калібрувальних точок. Можуть наводитися принципи дії ЗВТ та числові приклади опрацювання результатів калібрування конкретних типів ЗВТ.

Автор виконав переклад з іспанської мови однієї методики калібрування ЗВТ, з текстом якого можна ознайомитися на сайті ДП «Сумистандартметрологія» [6] в розділі «Науково-технічні послуги у сфері стандартизації».

МЕТОДИКИ ПОВІРКИ

На відміну від методик калібрування, методики повірки в Іспанії мають більш вагомий юридичний статус. Їх затверджують окремими наказами Міністерства промисловості, туризму та торгівлі Іспанії, якому підпорядковується СЕМ. У наказах є обов'язкове посилання на основні законодавчі акти Іспанії, які регулюють відносини у сфері забезпечення єдності вимірювань у країні [7,8]. Методики повірки створює або погоджує Вища Метрологічна Рада Іспанії — координаційний та дорадчий державний орган з питань законодавчої, наукової, прикладної та історичної метрології. Методики первинної повірки, разом із порядком проведення випробувань з метою затвердження типу ЗВТ, встановлюють за окремими наказами Міністерства. Загальні вимоги до методик повірки визначено у Декреті [8], але не існує нормативного документа, який встановлює порядок розроблення методик повірки, внаслідок чого вони помітно різняться за структурою. Згідно з Декретом [8] будь-яка методика повірки ЗВТ в експлуатації повинна реалізовувати три основні види контролю: адміністративний, оглядовий та технічний. У більшості методик повірки регламентовано лише перші два види контролю та зроблено посилання на нормативний документ, що регламентує третій вид контролю. Методики повірки ЗВТ в експлуатації, розроблені в Іспанії останнім часом, мають таку структуру: Вступ, Загальні положення, Повірка після ремонту та модифікації, Повірка періодична, Перехідні положення, Прикінцеві положення, Додатки.

У **Вступі** викладено юридичне підґрунтя призначення державного метрологічного контролю для ЗВТ певного типу, а саме, Директиви Євросоюзу, Закони та Королівські Декрети і накази Міністерства. Підкреслено, що проект наказу розробляли з урахуванням інтересів автономій Іспанії та пропозицій усіх зацікавлених сторін.

У **Загальних положеннях** встановлено призначення цього нормативного акта, види повірки ЗВТ

та сфера застосування його положень стосовно типів ЗВТ, що підлягають державному метрологічному контролю.

У розділі «**Повірка після ремонту та модифікації**» встановлено вимоги щодо повноважень організації або особи, що здійснює ремонт та модифікацію. Зазначено вимоги до порядку реєстрації інформації щодо характеру та результатів проведеного ремонту. Власник ЗВТ має за 30 днів подати заявку на повірку до обраної ним уповноваженої організації. Процедура повірки складається з адміністративного та технічного контролю. Адміністративний контроль передбачає розгляд документів та зовнішній огляд ЗВТ. Зовнішній огляд вимагає перевірку наявності маркування СЄ та наявності цього типу ЗВТ у національному Реєстрі Іспанії. Технічний контроль передбачає перевірку відповідності метрологічних характеристик ЗВТ. Підкреслено обов'язок власника ЗВТ сприяти проведенню процедури повірки. Якщо ЗВТ успішно пройшов повірку, повірник повинен наклеїти на ЗВТ етикетку щодо відповідності встановленої форми, оформити свідоцтво про повірку та поновити пломбування усіх передбачених місць. Міжповірочний інтервал установлюється такий самий, як і після періодичної повірки. Якщо ЗВТ забраковано, повірник повинен наклеїти на цей ЗВТ етикетку щодо невідповідності встановленої форми та вимагати від власника вилучення його з експлуатації. Повірник має право перевірити виконання цієї вимоги.

У розділі «**Періодична повірка**» викладено практично ті самі вимоги, що і в попередньому. Заявка на періодичну повірку ЗВТ має бути подана мінімум за 30 днів до закінчення терміну попередньої повірки або у випадку втрати етикетки щодо повірки.

У розділі «**Перехідні положення**» зазначено терміни введення в дію вимог цього наказу та внесення змін до пов'язаних нормативних документів. Якщо ЗВТ, що були введені в експлуатацію до впровадження цього наказу, не проходили випробування з метою затвердження типу або первинної повірки, вони мають пройти первинну повірку згідно з чинною методикою за нормальних умов, після транспортної вібрації та під час дії впливних величин. Цю повірку потрібно виконати у термін, що не перевищує трьох місяців з моменту впровадження наказу.

У розділі «**Прикінцеві положення**» зазначено зв'язок цього наказу з основними нормативно-правовими актами Іспанії (Конституцією, Законом тощо), а також термін надання йому законної сили.

У **Додатках** наведено конкретні вимоги до юридичних та фізичних осіб, які претендують на діяльність, пов'язану із ремонтом та модифікацією ЗВТ;

форму паспорта кожного конкретного ЗВТ, який має заповнити та вести власник; суттєві вимоги та критерії відповідності ЗВТ; вимоги до еталонного та допоміжного обладнання; вимоги до нормативних документів, що застосовуються за проведення повірки.

ПОРІВНЯННЯ

Серед особливостей методик калібрування СЕМ потрібно відзначити, що, незважаючи на наявність у них порядку розрахунку невизначеностей, *рішення стосовно придатності (можливості застосування) ЗВТ за результатами калібрування приймають на основі аналізу величини похибки, а не невизначеності.*

Незважаючи на заборону зазначати періодичність калібрування у свідоцтвах [9], у методиках СЕМ, тим не менше, надають детальні рекомендації щодо визначення періодичності калібрування кожної одиниці ЗВТ, наголошують на відповідальності власника за правильне встановлення періодичності та наводять чинники, які повинні враховуватися за її визначення. Варто зауважити, що калібрування ЗВТ взагалі не регламентують жодним законодавчим актом Іспанії у сфері метрології.

Слід констатувати, що в наказах (методиках повірки), основну увагу приділяють саме адміністративному та оглядовому контролю ЗВТ. Операції зіставлення показань ЗВТ з показаннями відповідних еталонів, виконання яких дає інформацію для прийняття рішення щодо його відповідності, називають випробуваннями на точність і викладено лише в деяких методиках. Зазвичай роблять лише посилання на міжнародні нормативні документи (міжнародні стандарти, документи OIML тощо) у частині вимог до метрологічних характеристик. Це дає підстави зробити висновок, що, для встановлення факту відповідності конкретної одиниці ЗВТ за результатами повірки, згідно з наказом (методикою повірки) можна виконувати лише аналізування вже попередньо отриманих результатів (протоколів випробувань, калібрувань тощо). Основну увагу приділяють процедурам оформлення та реєстрації результатів повірки, що є вирішальним для надання ЗВТ відповідного юридичного статусу — можливості його застосування у законодавчо регульованих сферах. Також варто зауважити, що еталони, які використовують під час повірки, підлягають калібруванню.

ВИСНОВКИ

Аналіз викладених вище даних та порівняння свідчать, що наші методики повірки містять детальне описання процедур зіставлення показань ЗВТ,

що повіряється, з показаннями еталона, таких, які також детально описано в методиках калібрування СЕМ. Але в тих самих методиках повірки України встановлено також вимоги до зовнішнього виду, безпеки, інші критерії визнання ЗВТ придатним, а також порядок оформлення результатів повірки і маркування ЗВТ відповідним знаком.

Отже, можна зробити висновок, що методики повірки ЗВТ, які застосовують в Україні, фактично об'єднують європейські методики калібрування та методики повірки. Єдиний недолік, на якому можна зробити наголос, є той, що в наших методиках повірки відсутній порядок розрахунку невизначеності вимірювань ЗВТ за повірки що, на думку європейських експертів та Національного агентства України з акредитації, є неприпустимим. Щодо цього можна зауважити:

* чомусь усі вперто забувають, що міжнародний стандарт [9] дозволяє альтернативу під час оформлення результатів калібрування ЗВТ. У п. 5.10.4.1 зазначено, що у свідоцтві про калібрування має бути вказана невизначеність або подано висновок щодо відповідності метрологічних характеристик ЗВТ встановленим вимогам, що і виконують під час повірки;

* розрахунок невизначеності під час калібрування можна виконати, й її величину можна зазначити у свідоцтві згідно з вимогами нормативних документів загального характеру [6, 10] за умови відповідної фахової підготовки та наявності практичних навичок повірників у складанні бюджету невизначеностей за калібрування ЗВТ конкретних типів.

Аналіз викладених вище даних також дає відповідь на те, чому в процесі опитування, проведеного автором, колеги із європейських наукових метрологічних інститутів (PTB, Німеччина; CMI, Чехія; Metroserf, Естонія; BIM, Болгарія; GUM, Польща; та SMU, Словаччина) висловили думку щодо неможливості застосування методик повірки за калібрування. В європейських методиках повірки процедура зіставлення показань ЗВТ, що повіряється, з показаннями відповідного еталона не є головною метою. Головна мета — надання відповідного юридичного статусу ЗВТ.

Єдиний, хто зрозумів особливості наших методик повірки, — колега з Нідерландів Jos Verbeek, VSL [11]. Він висловив думку щодо можливості застосування наших методик повірки (в яких ця процедура є головною) під час калібрування за умови, коли результат калібрування доповнено розрахунком невизначеності та гарантованою простежуваністю. В Італії (INRIM), як виявилось, застосовують

методики повірки за калібрування. Міжнародний стандарт [9] допускає застосування стандартних методик, що використовуються за межами цільової сфери поширення, за умови проведення оцінювання їх придатності (п.5.4.5.2). Тому, замість того, щоб займатися кожній калібрувальній лабораторії винахідництвом та розробленнями незлічених власних версій методик калібрування, чи не краще згадати результати високопрофесійної праці поколінь наших метрологів, провести оцінювання придатності наявних стандартних методик повірки для калібрування ЗВТ, доповнити їх типовими методиками розрахунку невизначеності за калібрування та використовувати це безцінне історичне надбання у нашій роботі.

Стосовно простежуваності автору незрозуміло, чому європейські експерти та деякі наші фахівці заявляють, що її у нас не було взагалі. В нашій державі вже багато років існує струнка система передавання розмірів одиниць величин від національних еталонів до робочих ЗВТ, регламентована державними повірочними схемами. Фахівці з Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML) запозичили наше досягнення та розробили документ [12], який встановлює порядок складання ієрархічних (читай, повірочних) схем для передавання розміру одиниць величин за допомогою ланцюгів калібрувань (calibration chains), які, власне, і слугують для забезпечення отой простежуваності вимірювань. Наприклад, ієрархічна схема OIML для засобів вимірювання в'язкості рідин [13] є, практично, копією добре знайомих українським метрологам державних повірочних схем. Відмінності, на думку автора, стосуються лише деталей. Передавання розміру одиниці величини від еталона до робочого ЗВТ відбувається «зверху-донизу» за повірочною схемою, а простежуваність має зворотний порядок за тою самою повірочною схемою. В наших повірочних схемах нормують значення похибки еталонів та методів передавання, а документ [12] передбачає нормування їх невизначеностей. У повірочних схемах зазначають лише характеристики робочих ЗВТ і еталонів та їх місце у схемі, а простежуваність вимагає зазначати конкретні одиниці ЗВТ та еталонів. Всі ці відмінності, на думку автора, не є принциповими. Принциповим є те, що система передавання розміру одиниці величини за повірочною схемою забезпечує простежуваність вимірювань, виконаних ро-

бочим ЗВТ, до національних еталонів України з додатковим розрахунком невизначеності (за необхідності) та зазначенням конкретних одиниць еталонів (не є проблемою!).

Взагалі, спостереження за напрямами і методами реформування національної метрологічної системи України групою європейських експертів разом із найнятими координаторами та деякими фахівцями із наших центральних навколометрологічних структур, викликає почуття жалю з приводу жорсткого та безпідставного ігнорування історичних особливостей та досягнень нашої системи.

Аналізуючи національні метрологічні системи країн Євросоюзу можна прийти до висновку, що за інтеграції до європейської якраз урахували їхні національні особливості, що має відображення у структурі, законодавчій базі тощо [14].

На жаль, такого підходу не спостерігалось в Україні. Проект Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [15], розроблений визнаними фахівцями нашої системи, який гармонізовано з європейськими вимогами та враховував історичні особливості України, схвалений колегами з найавторитетнішої метрологічної країни світу — Німеччини, врешті-решт прийнятий Верховною Радою України, відхилений Президентом України за порадою цих самих європейських експертів та координаторів.

Розробниками нового Закону проігноровані національні особливості та здобутки у сфері законодавчої і наукової метрології разом зі слушними зауваженнями до проекту Закону, які висловлювалися метрологічною спільнотою України. Важко назвати метрологами авторів прийнятої редакції Закону [16] хоча б тому, що найголовніший термін метрології — «вимірювання» — був без жалю викинутий із термінологічної статті й взагалі має якийсь непевний, презирливий характер: «Вимірюванням вважається...».

Автор не ставить перед собою завдання проаналізувати всі невідповідності (в тому числі й міжнародним нормам) та незрозумілості нового Закону. Наприкінці хочеться зазначити лише одне — за реформування національної метрологічної системи наші реформатори також не взяли до уваги і заповіту великого Кобзаря: «...чужому навчайтесь, і свого не цурайтесь...».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Гіленко О.П. Департамент технічного регулювання та метрології Мінекономрозвитку України: метро-

логічна діяльність у 2014 році. Метрологія та прилади (Gilenko O.P. Technical regulation and metrology

- Department of economic development and trade Ministry of Ukraine: Metrological activity in 2014. Metrology and instruments). — 2015. — № 1. — с/р 3—5.
2. ДСТУ 3989-2000 Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів. (DSTU 3989-2000. Metrology. Calibration of measuring instruments. Basic regulations, organization, procedure and presentation of results).
 3. <http://www.cem.es>.
 4. Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 1. 1998. (Порядок розроблення методик калібрування, Ред. 1. 1998).
 5. EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. December 1999. (EA-4/02. Вираження невизначеності вимірювань при калібруванні, Грудень 1999).
 6. <http://www.gcsms.com.ua>
 7. Ley 3/1985, de 18 de marzo, de Metrología, modificado, BOEs num. 67, de 19 de marzo de 1985 (Закон № 3 від 18 березня 1985 року, про Метрологію, зі змінами. Державні Офіційні Відомості, № 67 від 19 березня 1985 року).
 8. Real Decreto Legislativo 889/2006, de 21 de julio, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida, BOEs num. 183, de 30 de agosto de 2006 (Королівський Законодавчий Декрет №889 від 21 липня 2006 року щодо Державного метрологічного контролю засобів вимірювання, Державні Офіційні Відомості, № 183 від 02 серпня 2006 року).
 9. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. (DSTU ISO/IEC 17025:2006 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories).
 10. РМГ 43-2001. ГСОЕИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». (RMG 43-2001 GSOEI. Application of the Guide to the expression of uncertainty in measurement).
 11. <http://www.vsl.nl>.
 12. OIML D5. Principles for the establishment of hierarchy schemes for measuring instruments. Edition 1982. (МОЗМ Д5 Принципи створення ієрархічних схем для засобів вимірювання. Видання 1982).
 13. OIML D17. Hierarchy schemes for instruments measuring viscosity of liquids. Edition 1987. (МОЗМ Д17. Ієрархічна схема для засобів вимірювання в'язкості рідин. Видання 1987).
 14. Луценко Д., Віткін Л., Основні принципи та підходи до побудови в Україні сучасної метрологічної системи. Метрологія та прилади. (Lutzenko D., Vitkin L. General principles and approaches to the establishing of modern metrology system in Ukraine. Metrology and instruments). — 2012. — № 3. — с/р. 6—15.
 15. Законопроект «Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», реєстраційний №8562-1 від 02.06.2011 року. (Draft Law «The Law of Ukraine «About metrology and metrological activity»).
 16. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», № 1314-VII від 05.06.2014 року. Відомості Верховної Ради, (The Law of Ukraine «About metrology and metrological activity», № 1314-VII of 05.06.2014. The Bulletin of Verkhovna Rada, 2014, № 30, с/р. 1008).

Отримано / received: 26.03.2015.

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

УДК 658.562:681.121

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ВИМІРЮВАННЯМИ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ВУЗЛІВ ОБЛІКУ ГАЗУ

Н. Петришин, кандидат технічних наук, начальник відділу систем управління, ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»

Актуальність впровадження результативних та ефективних систем управління на стадії проектування процесу вимірювання є пріоритетним для успішного вирішення завдання зниження ризику споживача на стадії експлуатації вимірювальної системи.

Вимоги до проектування процесу вимірювання передбачають, що вибір елементів системи та меж контролю повинен бути суміжним із ризиком неспроможності відповідати встановленим вимогам. Науковий підхід для вибору лічильників газу як основного елемента вузла обліку за широкого розмаїття їх типів та типорозмірів є актуальним. Нормативними документами встановлені рекомендації та вимоги щодо вибору лічильників газу з урахуванням особливостей їхньої роботи за наявності окремих впливних факторів. Для вирішення питання вибору лічильників газу застосовано один із вискоєфективних експертних методів теорії систем, а саме метод аналізу ієрархій на базі зворотносиметричної шкали за проведення парних порівнянь елементів. Проведений аналіз для конкретного вузла обліку підтвердив практичну цінність запропонованої методології, яка дає можливість зменшити ризики як газозбутових організацій, так і споживачів від невірогідного обліку природного газу. Застосування системного підходу для керування вимірюваннями на стадії проектування вузлів обліку газу є надійним інструментом забезпечення належної точності та вірогідності вимірювань на стадії їх експлуатації.

Actuality of implementing effective and efficient management systems at the design stage of the measurement process is a priority for the successful solution for lowering of customer's risk during measuring system operation.

Requirements for the design process measurements assume that the choice of system elements and control limits should be related to the risk of failure to meet the requirements. It is important to have the scientific approach for choosing a gas meter as the main element of the measurement especially in a wide variety of types and sizes of those meters. Normative documents established guidelines and requirements for the choosing of gas meters, taking into account the features of their work in the presence of some influential factors. To address the issue of choosing a gas meter used one of the highly efficient expert techniques of systems theory, named as method of hierarchy analysis that based on inversely symmetrical scale during pairwise comparisons of elements. The analysis for particular metering gas station confirmed the practical value of the proposed methodology, which helps reduce the risk of a Gas-Selling Utility organizations and consumers from false gas measuring. At the design stage of metering gas stations a systematic approach for measurement management can be recognized as a reliable tool to ensure adequate accuracy and reliability of measurements at the operation stage of those stations.

Ключові слова: проектування вузлів обліку, лічильник газу, управління вимірюваннями, метод аналізу ієрархій.

Keywords: measuring units design, gas counter, management of measurements, analytic hierarchy process.

Проєктування вузлів обліку природного газу за наявності широкого розмаїття видів, типів і типорозмірів витратовимірювальної техніки, як правило, з ідентичними нормованими метрологічними характеристиками вимагає об'єктивного вирішення питання вибору найкращого (або оптимального) варіанту технічних засобів вимірювальної системи. У першу чергу для газозбутових організацій та їх споживачів ця проблема стосуватиметься вибору типу і типорозміру лічильника газу (для газотранспортних організацій також можливий варіант застосування методу змінного перепаду тиску).

У [1, 2] наведено вимоги до проектування процесу вимірювання, де акцентовано увагу на те, що вибір елементів системи (в нашому випадку лічильників газу) та меж контролю повинен бути суміжним із ризиком неспроможності відповідати встановленим вимогам. Ці елементи та заходи контролю необхідно визначати з урахуванням впливних факторів газового середовища, умов довкілля, застосовуваних приладів



та методів вимірювання, а також особистих навичок оператора.

Загальною вимогою до вимірювальних систем є їхня точність та можливість зменшення випадкових та систематичних похибок до такого рівня, який вимагається контрактними або законодавчими вимогами. Спроектовані на основі такої вимірювальної системи вузли обліку повинні забезпечувати правильне функціонування у всьому діапазоні регламентованих тисків і температур газового середовища, тобто за максимального і мінімального робочих тисків, мінімального тиску на вході вузла обліку, максимальної та мінімальної робочих температур газу та навколишнього середовища. Також повинна враховуватися якість природного газу за рівнем домішок, вологості тощо.

Вимірювальна системи в загальному випадку складається із лічильника газу та коректора з первинними перетворювачами тиску та температури, необхідних для визначення об'ємної кількості переданого газу. Нормативними документами [3–6] встановлено рекомендації та вимоги щодо вибору лічильників газу з урахуванням особливостей їхньої роботи за наявності окремих впливних факторів. До останніх відносять густину газу за робочих умов; наявність твердих домішок, конденсованої рідини в газі; характер зміни потоку газу; його пульсації; перевантаження за максимальної витрати; довжини прямих ділянок до та після лічильника газу; можливість створення небезпечних ситуацій у газопостачанні за відмови лічильника газу. Вплив зазначених факторів на роботу конкретного типу лічильника є різним. Так, наприклад, збільшення густини газу за робочих умов може призводити до зміни мінімальної витрати турбінними лічильниками і збільшує ризики роботи роторних лічиль-

ників. Наявність твердих тіл у газовому середовищі призводить до заклинювання роторів роторних лічильників та пошкодження лопаток у турбінних лічильниках. Цей фактор практично не впливає на роботу ультразвукового лічильника газу. Разом з тим наявність рідини (підвищена вологість газу) може вплинути на роботу ультразвукового лічильника. Також вагомим фактором під час вибору лічильника газу є його вартість, оскільки аналогічні типи імпортованих лічильників, що ввозяться за відповідними правилами, та лічильники власного виробництва мають іноді суттєвий ціновий дисбаланс. Отже, сукупність факторів, що взаємодіють, для визначення способу вибору лічильника газу потребує застосування технологій і методології теорії систем, яка дозволяє нам описати систему та її проблеми в термінах взаємопов'язаної ієрархії з впорядкуванням пріоритетів і вимірюванням відносної інтенсивності взаємодії впливних факторів з метою досягнення цілі.

Одним із методів теорії систем, які успішно можна застосувати за вибору типу лічильника газу у процесі проектування вузла обліку, є метод аналізу ієрархій (MAI) [7]. Суть його полягає в декомпозиції проблеми вибору лічильника газу, як мети поставленої задачі, що є верхнім (вищим) рівнем ієрархії на більш прості складові частини (впливні фактори), які є підсистемами цієї проблеми і містяться на нижчому рівні ієрархії. У спрощеному виді декомпозицію завдання вибору лічильника в ієрархію подано на рис. 1 (розглядаються три найбільш застосовувані лічильники газу і 10 найбільш впливних факторів). На першому рівні міститься вибраний лічильник газу, на другому — впливні фактори, які уточнюють мету, на третьому — три типи лічильників, які оцінюватимуться.

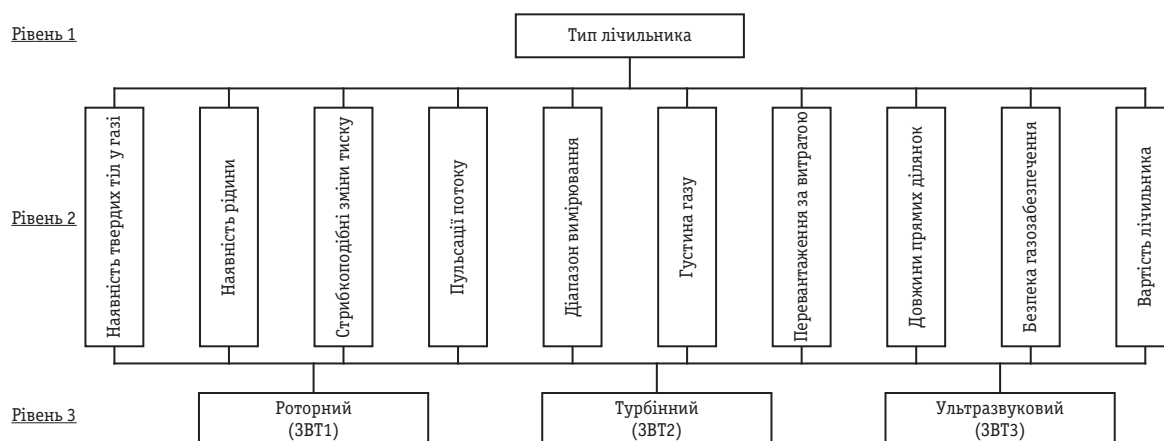


Рис. 1. Декомпозиція проблеми вибору лічильника

Fig. 1. Decomposition of the gas meter choosing problem

Таблиця 1. Шкала відносної важливості
Table 1. The scale of relative importance

Відносна важливість	Визначення
1	Рівна важливість
3	Помірна перевага одного над іншим
5	Суттєва перевага
7	Значна перевага
9	Дуже сильна перевага
2, 4, 6, 8	Проміжне судження між двома сусідніми значеннями
Зворотні величини наведених чисел	Якщо за порівняння одного показника з другим отримано одне із зазначених вище чисел (наприклад, 7), то для порівняння другого показника з першим матимемо зворотну величину (тобто 1/7)

У подальшому на основі закону ієрархічної безперервності впливні фактори попарно порівнюються між собою. Суть попарних порівнянь зводиться до оцінки відносної важливості впливних факторів. З цією метою американським вченим Т.Сааті [7,8] запропоновано зворотносиметричну шкалу, наведену в табл. 1, яка, на думку експертів, є найбільш ефективною для вирішення таких задач.

Згідно з цією шкалою відносна важливість a_{ij} (показника i відносно показника j) може бути подана натуральним числом від 1 до 9 або зворотним числом (тобто в порядку зменшення від 1 до 1/9). Отже, матрицю A попарних порівнянь групових показників для рівня 2 (рис. 1) можна представити у виді табл. 2, або записати у загальному виді як:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де N — кількість групових показників, a_{ij} — відносна важливість показника i відносно показника j . Елементами цієї матриці є числа від 1 до 9 та від 1 до 1/9, причому матриця є квадратичною. Вона має однакову кількість рядків і стовпців, що дорівнює кількості факторів, а також інші корисні характеристики, такі як власні вектори та власні значення.

Відносна важливість факторів оцінюється для кожного конкретного проекту вузла обліку. Так, наприклад, за реконструкції вузла обліку суттєву перевагу матиме фактор довжин прямих ділянок, оскільки простір, який займає вузол, може бути обмеженим. В іншому випадку, розміщення вузла в неопла-

тованому приміщенні надає значну перевагу показнику «підвищена вологість газу», оскільки в зимовий період можливе замерзання конденсату, що спричинить проблеми в роботі роторного або турбінного лічильника газу.

Наступним етапом три типи лічильників попарно порівнюються за відношенням до конкретних впливних факторів.

Аналогічно за допомогою шкали будується також масив матриць попарних порівнянь зразків витрато-вимірювальної техніки (ВВТ) стосовно кожного групового показника $k = 1, 2, \dots, N$, N — кількість показників (табл. 3), що у загальному виді можна подати як:

$$B_k = \begin{bmatrix} b_{11}^k & b_{12}^k & \dots & b_{1M}^k \\ b_{21}^k & b_{22}^k & \dots & b_{2M}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{M1}^k & b_{M2}^k & \dots & b_{MM}^k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де b_{ln}^k — результат попарного порівняння першого та n зразка ВВТ відповідно до k -го показника ($k = 1, 2, \dots, N$); M — кількість зразків ВВТ, що порівнюються (об'єктів аналізу).

Отже, для вибору лічильника газу необхідно побудувати 11 матриць: одну для другого рівня і десять для третього.

Далі для кожної матриці парних порівнянь необхідно вирахувати нормовані власні вектори, які визначають локальні пріоритети. Локальні пріоритети характеризують відносний вплив множини показників на елемент вищого рівня ієрархії. Одним із найкращих шляхів визначення власних векторів є їх

Таблиця 2. Матриця попарних порівнянь для рівня 2 та приклад заповнення

Table 2. Matrix of pairwise comparisons for level 2 and example of filling

Оцінка відносної важливості факторів	Наявність твердих тіл	Наявність рідини	..... (інші фактори)	Вартість лічильника
Наявність твердих тіл	1	1/5	1/n	1/4
Наявність рідини	5	1	.....	.....
..... (інші фактори)	n	.....	1	.....
Вартість лічильника	4	.....	.....	1

Таблиця 3. Матриці попарних порівнянь для рівня 3 та приклад заповнення

Table 3. Matrix of pairwise comparisons for level 3 and example of filling

Наявність твердих тіл	Роторний ЗВТ1	Турб. ЗВТ2	Ул.-зв. ЗВТ3	Підвищена вологість газу	Ротор. ЗВТ1	Турб. ЗВТ2	Ул.-зв. ЗВТ3
Роторний	1	4	1/9	Роторний	1	1/4	1/5
Турбінний	1/4	1	1/5	Турбінний	4	1	1/4
Ультразвуковий	9	5	1	Ультразвук.	5	4	1
..... інші групові показники	Ротор.	Турб.	Ул.-зв.	Вартість лічильника	Ротор.	Турб.	Ул.-зв.
Роторний	1	....	....	Роторний	1	1/4	1/5
Турбінний	....	1	....	Турбінний	4	1	1/3
Ультразвуковий	....	....	1	Ультразвук.	5	3	1

Таблиця 4. Випадкові погодженості

Table 4. Corresponding index of consistency

Розмірність матриці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Випадкова погодженість (W_k)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

геометричне середнє [8—10]. Його отримують шляхом множення елементів у кожному рядку отриманих матриць і добуваючи корінь n -ї степені, де n — число елементів матриці. Для нормалізації результатів отриманих власних векторів до одиниці, їх кожне значення ділять на суму всіх значень і отримують оцінки локальних пріоритетів. Формула для визначення компонентів нормованих власних векторів локальних пріоритетів матиме вид:

$$A_i^k = \frac{\sqrt[L]{\prod_{j=1}^L X_{ij}^k}}{\sum_{i=1}^L \sqrt[L]{\prod_{j=1}^L X_{ij}^k}}; \quad (3)$$

де $X_{ij} = a_{ij}$ для $k = 0$; $L = N$; $i, j = 1, 2, \dots, N$ (тобто для матриць попарних зрівнянь одиничних показників); $X_{ij} = b_{ij}$ для $k = 0$; $L = M$; $i, j = 1, 2, \dots, M$ (тобто для матриць попарних порівнянь зразків ВВТ).

Індекс k , як натуральне число, використовується для позначення номера показника, до якого відноситься величина з цим індексом. Якщо йдеться стосовно порівняння самих показників, індекс $k = 0$.

Для оцінки правильності думок експертів, які оцінюють відносну важливість показників, Т. Сааті в [7] наводить таблицю 4 випадкових погодженостей за умов використання зворотносиметричної шкали 1/9.....9.

Оцінка погодженості думок експертів або погодженість локальних пріоритетів W_k (в кваліметрії так званий коефіцієнт конкордації) [11, 12], сформованих на базі вхідних даних, що ввійшли до матриць A , B_k , визначається як відношення індексу погодженості S_k до випадкової погодженості W_s , вибраної з табл. 4.

$$W_k = \frac{S_k}{W_s}, \quad (4)$$

де $k = 0$ для матриці порівняння групових показників, $k = 1, 2, \dots, N$ — для матриць порівняння зразків ВВТ відносно кожного групового показника.

Індекс погодженості S_k визначається за формулою:

$$S_k = \frac{\lambda_{\max}^k - L}{L - 1}, \quad (5)$$

де: L — розмірність матриці, яка визначається кількістю рядків або стовпчиків: $L = N$ — для матриць A і $L = M$ для матриць B_k .

λ_{\max} — найбільше власне число для відповідної матриці (A або B_k), яке визначається за формулою:

$$\lambda_{\max}^k = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L X_{ij}^k \cdot A_i^k, \quad (6)$$

де використані величини, позначення яких наведені у формулі (3). Іншими словами, індекс погодженості в кожній матриці і для всієї ієрархії можна вирахувати в такій спосіб: спочатку сумується кожний стовпчик суджень, потім сума першого стовпчика множиться на величину першої компоненти нормованого вектора пріоритетів, сума другого стовпчика — на другу компоненту і т.д. Далі отримані числа сумуються і отримуємо величину, яка позначена як λ_{\max} . Якщо всі вираховані за формулою (4) $W_k \leq 0,1$, то вихідна інформація вважається погодженою. В деяких випадках можна допускати $W_k \leq 0,2$, але не більше. Якщо W_k виходить за задані границі, то експертам потрібно переглянути свої судження (відкоригувати) щодо заповнення матриць, оскільки вони є неприпустимо спотвореними.

Заключним етапом МАІ є визначення глобальних (визначальних) пріоритетів для кожного з M зразків ВВТ за формулою:

$$G_n = \sum_{i=1}^N A_i^0 \cdot A_n^i, \quad n = 1, 2, \dots, M, \quad (7)$$

де A_i^0, A_n^i — компоненти нормованих власних векторів локальних пріоритетів, визначених за формулою (3).

Знайдені за формулою (7) глобальні пріоритети для кожного зі зразків ВВТ ранжуються (розміщуються у порядку зростання величин G_n). Отриманий порядок є ранжуванням вибору типу лічильників із зразків, що порівнюється з урахуванням усіх обраних для порівнянь показників.

Практична реалізація МАІ у процесі проектування вузла обліку газу апробована в ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» за розроблення методики виконання вимірювань на стадії введення в експлуатацію вузла обліку газу в Косівському УЕГГ. Завдання полягало у правильності вибору ультразвукового лічильника типу КУРС G100 для виконання вимірювань. Вихідними даними для проектування вузла були:

діапазон тиску газу: $P_{\max} = 0,4$ МПа, $P_{\min} = 0,1$ МПа;

діапазон температур газу: $t_{\min} = 7$ °C; $t_{\max} = 21$ °C;

температура навколишнього середовища: від -5 до $+25$ °C;

діапазон вимірювання об'ємної витрати:

$Q_{\min} = 30$ м³/год, $Q_{\max} = 150$ м³/год;

діаметр трубопроводу: $\Delta = 80$ мм;

довжини прямих ділянок перед лічильником газу і після нього — 252 мм;

густини газу за стандартних умов: $\rho_{\min} = 0,71$ кг/м³;

$\rho_{\max} = 0,71$ кг/м³;

вартості лічильників: роторного G100 — 12680 грн, турбінного G100 — 18700 грн, ультразвукового G100 — 17500 грн.

Газ подається до системи з місцевих родовищ та газотранспортної магістралі, можливе порушення технології очищення та осушування газу, що може призводити до порушення вимог щодо його якості за показниками механічних домішок та точки роси.

Автором сформовано 11 матриць попарних порівнянь для трьох типів лічильників газу, на основі яких за формулами(1), (2) розраховано відносну важливість та компоненти власних векторів локальних пріоритетів, за формулою (3) — глобальні (або визначальні) пріоритети, які відповідно склали: для роторного лічильника — 0,432; для турбінного — 0,486; для ультразвукового — 0,627.

Відтак, вибір типу ультразвукового лічильника КУРС G100 є пріоритетним для виконання вимірювань на зазначеному вузлі обліку газу.

Отже, застосування системного підходу для керування вимірюваннями на стадії проектування вузлів обліку газу є надійним інструментом забезпечення належної точності та вірогідності вимірювань на стадії їх експлуатації.

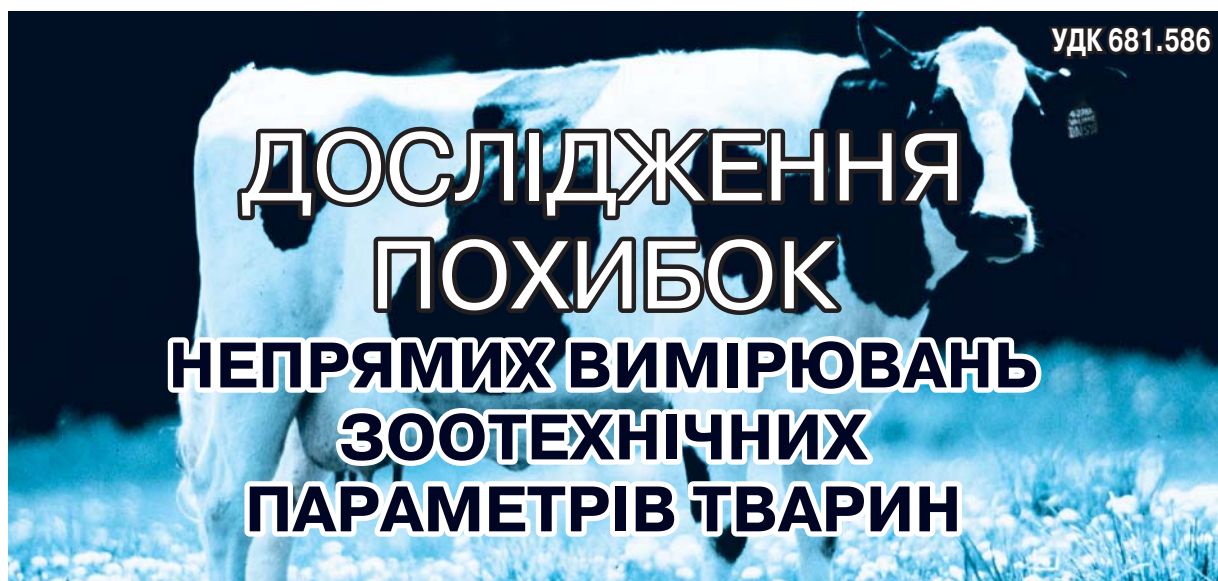
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT). (DSTU ISO 10012:2005 Systemy keruvannja vymirjuvannjam. Vymogy do procesiv vymirjuvannja ta vymirjuval'nogo obladnannja (ISO 10012:2003, IDT)).
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 8 квітня 2009 р. № 332 «Про затвердження Технічного регламенту щодо суттєвих вимог до засобів вимірювальної техніки», — Офіційний вісник України (Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 8 kvitnja 2009 r. № 332 «Pro zatverdzhennja Tehnichnogo reglamentu shhodo tuttjevyh vymog do zasobiv vymirjuval'noi' tekhniki», — Oficijnyj visnyk Ukrainy), 2009 р., № 27, ст. 905; 2012 р., № 3, ст. 85.
3. ДСТУ EN 12261:2006 Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови (EN 12261:2002, IDT). (DSTU EN 12261:2006 Lichyl'nyky gazu turbinni. Zagal'ni tehniczni umovy (EN 12261:2002, IDT)).
4. ISO 17089-1:2010. Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas — Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.
5. ДСТУ EN 12480:2006 Лічильники газу роторні. Загальні технічні умови (EN 12480:2002, IDT). (DSTU EN 12480:2006 Lichyl'nyky gazu roturni. Zagal'ni tehniczni umovy (EN 12480:2002, IDT)).
6. EN 1776:1998 Gas supply systems — Natural gas measuring stations — Functional requirements.
7. Саати Т.К., Кернс К.П. Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, (Saaty T.K., Kerns K.P. Analytycheskoe planirovanye. Organyzacyja system: Per. s angl. — М.: Radyo y svjaz'), 1991. — 224 с/с.
8. Saaty Thomas L. (1980) The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill.
9. Saaty, Thomas L. and Luis G. Vargas (1982) The Logic of Priorities, Boston: Kluwer-Nijhoff.
10. Т. Саати. Принятие решений. Методы анализа иерархий: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, (T. Saaty. Prynjatye reshenyj. Metody analiza yerarhyj: Per. s angl. — М.: Radyo y svjaz'), 1993. — 278 с/с. ■

Отримано / received: 26.12.2014.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І.С. Петришиним (Україна).

Prof. I.S. Petryshyn, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



В. Кучерук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та промислової автоматики,
П. Кулаков, кандидат технічних наук, доцент кафедри,
Т. Гнесь, аспірант кафедри,
Вінницький національний технічний університет,
Є. Паламарчук, кандидат технічних наук, професор кафедри економічної кібернетики,
Вінницький національний аграрний університет

Розглядається використання засобу вимірювання рівня молока на основі фотоелектричного перетворювача для непрямого вимірювання певних зоотехнічних параметрів тварин. Вимірювані зоотехнічні параметри визначаються на основі результатів прямих вимірювань рівня молока та поточного часу. Отримано залежності, на основі яких здійснюється непряме вимірювання зоотехнічних параметрів, вирази для абсолютних похибок непрямих вимірювань, підтверджені результатами експерименту.

In paper shown the using of milk level measuring means in milkreceiving tank of milking unit on the basis of photoelectric

measuring converter. The analytic interdependences were received, owing to that on the basis of direct measuring results of milk level and current time are determined the animal milk yield, average milk intensity, milking time, stock time, milk intensities during first 30, 30-60, 60-90 s from milking start, instant value of milk flow. The analytic expressions were received for indirect measuring absolute error of above animal zootechnical parameters. As a result of experimental study of milk level measuring means the agreement between experimental data and analytic calculations is established. The distribution law of milk level measuring error is approximate to normal. The experimental milk level measuring means ensures more measuring accuracy of zootechnical parameters than known analogs.

Ключові слова: рівень молока, вимірювальний перетворювач рівня, зоотехнічні параметри, машинне доїння.
Keywords: milk level, measuring level converter, zootechnical parameters, mechanical milking.

На сучасних доїльних установках використовують великий асортимент доїльного обладнання, алгоритм роботи якого відповідає фізіологічним механізмам молокоутворення і молоковіддачі тварини та забезпечує наблизений до оптимального режим процесу доїння. Але воно не завжди здатне забезпечити високоточне вимірювання та контроль удою, тривалості доїння, інтенсивності потоку молока, інших зоотехнічних параметрів, необхідних для систем автоматичного управління молочними відділеннями тваринницьких ферм.

У [1] запропоновано оптичний вимірювальний перетворювач інтенсивності потоку молока для доїльного апарата. За його використання неможливо забезпечити високу достовірність контролю зоотехнічних параметрів тварин внаслідок значного впливу на результат піни та пухирів повітря, які обов'язково виникають на виході колектора. За вико-

ристання оптичного кореляційного витратоміра молока, пропонуваного у [2], достовірність контролю зоотехнічних параметрів тварин значно зменшується у разі великих значень молочного потоку та наявності у ньому піни та пухирів повітря. Це зумовлено тим, що вихідні сигнали його фотоприймачів за цих умов втрачають подібність. У випадку застосування ротаційних витратомірів [3] для вимірювання та контролю зоотехнічних параметрів виникає швидке їх забруднення молочним каменем, що призводить до зменшення достовірності контролю, відмов, збільшення бактеріальної заплідненості молока. Використання ультразвукових витратомірів [4] для вимірювання та контролю зоотехнічних параметрів виявилось неефективним внаслідок значного збільшення похибки вимірювання через наявність пухирів та піни, а також великого значення похибки вимірювання за малих потоків молока. Найчастіше,

для вимірювання та контролю зоотехнічних параметрів тварин, на стаціонарних доїльних установках у доїльних залах, використовують ковшовий вимірювальний перетворювач [3]. Але його використання у переносних доїльних апаратах для стійлового молокопроводу неможливе внаслідок певних конструктивних особливостей. Окрім того, він має певну дискретність вимірювального перетворення, що зумовлює значне збільшення похибки за невеликих значень удою. У [5] запропоновано фотоелектричний засіб вимірювання рівня молока, який можна використовувати як на стаціонарних доїльних установках, так і на переносних доїльних апаратах. На основі вимірювальної інформації стосовно рівня молока у молокоприймальній камері доїльного апарата здійснюють вимірювання та контроль цілої низки зоотехнічних параметрів тварин. Зважаючи на це, оцінка точності їх вимірювання, за використання зазначеного засобу, є актуальним завданням. Проведені дослідження стосуються теорії та практики проектування засобів вимірювання та контролю зоотехнічних параметрів тварин для молочних відділень тваринницьких ферм.

Сучасні доїльно-молочні відділення тваринницьких ферм не можуть оптимально функціонувати без систем автоматичного управління технологічним процесом отримання молока, до складу яких входять інформаційно-вимірювальні системи контролю та вимірювання зоотехнічних параметрів тварин. Окрім того, актуальним завданням є модернізація наявних ферм шляхом їх реконструкції та впровадження зазначених систем.

Невід'ємною складовою інформаційно-вимірювальної системи зоотехнічних параметрів тварин є доїльний апарат з функцією керування процесом доїння. За допомогою такого апарата здійснюють ідентифікацію тварини, забезпечують вимірювання та контроль необхідних зоотехнічних параметрів. На основі отриманої вимірювальної інформації реалізують наблизений до оптимального процес доїння, передають інформацію стосовно результатів вимірювання та контролю до сервера інформаційно-вимірювальної системи з метою їх подальшого використання в системі автоматичного управління фермою.

За допомогою розглянутого у [5] засобу вимірювання, що входить до складу доїльного апарата з функцією керування процесом доїння, здійснюють непряме вимірювання удою, інших вторинних зоотехнічних параметрів на основі прямого вимірювання рівня молока у молокоприймальній камері. Окрім того, у [5] проведено аналіз по-

хибки вимірювання рівня молока за використання цього засобу. Під час видоювання тварини вимірюється поточний час. Це дає можливість вимірювати та контролювати важливі зоотехнічні показники тварини, а саме: час доїння; час припуску — часовий інтервал між початком доїння та видоюванням ста грамів молока [6]; інтенсивність молочного потоку протягом перших тридцяти секунд, часових інтервалів від тридцяти до шестидесяти секунд, від шестидесяти до дев'яноста секунд від початку доїння; миттєве значення інтенсивності молочного потоку; середню інтенсивність молочного потоку. Похибки вимірювання цих зоотехнічних параметрів у [5] не розглянуто.

Мета статті — визначення залежностей, які пов'язують зазначені зоотехнічні параметри з рівнем молока, теоретичне та експериментальне дослідження похибок вимірювання певних зоотехнічних параметрів тварин за допомогою засобу вимірювання рівня молока на основі фотоелектричного вимірювального перетворювача, розглянутого у [5].

КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ

Розглянемо конструкцію та принцип дії молокоприймальної камери доїльного апарата з фотоелектричним вимірювальним перетворювачем рівня молока, схематичне креслення якої наведено на рис. 1.

Під дією вакууму, що пульсує, утворюваного за допомогою пульсатора в доїльних стаканах,

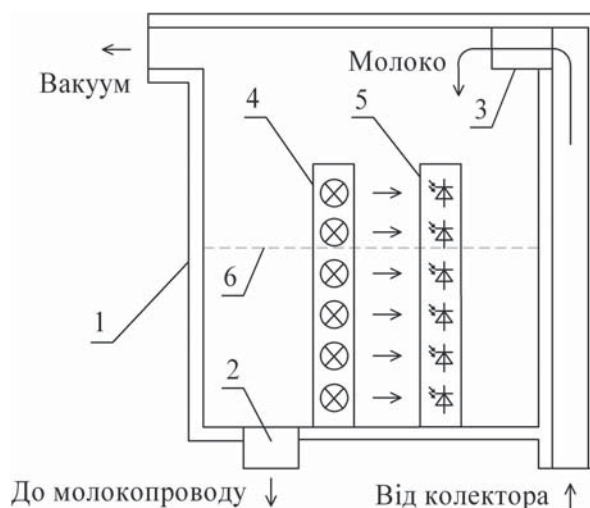


Рис. 1. Схематичне креслення молокоприймальної камери доїльного апарата з фотоелектричним вимірювальним перетворювачем рівня молока: 1 — корпус камери, 2 — зливний електроклапан, 3 — піновідділювач, 4 — інфрачервоні випромінювачі, 5 — фотоприймачі, 6 — рівень молока

Fig. 1. The schematic drawing of milking apparatus milkreceiving tank with photoelectric measuring converter of milk level

молоко з колектора всмоктується через піновіддлювач до молокоприймальної камери. В останній розміщено первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини, до складу якого входять інфрачервоні випромінювачі, фотоприймачі, зливний електроклапан. У процесі доїння рівень молока в молокоприймальній камері збільшується. Після досягнення певного рівня відкривається зливний клапан, і накопичене в камері молоко скидається до загального молокопроводу. Протягом часу видоювання однієї тварини відбувається декілька скидань молока із молокоприймальної камери.

Розглянемо рис. 2, на якому наведено схематичне конструктивне креслення фотоелектричного вимірювального перетворювача рівня молока (а), та структурну схему засобу вимірювання рівня молока на його основі (б).

Первинний фотоелектричний вимірювальний перетворювач рівня молока складається з N фотоприймачів ФП на основі пари фотодіод-операційний підсилювач. Перед фоточутливим шаром фотодіодів розміщено діафрагми прямокутної форми, кожна з яких має ширину D та висоту L . Фотодіоди розміщено так, що рівень верхньої границі діафрагми кожного з них співпадає з рівнем нижньої границі діафрагми наступного фотодіода. У результаті в еквіваленті утворюється діафрагма висотою $N \times L$ та шириною D . Навпроти кожного фотодіода міститься випромінювач з конденсорною лінзою для забезпечення рівномірного світлового потоку на площині фоточутливого шару. Вихідні сигнали фотоприймачів на основі пари фотодіод-операційний підсилювач $U_{F1}, U_{F2}, \dots, U_{FN}$, які прямо пропорційні освітлюваній площі фоточутливого шару фотодіода, надходять на вхід мультиплексора МХ, за допомогою якого здійснюється послідовне під'єднання цих сигналів до входу аналого-цифрового перетворювача

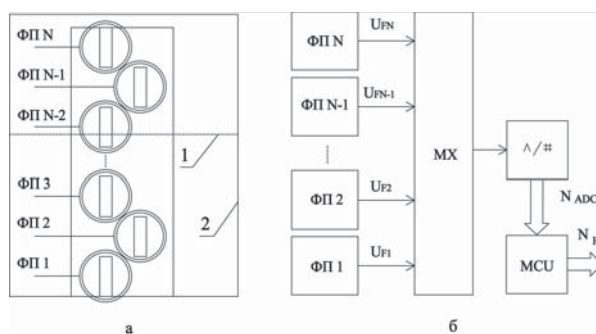


Рис. 2. Засіб вимірювання рівня молока на основі фотоелектричного вимірювального перетворювача:
1 — рівень молока, 2 — корпус камери

Fig. 2. The measuring means of milk level on the basis of photoelectric measuring converter

ча $\wedge / \#$. Результат аналого-цифрового перетворення вихідного сигналу кожного фотоприймача у виді коду N_{ADC} передається до порта введення мікроконтролера MCU. На основі отриманих даних мікроконтролер здійснює розрахунок рівня молока і представляє результат вимірювання у виді коду N_H .

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

За наявності молока у молокоприймальній камері, як впливає із рис. 2, а, діафрагма одного з фотоприймачів, порядковий номер якого m , частково перекрита молоком. Його вихідна напруга перебуває в межах від нуля до максимального значення U_{FMAX} , яке буде на виході фотоприймача за повністю відкритої діафрагми. Тоді у всіх фотоприймачів з номерами від $m+1$ до N діафрагма буде повністю відкрита, а у фотоприймачів з номерами від 1 до $m-1$ — повністю закрита. Значення m визначається програмно, шляхом аналізу вихідних кодів аналого-цифрового перетворювача, відповідних сигналам $U_{F1}, U_{F2}, \dots, U_{FN}$. У такий спосіб рівень молока визначатиметься сумою висот закритих молоком діафрагм фотоприймачів з номерами від 1 до $m-1$ і рівнем закриття діафрагми m — того фотоприймача. У [5] встановлено, що вираз для визначення рівня молока в молокоприймальній камері доїльного апарата має вид:

$$H_M = L - \frac{U_{Fm} r^2}{IS_{I0} R_{ZZ} D} + \sum_{i=1}^{m-1} L = \sum_{i=1}^m L - \frac{U_{Fm} r^2}{IS_{I0} R_{ZZ} D}, \quad (1)$$

де U_{Fm} — вихідна напруга m -того фотоприймача; S_{I0} — інтегральна струмова чутливість фотодіода за немодульованого опромінення; I — сила світла; r — відстань до джерела світла, що освітлюється; R_{ZZ} — опір у колі зворотного зв'язку операційного підсилювача.

Також у [5] отримано вираз, який визначає абсолютну похибку вимірювання рівня молока

$$\Delta_M = \frac{r^2}{IS_{I0} R_{ZZ} D} \left((\Delta I R_{ZZ} + U_{SM} + U_N) \left(1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 R_{IN}} + \frac{1}{K_0} \right) + U_{S R_{ZZ}} \left(\exp \left(\frac{e U_{VD}}{kT} \right) - 1 \right) + U_{Fm} \left(\frac{R_{ZZ}}{K_0 R_{IN}} + \frac{1}{K_0} \right) \right) + \Delta_{VS} + \frac{U_{REF}}{2 \cdot (2^n - 1)}, \quad (2)$$

де ΔI — різниця вхідних струмів операційного підсилювача; U_{SM} — напруга зміщення нуля операційного підсилювача; U_N — напруга шуму на виході фотоприймача, яка залежить від шумових струмів резистора I_{NR} у колі зворотного зв'язку, фотодіода I_{ND} , операційного підсилювача I_{NA} та напруги шуму операційного підсилювача E_{NA} ; K_0 — коефіцієнт передавання; R_{IN} — вхідний опір операційного підсилювача; Δ_{VS} — похибка встановлення, зумовлена відхиленням від вертикалі положення молокоприймальної

камери доїльного апарата, коливанням поверхні молока, наявністю крапель та піни; U_{REF} — опорна напруга, n — розрядність аналого-цифрового перетворювача; I_s — темновий струм фотодіода; e_e — заряд електрона; U_{VD} — падіння напруги на фотодіоді; T — абсолютна температура; k — постійна Больцмана.

Представимо результат вимірювання рівня молока у молокоприймальній камері доїльного апарата у виді суми $H_M \pm \Delta_M$, позначимо через S_M площу дна молокоприймальної камери. Тоді загальний удій тварини визначається виразом

$$V_M = S_M \sum_{i=1}^{N_M} (H_{Mi} \pm \Delta_M) = S_M \sum_{i=1}^{N_M} H_{Mi} \pm S_M N_M \Delta_M, \quad (3)$$

де N_M — кількість порцій молока, скинутих до молокопроводу протягом часу доїння однієї тварини.

Друга складова виразу (3) визначає абсолютну похибку вимірювання удою тварини за проведення одного доїння Δ_V .

З урахуванням того, що похибка вимірювання часового інтервалу незначна, порівняно з іншими складовими, і практично не впливає на результат вимірювання, середня інтенсивність молоковиділення, яка є відношенням удою до часу доїння, визначається за виразом:

$$I_C = (V_M \pm \Delta_V) / T_D = V_M / T_D \pm S_M N_M \Delta_M / T_D, \quad (4)$$

де T_D — час доїння тварини.

Друга складова виразу (4) визначає абсолютну похибку вимірювання середньої інтенсивності молоковиділення Δ_C .

Інтенсивність молоковиділення протягом перших 30 с після початку доїння визначається виразом

$$I_{30} = V_{M30} / T_{30} \pm S_M N_{M30} \Delta_M / T_{30}, \quad (5)$$

де V_{M30} — удій тварини; Δ_{V30} — абсолютна похибка вимірювання удою на 30 с після початку доїння; T_{30} — часовий інтервал тривалістю 30 с; N_{M30} — кількість порцій молока, сформованих станом на 30 с після початку доїння.

Остання складова виразу (5) визначає абсолютну похибку вимірювання інтенсивності молоковиділення протягом 30 с після початку доїння Δ_{I30} .

Відповідно інтенсивності молоковиділення протягом часових інтервалів від 30 до 60 і від 60 до 90 с після початку доїння визначаються виразами:

$$I_{60} = (V_{M60} - V_{M30}) / T_{30} \pm S_M \Delta_M (N_{M60} - N_{M30}) / T_{30}, \quad (6)$$

$$I_{90} = (V_{M90} - V_{M60}) / T_{30} \pm S_M \Delta_M (N_{M90} - N_{M60}) / T_{30}, \quad (7)$$

Абсолютні похибки вимірювання інтенсивностей молоковиділення на часових інтервалах від 30 до 60 і від 60 до 90 с після початку доїння Δ_{I60} і Δ_{I90} визначаються другими складовими виразів (6) і (7).

Миттєва інтенсивність молоковиділення визначається як перша похідна удою за часом, часовий інтервал цифрового диференціювання у цьому випадку значно менший від часу, за який у молокоприймальній камері формується порція молока. Позначимо через H_{M1} , H_{M2} рівні молока у камері в моменти часу t_1 , t_2 . Тоді вираз, за яким визначається миттєва інтенсивність молоковиділення

$$I_M = S_M (H_{M2} - H_{M1}) / (t_2 - t_1) \pm 2\Delta_M / (t_2 - t_1), \quad (8)$$

Остання складова виразу (8) визначає абсолютну похибку вимірювання миттєвої інтенсивності молоковиділення Δ_{IM} .

Важливим зоотехнічним параметром тварини є час припуску молока. У середньому, якщо тварина не тугодійна, не хвора, не перебуває у стані стресу та якісно підготована доярком до доїння, протягом 20 с після початку доїння її мінімальний удій повинен складати 100 г молока [7–9]. Об'єм молокоприймальної камери доїльного апарата значно перевищує об'єм, який відповідає 100 г молока, тобто $N_M = 1$. Зважаючи на це, справедливий вираз

$$V_{M100} = S_M H_{M100} \pm S_M \Delta_M, \quad (9)$$

де V_{M100} — об'єм молока, H_{M100} — рівень молока у молокоприймальній камері, який відповідає 100 г його ваги.

Остання складова виразу (9) визначає абсолютну похибку Δ_{V100} вимірювання значення V_{M100} .

Алгоритм контролю часу припуску молока полягає у такому. Через 20 с після початку доїння здійснюється вимірювання об'єму молока у молокоприймальній камері. Якщо вимірене у цей момент часу значення об'єму більше або дорівнює V_{M100} , вважається, що час припуску відповідає нормі.

Розглянемо можливість спрощення виразу (2). Різниця вхідних струмів ΔI для сучасних операційних підсилювачів складає одиниці нА, а напруга зміщення U_{SM} — одиниці мВ. За умов $U_F \gg U_{SM}$ та $I_{VD} \gg \Delta I$, значеннями U_{SM} та ΔI можна знехтувати. За використання елементної бази з низьким рівнем шумів, шумовою складовою U_N виразу (2) також можна знехтувати. Внаслідок малого значення темнового струму сучасних фотодіодів, що складає одиниці нА, можна вважати, що $I_s \approx 0$. Вхідний опір сучасних операційних підсилювачів складає десятки або сотні МОм, що значно перевищує опір R_{ZZ} у колі зворотного зв'язку та внутрішній опір фотодіода. Коефіцієнт передавання сучасних операційних підсилювачів також дуже високий. Зважаючи на це, справедливий вираз

$$\lim_{\substack{K_0 \rightarrow \infty \\ R_{IN} \rightarrow \infty}} \left(\frac{R_{ZZ}}{K_0 R_{IN}} + \frac{1}{K_0} \right) = 0. \quad (10)$$

За використання аналого-цифрового перетворювача з великою кількістю розрядів вихідного коду, похибка квантування значно менша від похибки встановлення, виникнення якої зумовлено відхиленням від вертикалі положення молокоприймальної камери доїльного апарата, коливанням поверхні молока, наявністю крапель та піни, іншими випадковими факторами, серед яких неможливо визначити домінуючий. Внаслідок цього, основною складовою похибки вимірювання рівня молока є похибка встановлення, розподіл абсолютної похибки вимірювання рівня молока у молокоприймальній камері доїльного апарата за використання фотоелектричного перетворювача рівня можна прийняти за нормальний.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження експериментального зразка переносного доїльного апарата для стійлової доїльної установки з фотоелектричним перетворювачем рівня проводилися в СТОВ «Колос» (с. Капустяни, Тростянецького району Вінницької області). Експериментальні доїння здійснювали у групі із сорока восьми тварин за допомогою трьох доїльних апаратів, один із яких експериментальний, решта — стандартні доїльні апарати УДМ.05.000 виробництва ВАТ «Брацлав» з механічним попарним пульсатором без функції керування процесом доїння. Під час досліджень проведено чотириста вісімдесят доїнь різних тварин у групі за допомогою експериментального зразка доїльного апарата, тобто за його допомогою видоювали третину всіх тварин групи протягом 15 ранкових та 15 вечірніх доїнь. Результати вимірювань удою, отримані за допомогою експериментального зразка доїльного апарата, порівнювали з результатами, отриманими за допомогою приладу для проведення контрольних доїнь ИУ-1, виробництва ВАТ «Брацлав», які вважали дійсним значенням вимірюваної величини. У результаті досліджень встановлено, що закон розподілу похибки вимірювання рівня молока, у відповідності з критерієм згоди Пірсона [10], наближений до нормального. Максимальна відносна похибка вимірювання удою

не перевищує 6 %, відносне середньоквадратичне значення (СКЗ) похибки вимірювання удою складає 2,7 %. Відносні СКЗ похибок вимірювань середньої інтенсивності та інтенсивності молочного потоку протягом перших 30 с від початку доїння складають 3,1 %, миттєвої інтенсивності молочного потоку — 4,2 %, часу припуску — 2,6 %, інтенсивностей молочного потоку протягом часових інтервалів від 30 до 60 і від 60 до 90 с від початку доїння — 7,2 %. Експериментально встановлені значення максимальної відносної похибки вимірювання удою за допомогою аналогічних засобів [1, 2] складають 9–15 %, залежно від ступеня піноутворення.

ВИСНОВКИ

1. Отримано залежності, за допомогою яких, за використання засобу вимірювання рівня з фотоелектричним вимірювальним перетворювачем, на основі результатів прямих вимірювань рівня молока у молокоприймальній камері доїльного апарата та поточного часу, визначаються удій тварини; середня інтенсивність молочного потоку; час доїння; час припуску; інтенсивності молочного потоку протягом перших 30 с, часових інтервалів від 30 до 60, від 60 до 90 с від початку доїння; миттєве значення інтенсивності молочного потоку.

2. Отримано аналітичні вирази для абсолютних похибок непрямих вимірювань разового удою; середньої інтенсивності молочного потоку; удою, який відповідає часу припуску; інтенсивностей молочного потоку протягом перших 30 с, часових інтервалів від 30 до 60, від 60 до 90 с від початку доїння; миттєвого значення інтенсивності молочного потоку.

3. У результаті експериментальних досліджень засобу вимірювання рівня молока з фотоелектричним вимірювальним перетворювачем встановлена відповідність експериментальних даних отриманим аналітичним розрахункам. Закон розподілу похибки вимірювання рівня молока наближений до нормального. Експериментальний засіб вимірювання рівня молока забезпечує більш високу точність вимірювання зоотехнічних параметрів, ніж відомі аналоги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Кучерук В.Ю. Датчик інтенсивності молоковіддачі переносного доїльного апарата для стійлового молокопроводу [Текст] / В.Ю. Кучерук, П.І. Кулаков, Є.А. Паламарчук, Т.В. Гнесь // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Kucheruk V.Y., Kulakov P.I., Palamarchuk E.A., Gnes T.V. Milking intensity sensor of portable milking machine for stabling milking farm. Measuring and computing equipment in industrial processes). — 2013. — №3. — с/р. 44—48.
2. Каталог продуктів и услуг ДеЛаваль [Текст] (Catalogue of products and services DeLaval), 2011. — 372 с/р.
3. Цой Ю.А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм [Текст] / Ю.А. Цой. — М. : ГНУ ВИЭСХ (Tsoy Y. A. Processes and

- equipment of milk departments of farms. — М.: GNU VIESH), 2010. — 424 с/р.
4. Залманзон Л. А. Микропроцессоры и управление потоками жидкости и газа [Текст] / Л. А. Залманзон. — М.: Наука (Zalmanzon L. A. Microprocessors and control of the liquid and gas flow. — М.: Nauka), 1984. — 320 с/р.
 5. Кучерук В.Ю. Засіб вимірювання рівня молока для переносного доїльного апарата стійлової установки [Текст] / В.Ю. Кучерук, П.І. Кулаков, Є.А. Паламарчук, Т.В. Гнесь // Восточно-европейский журнал передовых технологий (Kucheruk V.Y., Kulakov P.I., Palamarchuk E.A., Gnes T. V. Means of milk level measuring for portable farmyard milking machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies). — 2014. — № 3/9 (69). — с/р. 16—22.
 6. Де Монмоллен Н. Системы «человек-машина» [Текст] / Н. Де Монмоллен. — М.: Мир (De Monmollen N. The «man-machine» systems. Mir), 1973. — 256 с/р.
 7. Голиков А.Н. Новое в физиологии и нервной системе сельскохозяйственных животных [Текст] / А.Н. Голиков, Е.И. Любимов. — М.: Колос (Golikov A.N., Lyubimov E. I. New in the physiology and nervous system of the farm animals. — М.: Kolos), 1977. — 110 с/р.
 8. Грачев И. И. Физиология лактации сельскохозяйственных животных [Текст] / И. И. Грачев, В. П. Ланцев. — М.: Колос (Grachev I. I., Lantsev V. P. Lactation physiology of farm animals. — М.: Kolos), 1974. — 280 с/р.
 9. Вальдман Э.К. Физиология машинного доения коров [Текст] / Э.К. Вальдман. — М.: Колос (Valdman E.K. Physiology of machine milking of the cows. — М.: Kolos), 1977. — 192 с/р.
 10. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст]: произв. изд. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — Л.: Энергоатомиздат (Novickiy P.V., Zograf I. A. Estimation of errors of measurement results. Energoatomizdat), 1991. — 304 с/р. ■

Отримано / received: 12.02.2015

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



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Львівська політехніка»
Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології

Перший науковий семінар
«Кібер-фізичні системи: досягнення та виклики»
25—26 червня 2015р., Львів

Голова наукового семінару

Мельник А.О. — д.т.н., професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин
Національного університету «Львівська політехніка»

Напрями роботи семінару:

- Засоби взаємодії з фізичним світом.
- Засоби збору та доставки інформації в КФС.
- Засоби опрацювання інформації в КФС.
- Засоби прийняття рішень в КФС.
- Засоби персонального сервісу КФС.
- Організація інформаційної взаємодії між рівнями КФС.
- Захист інформаційної взаємодії в КФС.
- Наноструктуровані елементи у КФС.
- Вимірювально-обчислювальні засоби КФС.
- КФС контроль та управління виробництвом зернових культур.
- Метрологія в КФС.

Кращі доповіді, представлені на семінарі, будуть рекомендовані для публікації в розширеному виді у англомовному журналі "Advances in Cyber-Physical Systems" та у Віснику Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», який входить до переліку фахових видань України.

Адреса Оргкомітету:

Кафедра ЕОМ, к.503, 5 навч. корпус, Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013.

Тел: (+380) 32 258-2196.

Електронна пошта: cpsac2015@gmail.com

Веб сайт: <http://kfs.lp.edu.ua>

ХАРКІВСЬКА ФІЛІЯ ДП «УкрНДНЦ»

Харківська філія ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» проводить підвищення кваліфікації державних повірників, повірників метрологічних служб підприємств та організацій, фахівців калібрувальних, випробувальних та вимірювальних лабораторій, метрологічних служб підприємств, а також спеціалістів, які працюють у напрямках стандартизації, сертифікації та управління якістю. Після успішного закінчення курсу слухачі отримують посвідчення чи посвідчення з сертифікатом ДП «УкрНДНЦ».

План набору слухачів на 2015 рік

Ч/ч	Курс	Період навчання
	1. Підвищення кваліфікації фахівців повірників та калібрувальних лабораторій з повірки та калібрування засобів вимірювальної техніки за видами вимірювань:	
1.1	геометричних величин	07.12 — 18.12
1.1.1	спеціалізованих засобів вимірювань геометричних величин на залізничному транспорті	07.12 — 11.12
1.1.2	колієвимірювальних шаблонів	07.12 — 11.12
1.1.3	шаблонів вагонного господарства	07.12 — 11.12
1.2	механічних величин	18.05 — 29.05; 15.06 — 26.06
1.2.1	маси	18.05 — 22.05
1.3	параметрів потоку, витрат, рівня та об'єму речовин	15.06 — 26.06
1.3.1	маси, об'єму, місткості та витрати	15.06 — 26.06
1.3.2	маси, об'єму, місткості	15.06 — 26.06
1.3.3	об'єму, місткості	15.06 — 26.06
1.4	температури, тиску, витрати	18.05 — 29.05; 15.06 — 26.06; 09.11 — 20.11
1.4.1	температури, тиску	18.05 — 29.05; 15.06 — 26.06; 09.11 — 20.11
1.4.2	тиску	09.11 — 13.11
1.5	електричних величин	21.09 — 02.10
1.5.1	електричних величин на залізничному транспорті	21.09 — 25.09
1.6	радіотехнічних величин	21.09 — 02.10
1.6.1	радіотехнічних величин на залізничному транспорті	21.09 — 25.09
2. Підвищення кваліфікації фахівців за курсами:		
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві	30.06 — 10.07; 19.10 — 30.10
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві (з д/р)	30.06 — 03.07; 19.10 — 23.10
2.2	Метрологічна експертиза технічної документації	30.06 — 10.07; 19.10 — 30.10
2.3	Забезпечення єдності вимірювань в закладах охорони здоров'я	25.05 — 29.05
2.4	Забезпечення єдності вимірювань ВК ВІС та АСК ТП. Метрологічний контроль ВК	30.06 — 10.07; 19.10 — 30.10
2.5	Забезпечення єдності вимірювань в калібрувальних та вимірювальних лабораторіях	30.06 — 03.07; 07.12 — 11.12; 19.10 — 23.10
2.5.1	Забезпечення відповідності калібрувальних та вимірювальних лабораторій критеріям атестації в ДМС, підготовка до атестації	30.06 — 03.07; 19.10 — 23.10; 07.12 — 11.12
2.6	Забезпечення єдності вимірювань при проведенні контролю колісних транспортних засобів	06.07 — 10.07
2.6.1	Забезпечення єдності вимірювання димності відпрацьованих газів двигунів автомобілів згідно з ДСТУ 4276:2004	06.07 — 10.07;
2.7	Забезпечення єдності вимірювання та обліку витрат енергоносіїв	30.11 — 04.12;
2.7.1	Забезпечення обліку якості та кількості вугілля при прийманні на підприємствах	у міру комплектування, 1 тиждень
2.7.2	Забезпечення єдності вимірювання та обліку витрати природного газу	30.11 — 04.12;
2.7.3	Основні методи та засоби вимірювання витрати та кількості газу на підприємствах постачання газу споживачам. Калібрування та повірка ЗВТ	30.11 — 04.12;
2.8	Розробка та атестація методик виконання вимірювань. Оцінка похибки та невизначеності вимірювань	09.11 — 13.11
2.9	Технічне регулювання в Україні	02.05 — 05.06; 08.06 — 12.06; 14.09 — 18.09
2.10	Розробка і впровадження систем управління якістю	02.05 — 05.06; 22.06 — 26.06; 26.10 — 30.10
2.10.1	Забезпечення функціонування систем управління якістю та проведення внутрішнього аудиту	02.05 — 05.06; 22.06 — 26.06; 26.10 — 30.10
2.11	Стандартизація, розробка та впровадження нормативних документів	02.05 — 05.06; 08.06 — 12.06; 14.09 — 18.09
2.12	Тепловізійні вимірювання. Тепловізійні методи контролю і діагностика	23.11 — 27.11; 07.12 — 11.12
2.13	Проведення вимірювань та випробувань електротехнічними лабораторіями	07.12 — 11.12
2.14	Внутрішній аудит в лабораторіях за ДСТУ ISO/IEC 17025:2006	18.05 — 22.05; 02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
2.15	Вимоги до калібрувальних та випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Внутрішній аудит в лабораторіях	18.05 — 22.05; 02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
2.15.1	Вимоги до калібрувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань.	18.05 — 22.05; 02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
2.15.2	Вимоги до випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань.	18.05 — 22.05; 02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
3. Тематичні семінари:		
3.1	Особливості забезпечення єдності вимірювань в сучасних умовах. Нова редакція Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність».	08.04 — 09.04; 01.07 — 02.07; 21.10 — 22.10
3.2	Стандартизація. Актуальні питання сьогодення. Нова редакція Закону України «Про стандартизацію».	02.05 — 05.06; 15.09 — 16.09
4. Підготовка кандидатів в аудитори:		
4.1	Підготовка кандидатів в аудитори з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (1-й модуль)	08.06 — 13.06; 14.09 — 19.09
4.2	Підготовка кандидатів в аудитори з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (2-й модуль)	у міру комплектування, 4 дні

Заявки на навчання надсилати на адресу Харківської філії ДП «УкрНДНЦ», електронну адресу або факсом.

Комплектування додаткових груп проводиться на замовлення підприємств. За вимогою підприємств надсилаємо інформаційні листи з тематикою окремих курсів навчання.