

Вимірюйте  
усе доступне вимірюванню  
й робіть недоступне вимірюванню  
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

# Метрологія



# та прилади

№ 3(41), 2013

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**

**Засновники:**

Академія метрології України,  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки,  
ТОВ видавничо-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.  
Крюков О. М., д. т. н., проф.  
Кузьменко Ю. В.  
Маловик К. М., к. т. н., доц.  
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.  
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.  
Несємаков П. І., к. т. н.  
Петришин І. С., д. т. н., проф.  
Радев 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. Г., к. т. н., доц.  
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

**Редакційна група:**

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

Журнал **рекомендовано до друку**  
вченою радою Харківського  
національного університету  
радіоелектроніки  
(протокол №23 від 05.07.2013)

**Видає ВКФ «Фавор»**

**Адреса редакції:**

61002, Харків,  
вул. Миросицька, 40; кімн. 3.  
Тел./факс: (057) 752-00-69, 752-00-89  
E-mail: mp@metrology.kharkov.ua  
<http://www.metpriladi.com/>

Підписано до друку 06.07.2013.  
Формат 60×84/8. Папір крейдований.  
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.  
Друк офсетний. Тираж 450 прим.  
Замовлення № 19

© «Метрологія та прилади», 2013

**20** травня світове метрологічне співтовариство  
дев'ятий раз відзначило своє професійне  
свято — Всесвітній день метрології. Дату свята обрано  
невипадково. Саме в цей день 1875 року представники  
17 держав світу, які зібралися в Парижі на Міжнародній  
дипломатичній конференції «для забезпечення єдності  
та удосконалення метричної системи», ухвалили  
Метричну Конвенцію (МК), а для координації дій країн-  
членів МК заснували Міжнародне бюро з мір і вагів (BIPM),  
а згодом — і Міжнародне бюро законодавчої метрології  
(BIML).

Директори цих двох світових метрологічних  
організацій, — Мартін Мілтон і Стівен Патерей, —  
за традицією, що склалася останніми роками, напередодні  
свята звернулися до метрологів світу з посланням, обравши  
його темою «Вимірювання у повсякденному житті».

Вітчизняним метрологам з нагоди свята своє звернення  
направив Міністр економічного розвитку і торгівлі  
України І. М. Прасолов. У ньому, зокрема, Міністр щиро  
привітав керівників і колективи державних підприємств  
та установ, що належать до сфери управління  
Мінекономрозвитку, з професійним святом — Всесвітнім  
днем метрології, побажав усім «міцного здоров'я, нових  
професійних звершень, подальших творчих успіхів, нових  
досягнень та процвітання, добробуту та плідної праці на  
благо України».

## МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

Звернення директорів Міжнародного бюро законодавчої метрології (BIML) Стівена Паторея та Міжнародного бюро з мір і вагів (BIPM) Мартіна Мілтона з нагоди Всесвітнього дня метрології 2013  
Вимірювання у повсякденному житті.....3

Неєжмаков П.

23-є засідання комітету COOMET  
11-е засідання ОКЕ.....4

Купко В.

Засідання ТК 1.5 «Довжина і кут» COOMET.....6

Рожнов М., Гаврилкін В., Мельник Д.

Засідання ТК 1.8 «Фізико-хімія» COOMET.....6

## ЕТАЛОННА БАЗА

Довженко Я., Склярів В.

Визначення вимог до метрологічних характеристик вимірювальних пристроїв і конструкторських рішень деяких вузлів еталонів твердості.....7

## МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Васянович А., Данаїлов М., Мачехін Ю., Старчевський Ю.

Розвиток частотної метрології в оптичному діапазоні.....12

Пожарський С.

Координатний метод визначення радіуса секторної циліндричної поверхні.....20

## ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Сурду М., Ламеко О., Панич О., Швець Т.

Аналіз джерел похибок логарифмічних вимірювань параметрів імпедансу.....23

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Гусельников В., Борисенко Є.

Експериментальна установка для дослідження роботи ультразвукових рівнемірів за різних умов.....30

## ПОВІРКА ТА КАЛІБРУВАННЯ

Малецька О., Москаленко М.

Проведення калібрування ЗВТ з оцінкою невизначеності вимірювань.....35

## НОРМАТИВНА БАЗА

Величко О., Гордієнко Т.

Нормативне забезпечення європейських директив на засоби вимірювання: поточний стан та подальший розвиток.....39

## НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

Попов В., Гудошник В., Хорло Н.

Щодо деяких проблем моніторингу напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд із застосуванням магнітної структуроскопії.....47

## ОБЛІК ЕНЕРГОНОСІЇВ

Євтух П., Бабюк С.

Компенсація систематичних похибок у задачах обліку електроенергії.....52

## ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ

Євдокименко Ю., Нарєжний О., Світенко М.

Кореляційно-екстремальний метод вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами.....57

## ГАЗОВИЙ АНАЛІЗ

Козубовський В., Федак М.

Проблеми упровадження у виробництво і побут пожежних газових сповіщувачів.....61

## ВІТАЄМО ЮВІЛЯРІВ

До 55-річчя Олега Миколайовича Величка.....71

## ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ

План набору слухачів на II півріччя 2013 року.....72

## ІНФОРМАЦІЯ

.....5, 11, 46, 60

## INTERNATIONAL COOPERATION

Message from the Director of the BIML Stephen Patoray and from the Director of the BIPM Martin Milton dedicated to the World Metrology Day 2013  
Measurements in daily life

Neiezhmakov P.

23 Meeting of COOMET Committee  
11 Meeting of Joint Committee of Metrological Standards

Kupko V.

TC 1.5 COOMET «Length and Angle» Meeting

Rozhnov M., Gavrylkin V., Melnyk D.

TC 1.8 COOMET «Physical Chemistry» Meeting

## MEASUREMENT STANDARD BASE

Dovzhenko Ya., Skliarov V.

Determining the requirements for metrological characteristics of measuring instruments and engineering solutions to some units of hardness primary standards

## METHODS AND PROCEDURES

Vasianovych A., Danailov M., Machehin Yu., Starchevskiy Yu.

Development of frequency metrology in the optical range

Pozharskiy S.

Coordinate method for determination of radius of sectoral cylindrical surface

## ERRORS AND UNCERTAINTY

Surdu M., Lameko O., Panych O., Shvets T.

Analysis of errors' sources of the logometric meters of the impedance parameters

## EXPERIMENTAL RESEARCHES

Guselnikov V., Borysenko Ye.

Experimental Apparatus for Research of Ultrasonic Level Meters Operation in Various Conditions

## VERIFICATION AND CALIBRATION

Maletska O., Moskalenko M.

Calibration of measuring instruments with assessment of uncertainty of measurement

## NORMATIVE BASE

Velychko O., Gordiyenko T.

Regulatory Provision of European Directive for Measuring Tools: Current Status and Further Development

## NONDESTRUCTIVE CONTROL

Popov V., Gudozhnyk V., Horlo N.

Some issues of monitoring the stress-strain state of metal framework of lifting equipment using magnetic structurescopy

## ENERGY SOURCE ACCOUNTING

Yevtukh P., Babyuk S.

Systematic errors compensation in the electric power accounting tasks

## MILITARY METROLOGY

Yevdokymenko Yu., Nariezhnii O., Svitenko M.

Correlation-extreme method of measurement of the angle of phase shift between the two harmonic signals

## GAS ANALYSIS

Kozubovskiy V., Fedak M.

Problems of application in production and life the gas-sensing fire detector

## WELCOME

To the 55th anniversary of O. M. Velychko

## TRAINING EXPERTS

State Enterprise for Year 2013

## INFORMATION



**ЗВЕРНЕННЯ ДИРЕКТОРІВ МІЖНАРОДНОГО БЮРО ЗАКОНОДАВЧОЇ  
МЕТРОЛОГІЇ (BIML) СТІВЕНА ПАТОРЕЯ  
ТА МІЖНАРОДНОГО БЮРО З МІР І ВАГІВ (BIPM)  
МАРТІНА МІЛТОНА**



**З НАГОДИ ВСЕСВІТНЬОГО ДНЯ МЕТРОЛОГІЇ 2013**

**ВИМІРЮВАННЯ У ПОВСЯКДЕННОМУ ЖИТТІ**

**Н**а мить уявіть звичайний день, наприклад, учора. Скільки разів ви робили щось, що потребує вимірювання? Ви навряд чи задалися б цим питанням, але задумайтесь. Ви дивитися на годинник (вимірюєте час), купуєте їжу або продукти (вимірюєте вагу), заправляєте свій автомобіль (вимірюєте об'єм) або користуєтесь тонометром (вимірюєте тиск)? Ці види діяльності нашого повсякденного життя, разом із незчисленними іншими, пов'язані з вимірюваннями; ми так звикли до цього, що приймаємо як само собою зрозуміле.

Існують різні аспекти застосування цих вимірювань. Ми приймаємо рішення, засновані на їх результатах, наприклад, у момент натискання на педаль гальма в автомобілі, коли швидкість перевищує обмеження, або скорочуємо кількість солодкого у раціоні, якщо наш рівень цукру в крові є дуже високим. Ціна багатьох наших покупок розраховується виходячи із вимірювань — електрики, води, продуктів харчування, палива, якщо згадувати лише декілька.

Вас може здивувати те, наскільки є важливими точні вимірювання у Вашому повсякденному житті. Іноді ми свідомо думаємо про це, але часто вимірювання є такою невід'ємною частиною нашого життя, що ми покладаємося на них неусвідомлено. Тим



не менше, роль сучасних технологій у нашому житті є настільки великою, що точність і надійність вимірювань потребує постійного удосконалювання. Однак, можливо, лише безпосередні учасники вимірювань знають, наскільки наш сучасний високотехнологічний світ спирається на міжнародну систему, яка, у свою чергу, гарантує надійність потрібних нам вимірювань.

Як директорів двох світових метрологічних організацій (BIML і BIPM), наша мета об'єднатися і працювати разом з Вами для підвищення обізнаності стосовно важливої ролі, яку відіграє метрологія у нашому житті. 20 травня, у річницю підписання Метричної Конвенції у 1875 році, світове метрологічне співтовариство відзначає Всесвітній день метрології. У 2013 році ми обрали тему «Вимірювання у повсякденному житті», для того щоб звернути увагу на вплив вимірювань, з яким ми, громадяни, стикаємося щодня.

Приєднуйтеся до нас у святкуванні Всесвітнього дня метрології 2013 року.

Ми запрошуємо членів метрологічного співтовариства відзначити цю важливу дату разом з нами і допомогти тим, хто нас оточує, визнати внесок міжурядових і національних організацій, які працюють на загальне благо протягом року. ▀



## 23-Є ЗАСІДАННЯ КОМІТЕТУ COOMET 11-Є ЗАСІДАННЯ ОКЕ

**П. Неєжмаков**, Віце-президент COOMET, перший заступник Генерального директора з наукової роботи, ННЦ «Інститут метрології», м. Харків

З 4 по 6 червня у Нижньому Новгороді (Російська Федерація) відбулися 23-є засідання Комітету COOMET та 11-е засідання Об'єднаного комітету з еталонів (ОКЕ).

Під час засідання ОКЕ відбувся обмін думками стосовно діяльності Технічних комітетів (ТК) під час звітного періоду та завдань на наступний рік. Віце-президент COOMET, член Комітету COOMET від України П.Неєжмаков зробив доповідь щодо нових вимог Об'єднаного комітету регіональних метрологічних організацій та Міжнародного бюро з мір і вагів (JCRB) з організації та проведення міжрегіональних експертиз калібрувальних та вимірювальних можливостей (СМС).

Обговорено зміни до Рекомендації COOMET з проведення внутрішньорегіональної експертизи СМС, стан проведення регіональних звірень, у тому числі проблемні питання щодо завершення робіт у рамках теми COOMET «Звірення національних еталонів одиниць електричної ємності та тангенса кута втарт». Голова підкомітету 4.2 «Інформаційні ресурси» В. Бугаєв надав інформацію щодо розроблення та апробації інтернет-версії Програми звірень COOMET. Значну увагу приділено питанням, пов'язаним із розробленням і визнанням стандартних зразків складу та властивостей речовин та матеріалів, формою та змістом сертифіката COOMET.

У роботі 23-го засідання Комітету COOMET взяли участь його члени, голови ТК і представни-

ки національних секретаріатів COOMET з 12 країн (Азербайджану, Білорусі, Вірменії, Німеччини, Казахстану, Киргизстану, Литви, Росії, Словаччини, Таджикистану, Узбекистану, України), керівники міжнародних і національних метрологічних організацій.

Розглянуто 19 питань порядку денного.

Інститут метрології Боснії та Герцоговини прийнято до COOMET як асоційованого члена.

Значну увагу приділено проведенню звірень еталонів НМІ країн-учасниць COOMET. Відзначено, що зберігається тенденція збільшення загальної кількості опублікованих в KCDB СМС-рядків країн-учасниць COOMET.

За результатами обговорення доповіді П. Неєжмакова — Віце-президента COOMET, відповідально-го за взаємодію з JCRB, стосовно діяльності JCRB і рішень, пов'язаних із виконанням CIPM MRA щодо





організації та проведення звірень, підготовки СМС, проведення регіональної та міжрегіональної експертизи СМС, участі COOMET у міжрегіональній експертизі СМС-рядків інших RMO ухвалено ряд документів, що сприятимуть підвищенню якості проведення внутрішньорегіональних і скороченню термінів міжрегіональних експертиз СМС-рядків.

Секретарем ТК «Форуму якості» Е. Кромковою надано інформацію щодо робіт з організації та проведення зовнішніх перевірок (peer review) систем менеджменту якості (QMS) у НМІ як необхідної складової виконання CIPM MRA. Наразі у рамках Форуму якості співробітничать 22 НМІ з 18 країн-учасниць COOMET. У звітному періоді успішно пройшли перевірку своїх QMS уперше — НИСМ (Молдова), удруге — ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» та INIMET, CENTIS-DMR, CPHR (Куба).

Затверджено нових голів ТК COOMET: ТК 2 «Законодавча метрологія» П.Ульбіга (РТВ, Німеччина), ТК 5 «Спільні наукові дослідження у галузі метрології» К.-Д.Зоммера (РТВ, Німеччина).



За великий особистий внесок у діяльність COOMET активних учасників співробітництва удостоєно Почесного звання «Заслужений метролог COOMET», зокрема, з України директора Наукового центру просторово-часових вимірювань ННЦ «Інститут метрології», Голову ТК 1.5 «Довжина та кут» COOMET В. Купка. ✍

## V МІЖНАРОДНИЙ КОНКУРС «КРАЩИЙ МОЛОДИЙ МЕТРОЛОГ COOMET»

**V** Міжнародний конкурс «Кращий молодий метролог COOMET» відбувся 11-13 червня 2013 року у Фізико-технічному інституті (РТВ) (Брауншвейг, Німеччина). Уперше на запрошення COOMET у ньому взяли участь і представники інших регіональних метрологічних організацій (RMO). Свої роботи представили 25 молодих учених із 16 національних метрологічних інститутів (НМІ) 13 країн. COOMET була представлена Білоруссю, Болгарією, Німеччиною, Казахстаном, Молдовою, Росією, Узбекистаном, Україною; EURAMET — Боснією й Герцоговиною, Данією, Італією; AFRIMETS — Ганою; ARMP — Австралією й Росією.

11 членів журі — провідні й визнані метрологи з Білорусі, Німеччини, Росії, Словаччини, України,



Франції оцінювали роботи за такими критеріями: актуальність; наукова новизна й/або соціально-економічний ефект; оригінальність; потенціал для міжнародного співробітництва; структура й наукова обґрунтованість; якість оформлення й подання доповіді.

Перший приз виборол О. Єрмакова (ВНИИМ, Росія) за роботу «Удосконалювання системи метрологічного забезпечення бомбової калориметрії». Вона, до речі, є автором журналу «Метрологія та прилади».

Призерами стали Л. Клаус (РТВ, Німеччина) за роботу «Калібрування динамічного крутильного моменту — необхідність і основні принципи підходу, заснованого на моделюванні» та Кіан Сінтія Жу (NMIA, Австралія) за роботу «Характеристики й часовий аналіз коаксialних з'єднань». Спеціальним призом відзначено роботу Нільса Хантемана (РТВ, Німеччина) «Оптичний годинник з узагальненою рамсеевською схемою».

Кращим визнано плакат Н. Бурмистрової (ВНИИМ, Росія) за роботою «Алгоритм отримання сумісних результатів у процесі аналізування даних ключових звірень». ✍

**П. Неєжмаков**, Віце-президент COOMET, голова ТК 4, член журі конкурсу

**ЗАСІДАННЯ ТК 1.5 «ДОВЖИНА І КУТ» СООМЕТ**


**В. Купко**, голова ТК 1.5 СООМЕТ, кандидат технічних наук, директор наукового центру, ННЦ «Інститут метрології», м. Харків

**15—16** травня у м. Брауншвейг (Німеччина) на базі Фізико-технічного інституту (РТВ) відбулося чергове засідання Технічного комітету (ТК) 1.5 «Довжина і кут» СООМЕТ. У ньому взяли участь представники національних метрологічних інститутів (НМІ) країн-учасниць СООМЕТ із Білорусі, Грузії, Казахстану, Литви, Німеччини, Росії, України. Розглядалися такі питання: доповідь голови ТК щодо стану робіт у рамках ТК 1.5; актуалізація тем звірень із проведених раніше й запланованих робіт; повідомлення (доповіді) членів ТК і представників НМІ країн-учасниць СООМЕТ; обговорювалися організаційні питання.

Підтверджено актуальність проведення робіт у рамках звірень еталонів одиниці довжини у діапазонах від 0,001 до 1 мм й у нанометровому, у сфері вимірювань

відхилень від круглості й сферичності; еталонів площинності; вихідних засобів вимірювань параметрів поверхні; прецизійних далекомірних установок і точних навігаційних систем GPS/ГЛОНАСС.

Визнано позитивним створення напрямку «Вимірювання деформації» з метою координації дій із розроблення еталонів, призначених для зберігання, відтворення й передавання одиниці довжини, проведення аналізу вимірювальних можливостей країн-учасниць СООМЕТ у зазначеній сфері вимірювань з метою планування й організації робіт з міжнародних звірень, можливості реєстрації напрямку у базі даних вимірювальних можливостей BIPM.

Наступне засідання ТК 1.5 СООМЕТ заплановано провести у ФДУП «ВНИИМС» (м. Москва, Росія) у травні 2014 року. 

**ЗАСІДАННЯ ТК 1.8 «ФІЗИКО-ХІМІЯ» СООМЕТ**

**М. Рожнов**, кореспондент ТК 1.8 СООМЕТ, кандидат хімічних наук, директор науково-виробничого інституту Метхіменерготест,

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

**Д. Мельник**, начальник науково-дослідного відділу, ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ


**23 та 24** травня у ФДУП «ВНИИМ імені Д. І. Менделєєва» (м. Санкт-Петербург, Росія) відбулося чергове засідання Технічного комітету (ТК) 1.8 «Фізико-хімія» СООМЕТ. Представники Азербайджану, Білорусі, Казахстану, Киргизстану, Молдови, Росії та України заслухали й обговорили повідомлення стосовно діяльності ТК за період 2012 — 2013 років; участі представників ТК у засіданнях ССQM BIPM та його робочих груп; стану експертизи СМС XIII циклу; діяльності та планів роботи підкомітетів «Електрохімія», «Метали та сплави», національних метрологічних інститутів (НМІ) у сфері фізико-хімічних вимірювань.

Зокрема, представники України М. Рожнов, В. Гаврилкін, Д. Мельник доповіли стосовно діяльності ДП «Укрметртестстандарт» у сфері фізико-хімічних вимірювань та міжнародного співробітництва з реалізації Угоди CIPM MRA; стану міжнародних ключових звірень за темою СООМЕТ, координатором якої є ДП «Укрметртестстандарт»; гармонізації національних стандартів України у сфері вимірювань складу й обчислення властивостей природного газу з міжнародними стандартами та розроблення нормативно-методичних документів у цій сфері, виконання раунду програми МПР вимірювань складу та властивостей природного газу.

Учасники засідання узгодили пропозиції щодо планування нових тем СООМЕТ за тематикою ТК 1.8.

Зокрема, передбачаються пілотні звірення у сферах вимірювань: розрахункових концентрацій аероіонів, аерозолів у діапазоні розмірів частинок від 0,5 мкм і більших та аерозольних наночастинок у діапазоні розмірів від 20 до 500 нм; масової частки металів (Cu, Zn, Pb, Al, Ca, Sb, Mg, Au, Ag, As, Ni) у металургійному шлаку, концентрації розчиненого кисню у воді в широкому діапазоні, за темою «Еталон в азоті», — двосторонні звірення вимірювань вмісту компонентів (C<sub>3</sub>—C<sub>5</sub>) у сумішах скраплених вуглеводнів; ключові звірення національних еталонів у сфері аналізу газової суміші CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> в азоті (автомобільні гази); звірення за темами «Пестициди у чаї», «Меламін у молоці».

Прийнято ряд пропозицій з упровадження та перегляду міждержавних стандартів, реєстрації СМС-рядків НМІ, у тому числі з продовження спільного (ВНИИМ, ДП «Укрметртестстандарт») розроблення нормативно-методичного документа щодо вимірювання компонентного складу природного газу відповідно до вимог стандарту ISO 6974 тощо.

Наступне засідання ТК 1.8 СООМЕТ заплановано на травень 2014 року в ФДУП «ВНИИМ імені Д. І. Менделєєва». 

УДК 389.62.1:53.089:68:539.531

# ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ І КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ДЕЯКИХ ВУЗЛІВ ЕТАЛОНІВ ТВЕРДОСТІ

**Я. Довженко**, начальник НДЛ механічних вимірювань,  
**В. Скляр**, кандидат технічних наук, учений секретар,  
ННЦ «Інститут метрології», м. Харків

*Представлено математичне  
описання процесів  
обчислювання твердості,  
розрахунки коефіцієнтів  
впливу з відповідним  
коригуванням робочих формул  
для еталонів твердості  
за різними шкалами.*

*The study presents a mathematical  
description of the process  
of computing the hardness;  
in addition the work represents  
estimates of the influence coefficient  
with an appropriate correction  
to working formulas for hardness  
primary standards on various scales.*

**В**изначення вимог ґрунтується на оцінюванні похибок еталонів, побудованих на базі відомих фізичних моделей процесів, що призводять до спотворення результатів вимірювань. Проводиться математичне описання таких процесів із відповідним коригуванням робочих формул для обчислення твердості, розраховуються коефіцієнти впливу цих факторів і визначення окремих вимог з урахуванням того, що їх сума не має перевищувати інтегральних похибок еталонів, наведених у технічних вимогах до них. Аналітичні вирази для визначення твердості мають вид:

$$\text{за шкалою Віккерса} \quad HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{L^2}, \quad (1)$$

де  $P$  — навантаження, кгс;  $\alpha$  — кут між протилежними гранями піраміди при вершині, що дорівнює  $136^\circ$ ;  $L$  — середнє арифметичне значення довжин обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм;

$$\text{за шкалою Брінелля} \quad HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2)$$

де  $D$  — діаметр кульки індентора, мм;  $d$  — діаметр відбитка, мм;

$$\text{за шкалою Роквелла} \quad HR = 100 - \frac{h_1 - h_0}{0,002}, \quad (3)$$

$$\text{за шкалою Супер-Роквелла} \quad HSR = 100 - \frac{h_1 - h_0}{0,001}, \quad (4)$$

де  $h_0$  — глибина занурення індентора після попереднього навантаження, мм;  $h_1$  — після повного навантаження, мм.



Я. Довженко



В. Скляр



У виразах (1, 2) для визначення твердості навантаження  $P$  є присутнім, що дозволяє сформулювати вимоги до його метрологічних характеристик. А в еталоні твердості згідно з (3, 4) параметра навантаження немає, що є методологічною особливістю вимірювань за цими шкалами. Хоча зовсім не пред'являти вимог до метрологічних характеристик навантаження є невірним. Тому, через ідентичне конструкторське рішення обох еталонів і формування жорстких метрологічних вимог до навантаження в еталоні за шкалами Брінелля—Віккерса, вважати-мемо ці вимоги однаковими.

Оскільки вимірювання твердості полягає у визначенні просторових характеристик відбитка індентора після прикладення нормованого навантаження, аналізування похибок еталона зручніше проводити у декілька етапів: похибки навантаження, параметри інденторів, вимірювання параметрів відбитка.

#### ПРОЦЕС НАВАНТАЖУВАННЯ ДЛЯ ВСІХ ЕТАЛОНІВ

Представимо вираз для навантаження індентором на випробовуваний засіб із урахуванням усіх спотворювальних факторів у виді:

$$P = (P_0 + P_{3B}) \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \left(1 + \frac{e}{A}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_A}{P_0}\right) + P_{TP}, \quad (5)$$

де  $P_0$  — вага гир навантаження,  $P_{3B}$  — похибка зважування,  $\beta$  — кут відхилення від горизонталі площини столика з мірою,  $\gamma$  — кут відхилення від горизонталі коромисла,  $e$  — розбіжність осей індентора й сили навантаження,  $A$  — довжина плеча коромисла,  $P_A$  — виштовхувальна Архімедова сила,  $P_{TP}$  — сила тертя в опорах, приведена до осі індентора.

Зазначимо відразу, що Архімедова сила, розрахована за допомогою рівняння Менделєєва-Клапейрона, має величину  $1,5 \cdot 10^{-4}$  у відносному вираженні. Складові, що містять залежності її від температури й тиску повітря, й зовсім незначні. Тому далі Архімедова сила як похибка не розглядається, оскільки її величина у 20 разів менша відносної невиключеної систематичної похибки (ВНСП) еталона, наприклад, за шкалою Брінелля, де  $\Theta_B = 3 \cdot 10^{-3}$ .

В ідеально працюючому еталоні індентор впливав би на міру із силою, рівною вазі гир  $P_0$ . Однак фактори, відзначені у (5), утворюють невиключену систематичну похибку (НСП). Оскільки вони не є корельованими, а вимірювання є непрямым, нелінійним, ОНСП можна представити у виді:

$$\frac{dP}{P} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \left( \frac{\partial P}{\partial x_i} \cdot \frac{dx_i}{P} \right)^2}, \quad (6)$$

де  $x_i = P_{3B}, \beta, \gamma, e, P_{TP}$ .

Після визначення коефіцієнтів впливу — знаходження частинних похідних виразу (5), підставивши їх у (6), отримаємо:

$$\frac{dP}{P} = \sqrt{\left( \frac{dP_{3B}}{P} \right)^2 + (\operatorname{tg} \beta \cdot d\beta)^2 + (\operatorname{tg} \gamma \cdot d\gamma)^2 + \left( \frac{de}{A} \right)^2 + \left( \frac{dP_{TP}}{P} \right)^2}, \quad (7)$$

де  $P$  — навантаження, величина якого вибирається із ряду навантажень еталона за шкалою Віккерса, — 1 кг, як мінімальне. ОНСП при цьому є максимальним;

$dP_{3B}$  — похибка зважування —  $5 \cdot 10^{-4}$  кг за ГОСТ 7328–82Е для кілограмового складу еталонних гир;

$d\beta$  — похибка горизонтування столика. Приймаємо  $\beta = d\beta = 10^{-2}$  рад, що є достатньо м'якою технологічною вимогою ( $\approx 34'$ ). При цьому відносна похибка цього фактора є у 5 разів меншою за похибки зважування, а внесок до ОНСП — у 25 разів меншим;

$d\gamma$  — похибка горизонтування коромисла. Із міркувань, аналогічних попереднім,  $\gamma = d\gamma = 10^{-2}$  рад;

$de$  — похибка розбіжності осей індентора й сили навантаження,  $de = 0,2$  мм,  $A = 660$  мм — параметри конструктивні;

$dP_{TP}$  — похибка визначення сили тертя в опорах. Аналітичне визначення цієї складової є вкрай ускладненим. Тому пропонується зворотна процедура: задати ОНСП навантаження, виходячи із вимоги до ОНСП еталона, й з виразу (7) визначити похибку сили тертя.

Задаємо  $dp/P = 1 \cdot 10^{-3}$ , орієнтуючись на ОНСП еталона за шкалою Брінелля  $\Theta_B = 3 \cdot 10^{-3}$ . Підставивши всі наведені значення у (7), отримуємо:  $dP_{TP}/P = 8 \cdot 10^{-4}$ .

Це означає, що атестаційні заходи еталонів мають містити «зважування» впливу індентора за допомогою вагів або динамометра. При цьому відхилення результату зважування не має перевищувати  $1 \cdot 10^{-3} P_0$ , а розміщення на осі індентора додаткового вантажу, який дещо перевищує  $8 \cdot 10^{-4} \cdot P_0$  має бути помічено у ході цієї процедури. Це є особливо актуальним для малих навантажень, коли важільна система, кошик, противаги тощо значно більше впливають на опори, ніж вантаж, наприклад, 1 кг із діапазону еталона за шкалою Віккерса.

На закінчення розгляду процесу навантажування необхідно зробити два зауваження. Подавання столика з мірою здійснюється за різьбленням, яке може мати не лише відхилення від вертикалі своєї осі, але й бути «криво» нарізаним. Тому в процесі атестації необхідно розглядати  $d\beta$  як адитивну похибку всіх спотворень подавання столика. Що стосується горизонтування коромисла, то його похибка належить моменту початку процесу навантажування, але перед цим потрібно горизонтувати його у процесі балансування кошика. Тобто  $d\gamma$  — похибка двох



ідентичних некорельованих процесів. Значить вимогу до похибки рівня необхідно підвищити в 1,41 разів. Остаточно  $d\gamma = 0,007$  рад.

### ЕТАЛОН ТВЕРДОСТІ ЗА ШКАЛОЮ ВІККЕРСА

Аналітичний вираз для визначення твердості (1) з урахуванням температурної залежності розміру відбитка можна представити так:

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{L^2 (1 + \delta \cdot \Delta T)^2}, \quad (8)$$

де  $\delta$  — температурний коефіцієнт лінійного розширення,  $\delta = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;  $\Delta T$  — збільшення температури, К.

Оскільки вимірювання діагоналей визначає випадкову похибку, представимо ОНСП у виді:

$$\frac{d(HV)}{HV} = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial(HV)}{\partial z_i} \cdot \frac{dz_i}{HV} \right)^2}, \quad (9)$$

де  $z_i = P, \alpha, T$ .

Після знаходження частинних похідних підставимо їх у (9):

$$\frac{d(HV)}{HV} = \sqrt{\left( \frac{dP}{P} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \cdot d\alpha \right)^2 + \left( \frac{-2\delta \cdot dT}{1 + \delta \cdot \Delta T} \right)^2}. \quad (10)$$

Оскільки  $dP/P = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $d\alpha = 30' = 8,7 \cdot 10^{-3}$  рад (паспортний параметр похибки кута піраміди) і  $dT = \Delta T = 2$  К отримаємо:

$$\Theta_B = \frac{d(HV)}{HV} = \sqrt{(1 \cdot 10^{-3})^2 + (1,7 \cdot 10^{-3})^2 + (4,4 \cdot 10^{-5})^2}, \quad (11)$$

$$\Theta_B \approx 2 \cdot 10^{-3}.$$

Оскільки довжини діагоналей відбитка  $L_1$  і  $L_2$  вимірюються одним мікроскопом, похибки їхні є однакоовими —  $dL_1 = dL_2 = dL$ . Ураховуючи, що  $2L = L_1 + L_2$ , відносну випадкову похибку (ВВП) еталона можна представити у виді:

$$S_B = \frac{d(HV)}{HV} = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial(HV)}{\partial l_i} \cdot \frac{dl_i}{HV} \right)^2} = \sqrt{2 \left( \frac{dL}{L} \right)^2}, \quad (12)$$

де  $l_i = L_1, L_2$ .

Тобто  $S_B = 1,4 \cdot dL/L$ . Згідно з повірочною схемою  $S_B = 2 \cdot 10^{-3}$  для HV1, у якого мінімальний розмір відбитка  $L = 0,03$  мм за ГОСТ 2999-75. Відповідно  $dL = 0,042 \cdot 10^{-3}$  мм, а **ціна поділки мікроскопа — 0,085 мкм. Максимальний розмір діагоналей за ГОСТ 2999-75 — 1,92 мм.**

### ЕТАЛОН ТВЕРДОСТІ ЗА ШКАЛОЮ БРІНЕЛЛЯ

Перетворимо вираз (2) до виду:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}} \right)}. \quad (13)$$

Оскільки температурні коефіцієнти лінійного розширення міри й кульки є близькими за величиною, вираз для температурної залежності твердості є аналогічним (8), і згідно з (10), (11) цією складовою похибки цілком можна знехтувати.

Як і в еталоні за шкалою Віккерса, похибки, що відтворюються під час проведення вимірювань (залежності від навантаження  $P$  і діаметра кульки  $D$ ), вважаємо систематичними, а від діаметра відбитка — випадковою.

Представимо ВНСП у виді:

$$\Theta_B = \frac{d(HB)}{HB} = \sqrt{\left( \frac{\partial(HB)}{\partial P} \cdot \frac{dP}{HB} \right)^2 + (F \cdot dD)^2}, \quad (14)$$

$$\text{де } \frac{\partial(HB)}{\partial P} \cdot \frac{dP}{HB} = \frac{dP}{P},$$

$$\text{а } F = \frac{\partial(HB)}{\partial D} \cdot \frac{1}{HB} = \frac{1 - \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}}{D \cdot \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}}. \quad (15)$$

Згідно з повірочною схемою  $\Theta_B = 3 \cdot 10^{-3}$ , а у разі розгляду навантаження прийнято, що  $dP/P = 1 \cdot 10^{-3}$ . Тоді

$$F \cdot dD = \sqrt{(\Theta_B)^2 - (dP/P)^2}, \quad F \cdot dD = 2,8 \cdot 10^{-3}. \quad (16)$$

Відповідно до ГОСТ 9012-75 діаметр відбитка має бути у межах  $0,2 D < d < 0,6 D$ . Із цієї умови й з урахуванням (15), (16) можна визначити  $dD$ , тобто вимогу до похибки пристрою для вимірювання діаметра кульок. Виконаємо це паралельно з розрахунками ВВП  $S_B$ , що виникає під час вимірювання діаметра відбитка з похибкою  $dd$ :

$$S_B = 1,4 \cdot G \cdot dd, \quad (17)$$

$$\text{де } G = \frac{\partial(HB)}{\partial d} \cdot \frac{1}{HB} = \frac{1 + \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}}{d \cdot \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}}.$$

Коефіцієнт 1,4 з'являється внаслідок того, що діаметр відбитка визначається, як середнє вимірювання за двома взаємно перпендикулярним напрямкам. Його величина визначається аналогічно (12).

Зазначимо, що дослідження інших похідних функцій  $F$  і  $G$  вказує на їхню монотонність в інтервалі  $0,2D < d < 0,6D$ , тобто на відсутність екстремумів і розривів. Тому візьмемо дві крайні точки —  $d = 0,2D$  і  $d = 0,6D$  і представимо деякі результати для діапазону  $D$  у таблиці.

$D$ , мм	10		5		2,5	
$d$ , мм	2	6	1	3	0,5	1,5
$F \cdot 10^3$ , мм <sup>-1</sup>	2,06	25	4,12	50	8,24	100
$G$ , мм <sup>-1</sup>	1,01	0,38	2,02	0,75	4,04	1,5
ЦП, мкм	1,4	3,73	0,7	1,88	0,35	0,94

Визначення вимог до вимірника діаметра кульки:

- у рядку  $F$  знаходимо критичну точку, коли  $F$  є максимальною, й з (16) обчислюємо  $dD = 2,8 \cdot 10^{-2}$  мм. Оскільки похибка — це половина ціни поділки, **ціна поділки вимірника —  $5,6 \cdot 10^{-2}$  мм;**

- діапазон вимірюваної величини — 10 мм.**

Визначення вимог до вимірника діаметра відбитка:

- у рядку  $G$  знаходимо критичну точку, коли  $G$  є максимальною, й з (17) обчислюємо  $dd = 0,25 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}$  мм, знаючи, що згідно з повірочною схемою  $S_b = 1 \cdot 10^{-3}$ . **Ціна поділки вимірника — ЦП =  $2 \cdot dd = 0,35$  мкм.** Рядок таблиці ЦП відображає можливість зниження цієї вимоги для кульок діаметром 5 і 10 мм;

- діапазон вимірюваної величини — 6 мм.**

### ЕТАЛОН ТВЕРДОСТІ ЗА ШКАЛОЮ РОКВЕЛЛА

Якщо у попередніх еталонах вимірюваним параметром є розмір відбитка у площині атестованої міри, то в еталоні за шкалою Роквелла необхідно виконувати високоточні вимірювання глибини занурення індентора в міру, тобто переміщення.

Аналітичний вираз для визначення твердості (3) з урахуванням температурної залежності розміру відбитка має вид:

$$HR = 100 - \frac{h_1 - h_0}{0,002} \cdot (1 + \delta \cdot \Delta T). \quad (18)$$

Температурна складова НСП еталона  $\frac{\partial(HR)}{\partial T} \cdot dT = 2,3 \cdot 10^{-3} HR$  з урахуванням того, що величина глибини занурення індентора (0,014—0,21) мм за діапазону твердості (20—100) HR, тобто похибка для  $(h_1 - h_0) = 0,21$  мм і  $dT = 2^\circ$  є нехтовно малою порівняно із  $\Theta = 0,25$  HR еталона.

Випадкова похибка еталона  $S = 0,08$  HR обумовлена похибкою вимірника переміщення й може бути виражена, як:

$$S = d(HR) = \sqrt{\sum_{m_i=1}^2 \left( \frac{\partial(HR)}{\partial m_i} \cdot dm_i \right)^2}, \quad (19)$$

де  $m_i = h_0, h_1$ .

Візьмемо до уваги, що  $dh_1 = dh_0 = dh$ , оскільки обидва вимірювання проводяться одним приладом. (19) після підстановок набуває вид:

$$0,08 HR = \sqrt{2 \left( \frac{dh}{0,002} \right)^2}, \quad (20)$$

звідки  $dh = 0,11$  мкм, тобто **похибка вимірника переміщення — 0,11 мкм, а діапазон вимірювання переміщення — 0,21 мм.**

### ЕТАЛОН ТВЕРДОСТІ ЗА ШКАЛОЮ СУПЕР-РОКВЕЛЛА

За вимірювальною процедурою цей еталон є тожним попередньому. Тому вимоги до метрологічних характеристик вимірника переміщення формуються в аналогічний спосіб у процесі опрацювання робочої формули (4). Отримаємо **похибку вимірника переміщення — 0,11 мкм.** Певна відмінність полягає у тому, що межі вимірювання твердості — (10—94) HR, а **діапазон вимірювання переміщення — 0,09 мм.**

### ВИСНОВКИ

У статті не розглядалися динамічні похибки — залежності від швидкостей навантажування, розвантажування, часу утримання тощо. Деякі з параметрів регламентуються ГОСТ, але без метрологічних характеристик. Це має стати предметом подальших експериментальних досліджень еталонів.

*Основні метрологічні параметри технологічних процесів і вимірювальних пристроїв еталонів твердості:*


- відносна похибка зважування вантажів —  $5 \cdot 10^{-4}$ ;
- відносна похибка навантаження —  $1 \cdot 10^{-3}$ ;
- відносна похибка сили тертя в опорах —  $8 \cdot 10^{-4}$ ;
- похибка рівня для горизонтування столика —  $0,01$  рад =  $34'$ ;
- похибка рівня для горизонтування коромисла —  $0,007$  рад =  $24'$ .

Прилад	Ціна поділки, мкм (похибка, мкм)	Діапазон, мм
мікроскоп HV	0,085	1,92
мікроскоп HB	0,35	6
мікрометр HB	56	10
вимірник переміщ. HR	(0,11)	0,21
вимірник переміщ. HSR	(0,11)	0,09

Під час вибору приладу немає необхідності шукати такий, похибка або ціна поділки якого відповідали б розрахунковим величинам. Можливе округлення, але так, аби похибка вимірювання не збільшувалася.

### ЛІТЕРАТУРА

- Metrologia, 2009, 46, Tech. suppl., 07001 COOMET.M.H.-S1 Final Report. — 2009. — 12 p.
- Metrologia, 2009, 46, Tech. suppl., 07015 APMR.M.H.-S2 Final Report. — 2009. — 16 p.

3. Сидоренко Г.С. Державні первинні еталони одиниць твердості за шкалами Брінелля й Віккерса, Роквелла й Супер-Роквелла / Сидоренко Г.С., Большаков В.Б., Довженко Я.С. й ін. // Український метрологічний журнал. — 1999. — № 2. — С. 51—55.
4. Low S.R. Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials // NIST, Special publication 960—5, 2001. — 116 p.
5. Кирносів В. И. Измерение механических характеристик материалов. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 240 с.
6. ISO 6508-2: Metallic Materials — Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) — Part 2: Verification of testing machines, Geneva, International Organization of Standardization, 1999.
7. Пилипчук Б.И. Обзор теорий твердости. — М. — Л.: Стандартгиз, 1962. — 112 с.
8. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990. — 558 с.
9. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с. 

## ЗАСІДАННЯ НМПК МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ЗА НАПРЯМОМ «МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

**29—31** травня 2013 року на базі Одеської державної академії технічного регулювання та якості (ОДАТРА) відбулося чергове засідання науково-методичної підкомісії (НМПК) Міністерства освіти і науки за напрямом «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології».


Розпочалося воно із привітального слова ректора ОДАТРА проф. Коломійця Л.В. стосовно основних етапів розвитку, перспективних напрямків навчальної, методичної та наукової діяльності навчального закладу. Учасники засідання заслухали звіт заступника голови НМПК проф. Стадника Б.І. щодо підсумків роботи підкомісії за минулий рік, а також доповідь проректора ОДАТРА з навчальної та виховної роботи Дяченко О.Ф. стосовно досвіду підготовки фахівців за напрямом «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології». Обговорено оновлені галузеві стандарти бакалавра, спеціаліста і магістра, відбулося ознайомлення членів НМПК з навчально-лабораторною базою та музеєм академії. На виробничій базі ПАТ «Одесакабель», де функціонує філія останньої, відбулося виїзне засідання, присвячене розгляду та обговоренню інформаційно-вимірювальних технологій і метрологічного забезпечення у сучасному кабельному виробництві.

Учасники засідання НМПК взяли участь у роботі II Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи» та III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Інформаційно-



вимірювальні технології в метрології, технічне регулювання та менеджмент якості», які проводилися на базі ОДАТРА, традиційній презентації нових видань навчально-методичної літератури, підведенні підсумків проведення Всеукраїнської студентської олімпіади та Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт за напрямом робіт НМПК, а також конкурсу з проектування і розроблення засобів вимірювальної техніки із застосуванням технологій корпорації «National Instruments». Ухвалено план роботи на наступний рік, заходи з удосконалення змісту та форм навчання за напрямом «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології».

Наступне засідання НМПК відбудеться у травні — червні 2014 року в Івано-Франківську.

**О. Крюков**, член НМПК,  
доктор технічних наук, професор,  
Академія внутрішніх військ МВС України,  
м. Харків 





УДК 621.317.757.018.4:621.373.826

# РОЗВИТОК ЧАСТОТНОЇ МЕТРОЛОГІЇ В ОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ

**А. Васянович**, кандидат фізико-математичних наук, професор, декан факультету,

**Ю. Мачехін**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,

**Ю. Старчевський**, кандидат фізико-математичних наук, доцент,

Харківський національний університет радіоелектроніки,

**М. Данаїлов**, науковий співробітник науково-виробничої фірми «Елетра», м. Трієст, Італія

*Докладно розглянуто сучасні методи вимірювання оптичних частот, зокрема прецизійного вимірювання за допомогою частотної гребінки фемтосекундного лазера частот, стабілізованих за частотою лазерів. Проведено дослідження рідкокристалічних (РК) чарунок у складі волоконного кільцевого фемтосекундного лазера й показано, у який спосіб можна управляти поляризацією мод для забезпечення їх синхронізації, поліпшити конструкцію такого лазера для його використання як робочого засобу вимірювання.*

*The article discussed in detail the modern methods of measurement of optical frequencies. In particular, the study examines precision measurement by means of a frequency comb of the femtosecond laser of frequencies of the lasers stabilized on frequency. The authors are conducted the researches of liquid crystal cells as a part of the fiber ring femtosecond laser. It is shown how to controll polarization of modes for ensuring their synchronization and how to improve a design of the fiber femtosecond laser in order to be used as a working measuring instrument.*

Частотна метрологія й прецизійна вимірювальна техніка у сфері час-частотних вимірювань нерозривно пов'язані з науковими досягненнями у фундаментальних областях фізики. Прогрес у цьому виді вимірювань пов'язаний з активним розвитком квантової механіки й електроніки, початок яких припав на 20—30-ті роки ХХ ст. Починаючи з 40-х років, набувають активного розвитку електронні годинники, засновані на використанні радіочастотного випромінювання, пов'язаного зі стабільними квантовими переходами [1]. І. Рабі зі співробітниками [2] у 1937 році розробили резонансний пучковий метод, який дозволяв використовувати надтонкі квантові рівні

атомів цезію. Метод Рабі у сфері радіоспектроскопії забезпечив вирішення іншого завдання — створення первинного стандарту частоти на основі радіочастотних реперів, в основу яких покладено квантові ефекти. У 1949 році створено перший годинник на переході молекул аміаку в радіочастотному діапазоні, а до 1955 року вже працював годинник на пучку атомів цезію [3]. Стандарт частоти на пучку атомів цезію дуже швидко було удосконалено і досліджено у багатьох лабораторіях світу, вже у 1967 році секунду в системі SI було визначено як період часу, протягом якого атом цезію здійснює 9 192 631 770 коливань на переході надтонкої структури в основному

атомному стані. У цьому визначенні секунди не встановлювалися технічні параметри й характеристики вимірювального процесу, що дозволяло постійно удосконалювати стандарт шляхом уточнення технічних умов його реалізації. Сьогодні цезієвий стандарт залишається первинним еталоном з невизначеністю «цезієвої» секунди  $1 \cdot 10^{-15}$ .

Подальший розвиток стандартів часу й частоти відбувався в напрямку використання більш короткохвильового випромінювання, аж до оптичного. Уже створено ряд оптичних стандартів частоти на основі лазерних джерел випромінювання, які використовуються як вторинні стандарти часу й частоти [4].

На первісному етапі розвитку оптичних стандартів частоти використовувалися оптичні частотні реperi — лінії поглинання різних газів і пари речовин [5]. Із підвищенням вимог до стабільності й відтворюваності частоти змінювалися вимоги до частотних реперів. Останніми роками розвинено технологію лазерного охолодження атомів та іонів різних речовин, що дало можливість довести теплову швидкість атомів та іонів до декількох одиниць мікрокельвіна. Ширина лінії поглинання та її стабільність у цьому випадку дозволяють значно поліпшити характеристики оптичних стандартів. Саме лазерне охолодження атомів цезію дозволило реалізувати ідею «цезієвого фонтана», яка забезпечила зменшення ширини лінії резонансу до 1 Гц. Однак, подальшого підвищення відтворюваності частоти «цезієвого фонтана» у недалекому майбутньому фахівці не очікують. Разом з тим оптичні стандарти на холодних

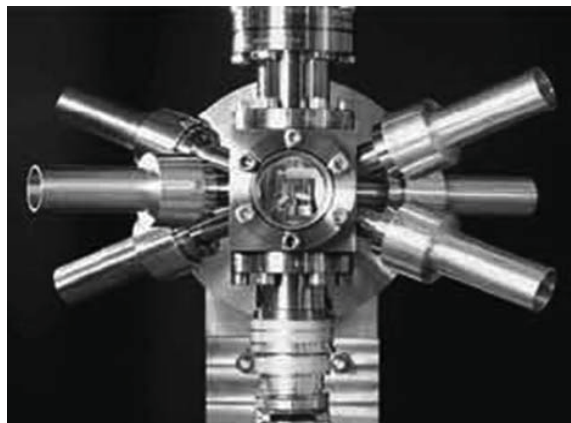


Рис. 1. Стронцієвий годинник. Оптична пастка, в якій охолоджуються іони стронцію

атомах та іонах навпаки розвиваються усе успішніше, й очікується, що невизначеність стабілізованої частоти випромінювання може зменшитися до  $10^{-18}$ . Представимо вакуумну камеру (рис. 1), в якій шість лазерних променів забезпечують охолодження іонів стронцію й створюють «патоку» іонів [6].

Зараз до списку рекомендованих Міжнародним консультативним комітетом з довжини (CCL) стабілізованих за частотою лазерів включено двадцять один лазер. Частина з них використовує охолоджені атоми або іони як частотний репер, завдяки чому наразі вони використовуються як вторинні еталони часу й частоти.

На сайті Міжнародного бюро з мір і вагів (BIPM) представлено рисунок, на якому показано розташування деяких частот стабілізованих лазерів (рис. 2), рекомендованих для реалізації метра.

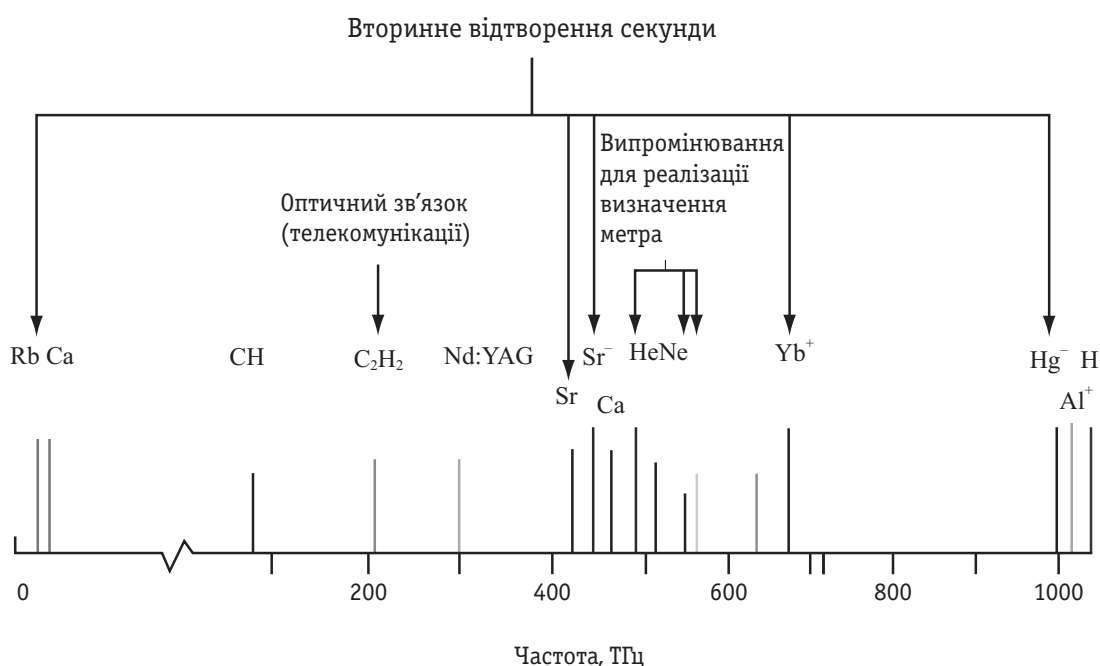
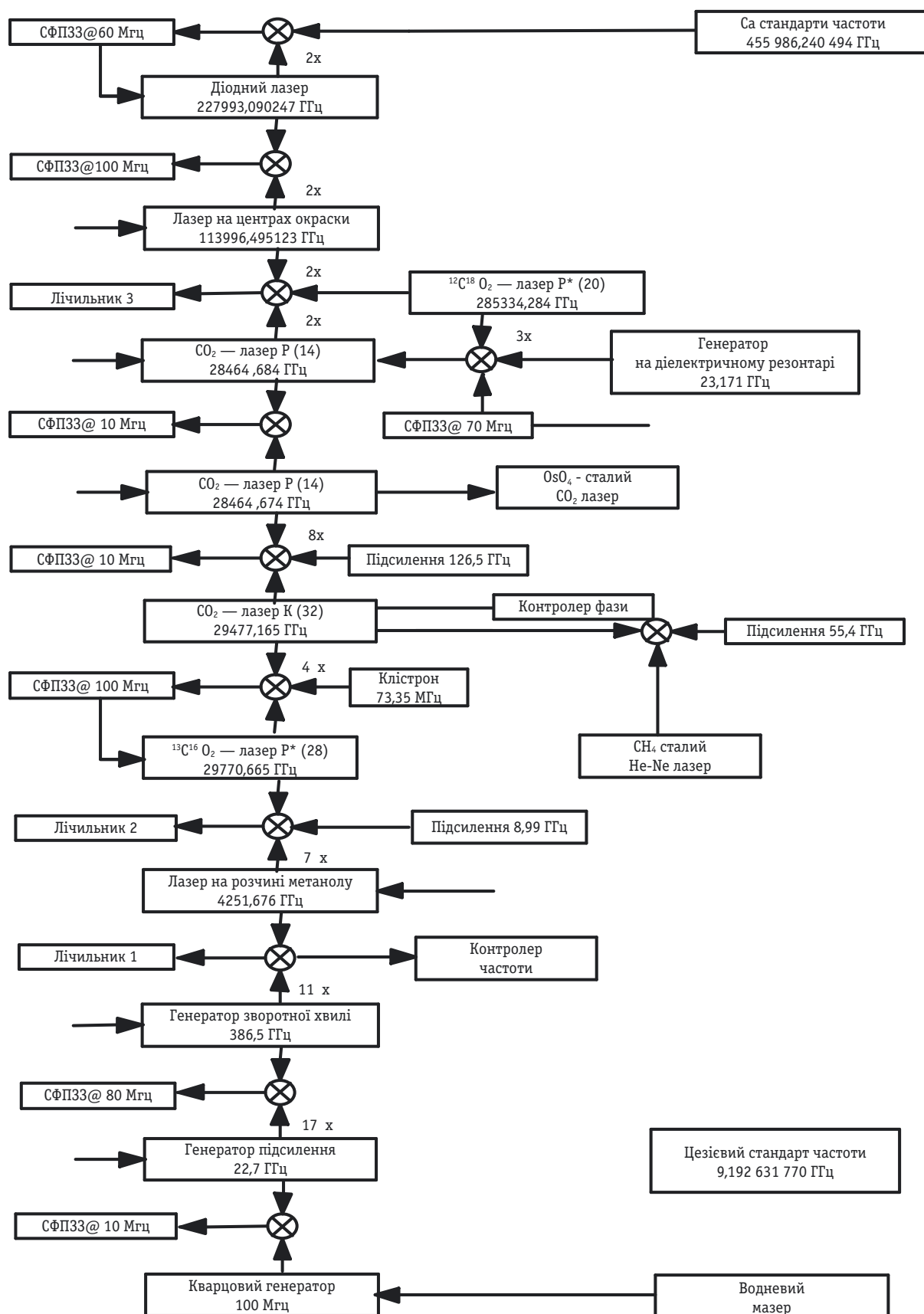


Рис. 2. Основні частоти стабілізованих за частотою лазерів



СФПЗ — стабілізація фази за петлею зворотного зв'язку

Рис. 3. Схема РОЧМ, яка забезпечує вимірювання частоти Са стандарта частоти



Одночасно з розвитком оптичних стандартів частоти розвивалися методи вимірювання абсолютного значення частоти оптичного випромінювання.

Слід звернути увагу на той факт, що в оптичному діапазоні у долазерну епоху частотою взагалі ніхто не цікавився, вимірювалася довжина хвилі, й то достатньо грубо. Часто застосовувалася величина, яка чисельно дорівнювала кількості довжин хвиль, що укладаються на одному сантиметрі. Однак, усі використовувані величини ніякого відношення до прецизійного вимірювання оптичної частоти не мали, оскільки, як вимірити абсолютне значення оптичної частоти ніхто не знав, не було навіть ідеї створення оптичного частотоміра.

З появою мазерів і лазерів та нелінійних пристроїв, що забезпечують множення оптичної частоти, з'явилися умови генерації оптичного випромінювання, спектр якого міг складатися з дискретних мод, ширина яких могла становити кілька десятків кГц. Така унікальна в оптиці ситуація природно призвела до необхідності вимірювання частоти оптичного випромінювання. Було розроблено радіооптичний частотний міст (РОЧМ), заснований на послідовному множенні частоти цезієвого стандарту аж до оптичного діапазону [7]. Як ілюстрацію (рис. 3) наведено типову схему РОЧМ, яка забезпечувала вимірювання частоти оптичного стандарту частоти на кальції.

У світі створили кілька таких мостів, і вони забезпечували вимірювання частоти лазерів у фіксованих точках оптичного спектра. Спочатку такими частотними точками були частоти He-Ne лазера, що працюють на довжинах хвиль 3,39 і 0,633 мкм. Для кожної нової довжини хвилі випромінювання стабілізованих лазерів необхідно доповнювати РОЧМ новою апаратурою, яка створюється для перенесення частоти в частотну область досліджуваного лазерного джерела випромінювання.

З розширенням списку стабілізованих за частотою лазерів вимірювання оптичних частот цих лазерів з використанням РОЧМ ставало все проблематичнішим. Звичайно, РОЧМ дозволяв вимірювати одну оптичну частоту, для забезпечення вимірювання іншої частоти схему необхідно доопрацьовувати й дооснащувати, що у деяких випадках було реалізовано. Проте, розвиток оптичних частотних вимірювань не пішов шляхом постійного опрацювання РОЧМ, оскільки не дозволяв оперативно здійснювати вимірювання будь-яких оптичних частот.

Метою цієї роботи є дослідження умов використання кільцевих волоконних лазерів для вимірювання абсолютних оптичних частот.

## ЧАСТОТНА КОМБ МЕТРОЛОГІЯ

Необхідне рішення несподівано прийшло завдяки дослідженням умов генерації ультракоротких лазерних імпульсів. У 2005 році Нобелівську премію з фізики присуджено Т. Хеншу, Дж. Холу й Рою Глауберу за внесок у розвиток точної спектроскопії, заснованої на лазерах, включаючи техніку прецизійного розрахунку світлового зсуву в оптичних стандартах частоти (оптичних гребінках) [8]. Роботи, виконані нобелівськими лауреатами, були спрямовані не лише на розвиток фундаментальних основ квантової електродинаміки, але й вивчення й реалізацію умов прецизійних вимірювань оптичних частот. Результати цих досліджень виявилися затребуваними в метрології, й протягом декількох років багато наукових метрологічних центрів світу стали застосовувати розроблену технологію в практиці прецизійних частотних вимірювань в оптичному діапазоні [8].

Оптичні частотні гребінки, формовані фемтосекундними лазерами із синхронізованими модами, дозволяють установити прямий зв'язок між оптичними й радіочастотами. Оскільки зв'язок між тривалістю імпульсів випромінювання й шириною оптичного спектра описується простим виразом  $\Delta\tau\Delta f = \text{const}$ , домагаючись скорочення тривалості імпульсу, можна забезпечити розширення спектра випромінювання. Окрім того, якщо ці спектрально обмежені імпульси пропустити через нелінійне середовище, таке як фотонний кристал, можна добитися розширення спектра випромінювання на октаву й тим самим зменшити тривалість імпульсів. Саме цей розширений дискретний спектр випромінювання і є частотною лінійкою, за допомогою якої можна вимірювати оптичні частоти, які потрапляють до сфери частотних гребінок (рис. 4) [9].

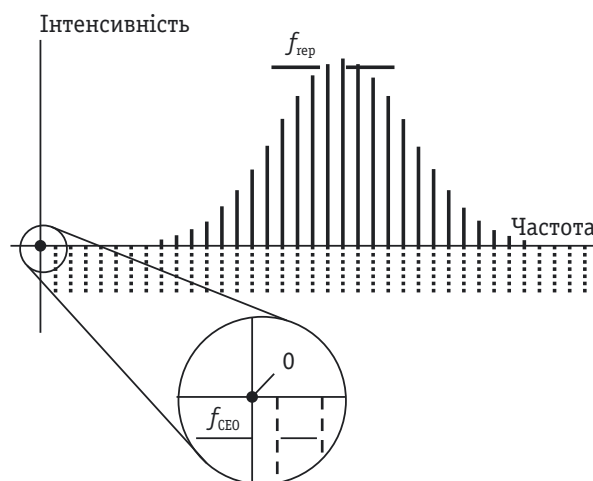


Рис. 4. Частотна гребінка фемтосекундного лазера

Частотні гребінки стали стандартним інструментом високоточної спектроскопії й оптичної частотної метрології в усьому світі. Розширюючи можливості частотної метрології, оптичні частотні гребінки дозволяють вимірювати оптичні частоти, використовуючи для цього засоби вимірювання частот у радіодіапазоні. Специфіка застосовуваної методики полягає в тому, що частотний спектр, у якому всі спектральні компоненти розташовуються еквідистантно, і якщо подумки подовжити спектр убік нульової частоти, одна із віртуальних частот або збіжиться з нульовою позначкою частоти, або стоятиме від неї на певній частотній відстані, значення якої буде меншим, ніж інтервал між спектральними компонентами. Щоби використовувати частотну лінійку для вимірювання абсолютних частот оптичного випромінювання, необхідно знати дві величини, які її характеризують. До них належать відстань між компонентами  $f_{rep}$  й величина відхилення першої віртуальної моди від нульової позначки на частотній осі —  $f_{ceo}$  (рис. 4):

$$f_N = Nf_{rep} + f_{ceo}. \quad (1)$$

Абсолютне значення оптичної частоти кожного піку визначається шляхом вимірювання значень радіочастот  $f_{rep}$  і  $f_{ceo}$ , що принципово спрощує завдання вимірювання оптичних частот з максимальною точністю. Оскільки вимірювання цих частот можна провести за допомогою високоточних частотомірів, каліброваних за водневими або рубідієвими стандартами частоти, обумовлене значення оптичної частоти буде пов'язано із частотою первинного стандарту частоти — цезієвого.  $f_{rep}$  дорівнює частоті міжмодового інтервалу і міститься у діапазоні (100—1000) МГц.  $f_{rep} = c_g / 2L$ , де  $L$  — довжина резонатора, а  $c_g$  — групова швидкість випромінювання усередині резонатора. Визначення  $f_{ceo}$  здійснюється шляхом використання Nd:YAG лазера, що генерує основну довжину хвилі 1,064 мкм і другу гармоніку — 0,532 мкм, а значення величини визначається як  $f_{ceo} = f_b^{532} - 2f_b^{1064}$ , через вимірені радіочастотним способом величини частотних зсувів між спектральними компонентами  $N$  і  $2N$  гармоніками випромінювання лазера (рис. 5).

Для вимірювання невідомої частоти оптичного випромінювання необхідно вимірити частотну різницю між гармонікою спектра, яка є ближчою до шуканої частоти, й є самою частотою:

$$f = N \cdot f_r + f_{ceo} \pm f_b, \quad (2)$$

де  $f_b$  — вимірювана частота биттів між спектральним компонентом гребінки з номером  $N$  і вимірюваною частотою.

Невизначеність вимірювання частоти визначається невизначеністю частот, що характеризують

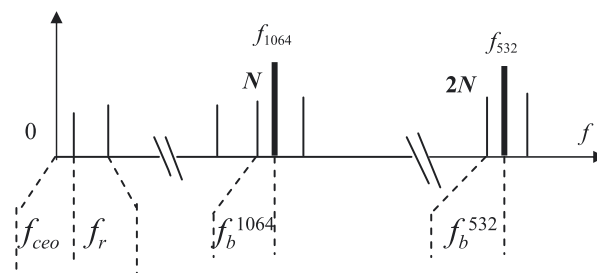


Рис. 5. Вимірювання  $f_{ceo}$  за допомогою стабілізованого Nd:YAG лазера

комб ґратки  $f_{rep}$  і  $f_{ceo}$ , й невизначеністю вимірювання різницевої частоти  $f_b$ . Оскільки ці частоти розташовуються у радіодіапазоні, їх вимірюють за допомогою прецизійних радіочастотомірів. Отже, невизначеність вимірювання оптичних частот визначається невизначеністю вимірювання трьох частот у радіодіапазоні. Крім того, для виконання всіх перерахованих вимірювань необхідно, щоб і частота досліджуваного лазера, й комб гребінка були стабілізовані.

Для формування такої частотної сітки (гребінки) розробляються як твердотільні титан-сапфірові лазери, що працюють у ближньому ІЧ діапазоні, спектр яких повністю перекриває весь видимий діапазон, так і волоконні лазери, що працюють в ІЧ діапазоні.

Зараз можна виділити кілька напрямків частотних вимірювань, заснованих на оптичній гребінці. До них, у першу чергу, належить частотна метрологія, яка забезпечує вимірювання оптичних частот усіх лазерних джерел видимого й ближнього ІЧ діапазонів. Для цих цілей використовується як волоконний ербієвий лазер, так і титан-сапфіровий лазер. Частотна гребінка ефективно застосовується у спектроскопічних дослідженнях, активно розвиваються оптичні частотні вимірювання в астрономії, як один із нових напрямів дистанційної спектроскопії. До складу оптичних годинників уводяться пристрої для вимірювання оптичної частоти, тобто фемтосекундні лазери із системою реєстрації сигналів биттів.

#### РОЗРОБЛЕННЯ ЛАЗЕРІВ ДЛЯ ОПТИЧНИХ ЧАСТОТНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Лазери, що генерують ультракороткі імпульси, розробляються й створюються на основі твердотільних, напівпровідникових і волоконних активних середовищ [10]. При цьому центральна довжина хвилі спектра випромінювання, залежно від використовуваного активного середовища, може встановлюватися в інтервалі від 700 до 2000 нм. У 80-х роках минулого століття проведені дослідження основних

фізичних принципів роботи й конструктивно-го виконання фемтосекундних лазерів. Окрім того, що лазери на основі твердотільних активних середовищ здатні випромінювати імпульси тривалістю аж до 5 фс, їх основна перевага полягає у можливості формування імпульсів з петаватним рівнем імпульсної потужності. Такі лазери застосовуються для прискорення електронів [11] і в експериментах із лазерного термоядерного синтезу [12].

Іншим типом лазера, що генерує ультракороткі імпульси, є волоконний лазер [13]. Починаючи з 90-х років [14], такі лазери активно розвивалися. Вони отримали широкого поширення в інформаційних технологіях. Розвиток цих лазерів відбувається й сьогодні. Останнім часом найбільший інтерес виявляється до волоконних лазерів, як лінійних, так і кільцевих, що працюють у режимі генерації ультракоротких імпульсів. Тому більшу частину лазерів, що перебувають в експлуатації у метрологічних центрах та університетах, створено на базі волоконних лазерів. Проте, робочих засобів вимірювань на основі волоконних лазерів поки що у потрібній кількості в метрологічних центрах і промислових лабораторіях немає. Тому розвиток робочих засобів вимірювань оптичних частот є актуальним завданням, вирішення якого частково отримано у цій роботі.

Типову схему кільцевого, волоконного лазера, що працює в режимі генерації ультракоротких імпульсів, наведено на рис. 6 [15]. У кільцевих лазерах застосовувалася синхронізація мод, яка досяга-

лася за рахунок обертання поляризації мод. Для керування поляризацією в таких лазерах застосовуються дискретні поляризаційні елементи, що вміщуються у кільцевий резонатор лазера. До складу волоконного кільцевого резонатора фемтосекундного лазера входять такі елементи: лінзова оптика, що забезпечує колімацію пучків випромінювання у відкритому просторі й уведення випромінювання у волокно; пасивне волокно з негативною дисперсією (SMF28); волокно, активоване іонами ербію, з позитивною дисперсією; WDM розгалужувач, що забезпечує уведення випромінювання накачування з довжиною хвилі 980 нм у резонатор; поляризаційні пластинки ( $\lambda/4$  і  $\lambda/2$ ); поляризаційний дільний кубик (PBS), що забезпечує виведення випромінювання із лазера. Однонаправлене поширення випромінювання у кільцевому резонаторі забезпечує ізолятор (isolator). Четверть і напівхвильові пластинки, встановлені у резонаторі, забезпечують прецизійне й відтворюване керування поляризацією мод, порівняно із застосуванням волоконних, поляризаційних контролерів.

Для максимальної ефективності взаємодії випромінювання з активним середовищем використовується волокно без підтримання поляризації, тому за межами оптичного волокна використовуються поляризаційні пластинки, які забезпечують як трансформацію кругової поляризації у лінійну (і назад), так і поворот лінійної поляризації. Поворот поляризації випромінювання має відновлювати той напрямок поляризації, за яким випромінювання виводиться з волокна.

У результаті поляризаційної синхронізації мод забезпечується генерація ультракоротких (фемтосекундної тривалості) імпульсів. Залежно від кута повороту вектора електричного поля в лінійно поляризованій хвилі регулюється частка енергії, яка виводиться із резонатора через PBS.

У цій роботі досліджено умови керування поляризацією поздовжніх мод випромінювання за допомогою РК чарунк, якими звичайно управляють з використанням електричного поля. До складу кільцевого волоконного лазера уводяться РК чарунки, які забезпечують коригування положення вектора поляризації. Структуру досліджуваного лазера представлено на схемі (рис. 7), у якій РК чарунки замінили напівхвильові пластинки.

Для використання такого волоконного кільцевого лазера як робочого засобу вимірювання частоти необхідно забезпечити ефективне управління поляризацією випромінювання в автоматичному режимі. У лабораторних умовах використовується ручне, механічне регулювання положення поляризаторів.

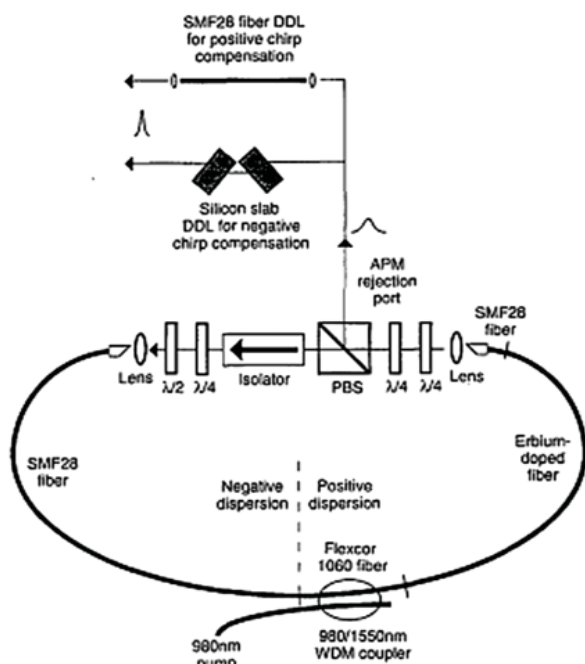


Рис. 6. Кільцевий волоконний лазер із синхронізацією мод



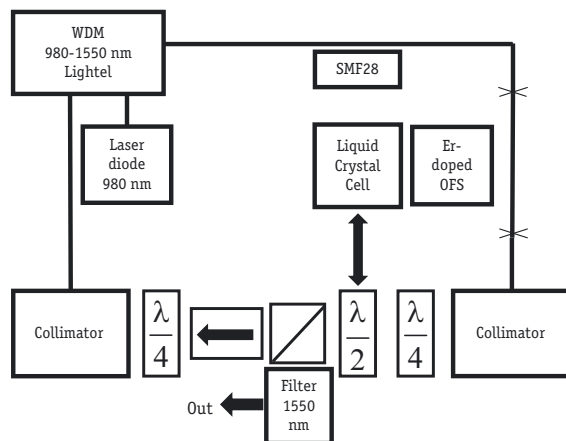


Рис. 7. Схема кільцевого волоконного лазера із РК чарункою

Для автоматичного керування положеннями поляризаторів використовується система із кроковими двигунами (Ultrafast Fiber Laser TG-1550 компанії Menlo Systems). Однак, у такому виконанні вартість лазерів та їх експлуатації стає дуже високою. Тому в цій роботі вивчено умови, за яких поляризацією випромінювання управляють за допомогою РК чарунк.

Для заміни дискретних напівхвильових пластинок РК чарунками необхідно було перевірити їхні електрооптичні властивості. Оптичну схему для перевірки умов заміни пластинки  $\lambda/2$  на РК чарунку представлено на рис. 8.

Для заміни напівхвильової пластинки РК чарункою необхідно визначити їхні характеристики й провести порівняння. Випромінювання з лінійною вертикальною поляризацією виводилося через перший PBS із волоконного лазера (рис. 8). Фільтр 1550 нм не пропускав випромінювання накачування 980 нм. РК чарунка й напівхвильова пластинка розміщалися за чергою перед другим PBS, який розділяв випромінювання за поляризацією у взаємно перпендикулярних напрямках. Напрямок випромінювання

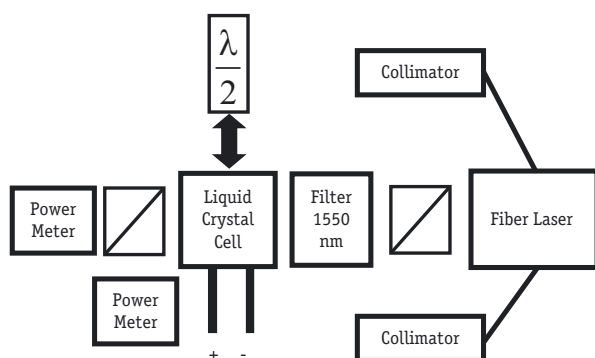


Рис. 8. Схема дослідження обертання поляризації випромінювання

з вертикальною поляризацією повертається на  $90^\circ$  і виводиться із резонатора, а випромінювання з горизонтальною поляризацією не міняє свого напрямку поширення. Кожна складова випромінювання реєструвалася вимірником потужності. Результати вимірювання потужності, що проходить через вимірювальний тракт, залежно від кута повороту напівхвильової пластинки представлено на рис. 9. А результати вимірювань потужності, що проходить залежно від напруги на РК чарунці — на рис. 10. Згідно з рис. 9 напівхвильова пластинка у разі повороту на  $45^\circ$  повертає площину поляризації випромінювання на  $90^\circ$ . При цьому вимірник потужності реєструє всі значення від мінімуму до максимуму. За повний оберт напівхвильова пластинка створює у резонаторі однакові умови 8 разів, тому для настроювання резонатора можна обмежити діапазон обертання пластинки  $45^\circ$ . З рис. 10 видно, як змінюється реєстрована потужність випромінювання за зростання й спадання напруги між електродами РК чарунки. Це відповідає обертанню площини поляризації випромінювання на  $90^\circ$ . До особливостей роботи РК чарунки можна віднести наявність мінімуму пропускання на рівні 2,7 В. Потім іде ділянка до 4 В, де пропускання випромінювання залежить від напруги на чарунці лінійно, і далі до 10 В спостерігається ділянка насичення, де пропускання зі збільшенням напруги змінюється повільно. Для точного настроювання резонатора ділянка з повільною зміною напруги є більш зручною. Необхідною є можливість обертання РК чарунки для вибору початкової орієнтації в резонаторі з наступним налаштуванням напругою.

Проведено вимірювання пропускання РК чарунки за схемою (рис. 8) шляхом реєстрації показань вимірника потужності без чарунки (18,15 мВт) і з чарункою (13,27 мВт). Втрати потужності випромінювання на довжині хвилі 1,54 мкм склали приблизно 27%. Спеціальних заходів для зменшення втрат не приймалося, тому існує можливість їх зниження.

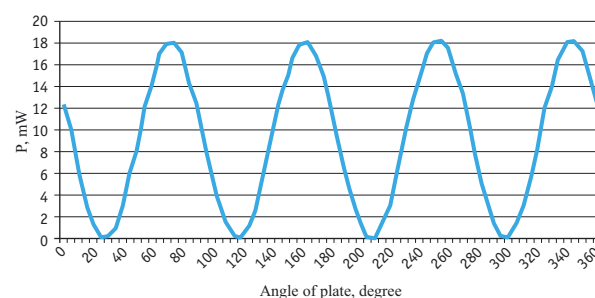


Рис. 9. Залежність потужності, що пропускається, від кута повороту напівхвильової пластинки

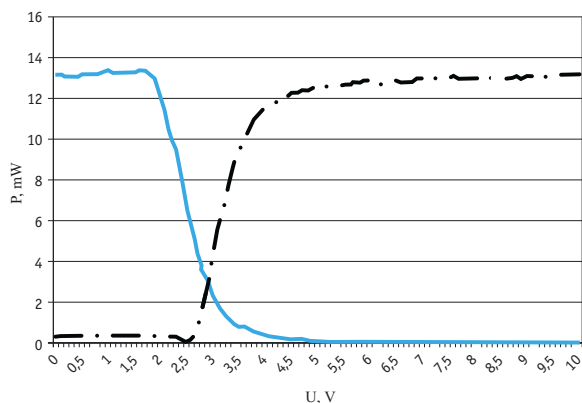


Рис. 10. Залежність потужності, що пропускається, від напруги на РК чарунці

Порівнюючи графіки (рис. 9, 10), видно, що напівхвильова пластинка, як і чарунка, потребують правильної початкової орієнтації у резонаторі й установи напруги. Обертання напівхвильової пластинки у діапазоні  $45^\circ$  відповідає зміні напруги на чарунці від 2,7 до 10 В. Чарунка вносить істотні втрати у резонатор порівняно із напівхвильовою пластинкою, що може перешкоджати отриманню режиму синхронізації мод в імпульсному волоконному лазері.

## ВИСНОВКИ

1. Показано можливість заміни дорогої системи керування фемтосекундним лазером на основі обертання фазових пластинок кроковими двигунами системою на основі РК чарунки, керованої низьковольтною напругою. Пропонований варіант є дешевшим і надійнішим, оскільки не містить рухомих елементів.

2. Проведено дослідження обертання площини поляризації РК чарункою у разі подання на неї напруги до 10 В. Показано, що дія РК чарунки на поляризацію випромінювання за зміни напруги на електродах у діапазоні від 2,7 до 10 В еквівалентна дії напівхвильової пластинки за її обертання у діапазоні  $45^\circ$ . При цьому площина поляризації випромінювання повертається від 0 до  $90^\circ$ .

3. Проведено експериментальне дослідження втрат, що вносяться чарункою у вимірювальний тракт. Показано, що ці втрати становлять 27 % потужності випромінювання, що падає на чарунку. Для зниження втрат необхідно вживати спеціальних заходів — нанесення висвітлювальних покриттів, удосконалювання електродів, рідких кристалів тощо.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Пихтелев Л.И., Ульянов А.А., Фатеев Б.П. и др. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов. — М., Сов. Радио, 1978. — 304 с.
2. Аркадьев В.К. О магнитной спектроскопии и радиоспектроскопии атомного ядра // УФН. — 1951. — Т. 44. — Вып. 1. — С. 80—88.
3. Басов Н. Г., Беленов Е. М. Квантовые стандарты частоты. — М., 1968. — С. 164—194.
4. Quinn T.J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) // Metrologia. — 2003. — Vol. 40. — PP. 103—133.
5. Мачехин Ю.П., Негрійко А.М., Соловйов В.С., Яценко Л.П. Оптические стандарты частоты. — Част. 1. — He-Ne/I<sub>2</sub> лазеры, практика создания и эксплуатации.
6. Champenois C., et al. Evaluation of the ultimate performances of a Ca<sup>+</sup> single-ion frequency standard, Phys. Lett. A. — 2004. — Oct. — Vol. 331. — PP. 298—2311.
7. Домнин Ю.С., Малимон А.Н., Татаренков В.М., Шумяцкий П.С. Радиооптический мост единого эталона времени, частоты и длины // Измерительная техника. — 1986. — № 6.
8. Хол Дж.Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических частот — и не только // УФН. — 2006. — Т. 176. — № 12. — С. 1353—1367.
9. Мачехин Ю.П., Негрійко А.М., Яценко Л.П., Мацнев І.А., Литвиненко А.С., Красногоров А.Ю., Мунтян К.І. Розвиток прецизійної технології вимірювання оптичних частот з використанням фемтосекундного лазера // Радіотехніка. — 2007. — Вип. 150.
10. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. — М.: Наука, 1988. — 312 с.
11. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника — 2001. — Т. 31. — № 2. — С. 95—119.
12. Шиканов А.С. Лазерный термоядерный синтез // Соросовский образовательный журнал. — № 8Б. — 1997. — С. 86—91.
13. Grossmann F. Theoretical Femtosecond Physics // Springer. — 2008. — 206 p.
14. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Лазеры и волоконная оптика // УФН. — 1986. — Т. 148. — Вып. 2. — С. 289—309.
15. Tamura K., Doerr C.R., Nelson L.E., Haus H.A., Ippen E.P. Technique for obtaining high-energy ultrashort pulses from an additive-pulse mode-locked erbium-doped fiber ring laser // Optics Letters. — 1994. — Vol. 19. — № 1. — PP. 46—48. ■



УДК 53.082.1:62-222

**С. Пожарський**, начальник лабораторії,  
ДП «Державне Київське конструкторське бюро «Луч»

*Описано координатний метод визначення радіуса секторної циліндричної поверхні (СЦП), за якого похибка вимірювання радіуса є меншою від похибки вимірювання координат точок поверхні й який дозволяє визначати оптимальний радіус і радіуси прилеглих циліндричних поверхонь. Показано, що відомий метод хорди призводить до результату, за якого похибка вимірювання радіуса може у десятки разів перевищувати похибку вимірювання координат точок поверхні.*

*In the article is resulted description of co-ordinate method for determination of radius of sectoral cylindrical surface, at which error of measuring of radius less error of measuring of co-ordinates of points of surface, and which allows to determine an optimum radius and radiuses of adjoining cylindrical surfaces. It is rotined that over the known method of chord brings to the result at which the error of measuring of radius can in dozens of one times exceed the error of measuring of coordinates of points of surface.*

**З**адача визначення радіуса СЦП виникає достатньо часто під час контролю деталей у машинобудівній галузі. Постає вона й у процесі метрологічної атестації нестандартних кутовимірювальних пристроїв.

Відомий геометричний метод розв'язування цієї задачі — метод трьох точок, за якого за координатами трьох точок профілю СЦП визначається коло (координати центра й радіус), що проходить через ці три точки. Окремим випадком цього методу є метод хорди, за якого центральна точка вибирається симетрично відносно двох крайніх, а радіус кола обчислюється за довжиною хорди й висотою сегмента.

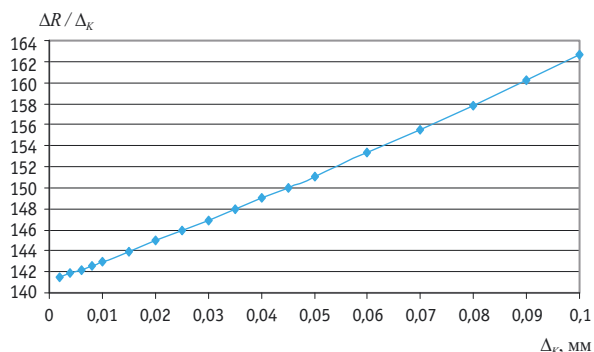
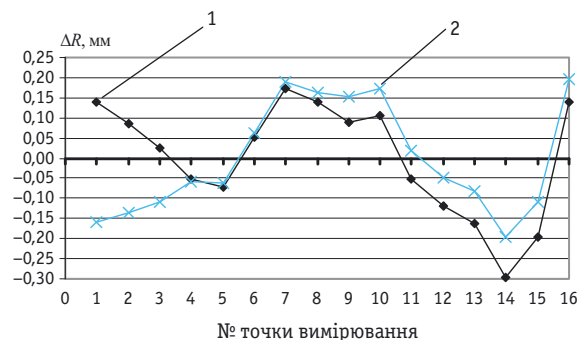
Для визначення впливу похибки вимірювання координат точок на результат вимірювання радіуса СЦП методом хорди автором проведено чисельне моделювання. Представлено графік відношення похибки радіуса  $\Delta R$  до похибки вимірювання координат точок поверхні  $\Delta_k$  як функції від  $\Delta_k$  для СЦП радіуса 100 мм з сектором охоплення поверхні, що дорівнює  $20^\circ$  (рис. 1). Отриманий результат показує, що похибка визначення радіуса у понад 140 разів перевищує похибку вимірювання координат точок циліндричної поверхні.

Отже, цю задачу можна віднести до класу некоректно поставлених [1, 2], які характеризуються тим, що невеликі зміни вихідних даних призводять до значних змін результату. У [3] наведено розрахунки, що підтверджують такий висновок для



© Пожарський С., 2013



Рис. 1. Графік функції  $\Delta R / \Delta \kappa = f(\Delta \kappa)$ Рис. 2. Графіки функції  $\Delta R = f(n)$ ,  
1 — до оптимізації, 2 — після оптимізації

координатних вимірювань секторних сферичних поверхонь.

У зв'язку із цим актуальним є завдання розроблення методу вимірювання радіуса СЦП, що забезпечує похибку вимірювання радіуса, порівняну із похибкою вимірювання координат точок профілю поверхні.

У результаті вирішення поставленого завдання розроблено координатний метод, вихідними вимірю-

ваними параметрами в якому є координати точок крайки профілю СЦП, причому кількість вимірюваних точок є значно більша за три. Особливістю методу є знаходження центра профілю СЦП на основі оптимізації функції відхилень радіусів положень точок профілю від заданого (наприклад, кресленням) або середнього значення. Послідовною зміною координат центра профілю від первинного положення

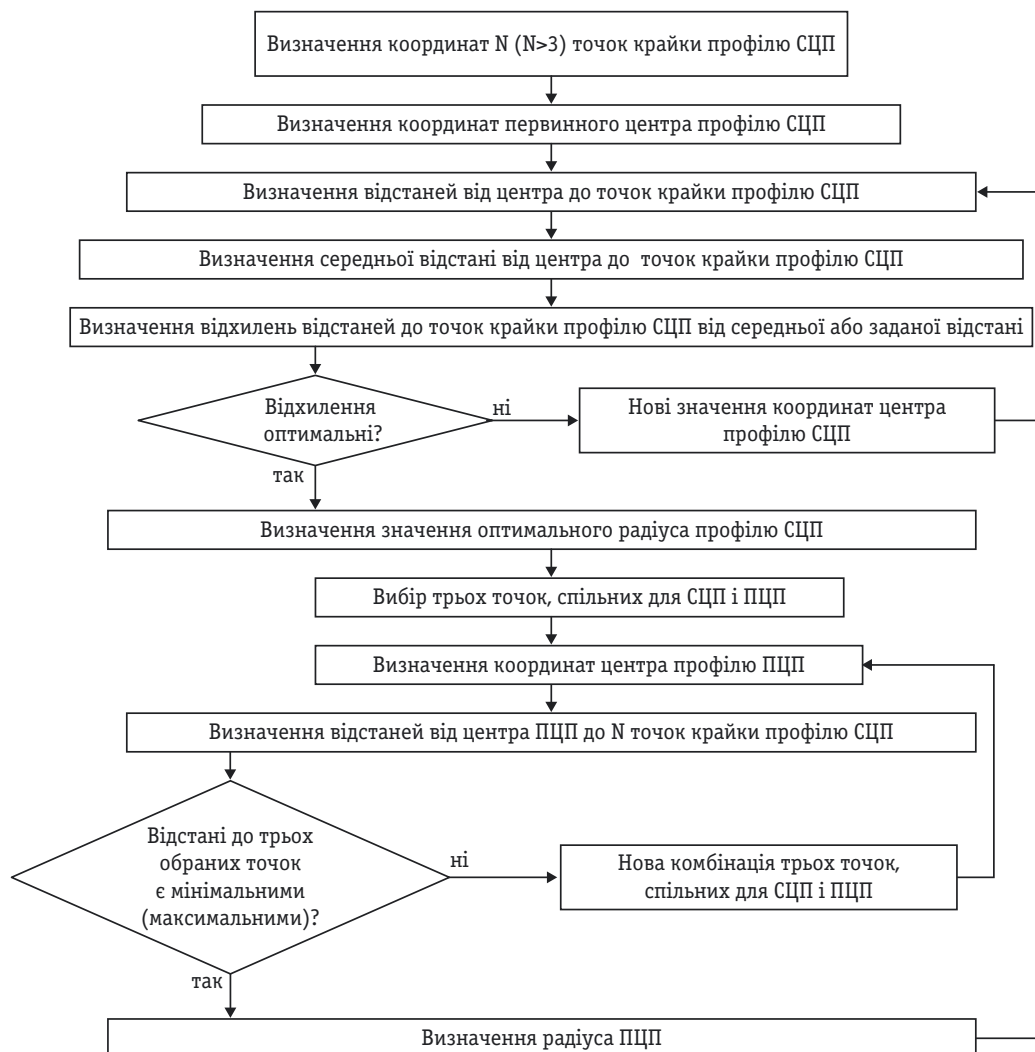


Рис. 3. Алгоритм нового координатного методу визначення оптимального радіуса СЦП і радіусів ПЦП

призводять до оптимального розподілу відхилень радіусів положень точок профілю. При цьому положення первинного центра профілю можна обрати достатньо довільно (з боку увігнутості профілю) або визначити за трьома точками.

Представимо результати оптимізації відхилень радіусів положень точок профілю СЦП деталі, виготовленої методом лиття, з номінальним радіусом циліндричної поверхні (за кресленням) і кутом сектора охоплення поверхні, що дорівнюють 69 мм і 84° відповідно (рис. 2).

Первинний центр визначався за трьома точками: двома крайніми і середньою. Оцінювання функції відхилень радіуса від середнього значення для різних точок проводилося за критерієм симетричності екстремальних відхилень радіуса [4].

У процесі проведення дослідження деталі отримано три значення радіуса СЦП: перше — відносно первинного центра, визначеного за трьома точками профілю СЦП, друге — як середній радіус положень усіх точок вимірювання відносно первинного центра, третій (оптимальний) — відносно центра профілю СЦП, отриманого після оптимізації функції відхилень радіуса. При цьому різниця між першим і третім радіусами дорівнює 0,452 мм, а між другим і третім — 0,591 мм. Зсув між первинним центром і оптимальним, отриманим у результаті оптимізації, дорівнює 0,690 мм. Отримані дані засвідчують значну різницю між оптимальним радіусом і радіусами, визначеними відносно центра, знайденого за трьома точками. Значним виявився і зсув оптимального центра відносно первинного.

Новий метод дозволяє визначати і радіуси прилеглих циліндричних поверхонь (ПЦП), зовнішньої й внутрішньої.

Представимо алгоритм нового координатного методу визначення оптимального радіуса СЦП і радіусів ПЦП (рис. 3).

Під час визначення радіуса внутрішньої ПЦП оцінення відстаней до трьох обраних точок вибирається за мінімальним критерієм, а під час визначення радіуса зовнішньої ПЦП — за максимальним.

Для дослідження точності нового методу проведено чисельне моделювання, у результаті якого визначено, що параметр  $\Delta R / \Delta_k$  залежить лише від числа точок вимірювання  $N$ . Подамо графік цієї залежності (рис. 4).

Отримана залежність апроксимується степеневою функцією:

$$\frac{\Delta R}{\Delta_k} = 0,794 \cdot N^{-0,95},$$

$$\text{звідки } \Delta R = 0,794 \cdot \Delta_k \cdot N^{-0,95},$$

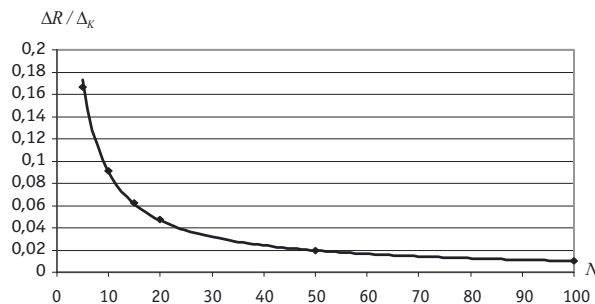


Рис. 4. Графік залежності  $\Delta R / \Delta_k = f(N)$

де  $\Delta R$  — похибка вимірювання радіуса,  $\Delta_k$  — похибка вимірювання координат точок профілю,  $N$  — число точок вимірювання профілю СЦП.

Отриманий вираз означає, що за  $N > 3$  похибка вимірювання радіуса є значно меншою за похибку вимірювання координат точок профілю.

## ВИСНОВКИ

1. Відомі методи визначення радіуса СЦП (методи трьох точок і хорди) призводять до результату, за якого похибка визначення радіуса може у десятки разів перевищувати похибку вимірювання координат точок поверхні.

2. Для нового координатного методу похибка визначення радіуса є меншою похибки вимірювання координат точок поверхні.

3. Новий метод дозволяє розширити можливості з визначення додаткових характеристик СЦП: визначати оптимальний радіус і радіуси прилеглих циліндричних поверхонь, зовнішньої й внутрішньої, а також відхилення профілю СЦП від циліндричної поверхні із заданим значенням радіуса.

## ЛІТЕРАТУРА

- 1 Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М., 1986. — 287 с.
- 2 Иванов В. К., Васин В. В., Танака В. П. Теория линейных некорректных задач и её приложения. — М., 1978. — 196 с.
- 3 Суслин В. П., Джунковский А. В. Применение метода регуляризации для решения плохо обусловленных задач координатных измерений // Измерительная техника. — 2009. — № 7. — С. 23—26.
- 4 Пожарский С. Г. Критерии оптимальности при оценке функции распределения погрешностей штрихов секторных угломерных шкал // Український метрологічний журнал. — 2012. — № 2. — С. 38—41. ■

УДК 53.088.2:621.317.343.3

# АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ПОХИБОК

## ЛОГАРИФМІЧНИХ ВИМІРНИКІВ ПАРАМЕТРІВ ІМПЕДАНСУ

**М. Сурду**, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту прецизійних досліджень,

**О. Ламеко**, директор Інституту прецизійних досліджень,

**О. Панич**, начальник науково-дослідного відділу,

**Т. Швець**, інженер,

ДП «Укрметрестандарт», м. Київ

*Досліджено вплив основних складових похибки векторного вольтметра (ВВ) на похибку вимірювання складових імпедансу в логометричних вимірниках, знайдено аналітичні вирази, що пов'язують ці похибки. Визначено загальні вимоги до побудови ВВ і знайдено залежність похибки вимірювання параметрів імпедансу від фазових співвідношень вимірюваного й еталонного імпедансів, а також від фазових зсувів сигналу в каналі ВВ.*

*The uncertainty of the impedance parameters in the logometric meters (auto-balancing bridges) has been investigated. The analytic formulas, which describe dependencies of the uncertainty of the impedance parameters measurement on the imperfection of the vector voltmeters parameters were been found. These formulas get possibility to describe the requests to the vector voltmeter parameters. The uncertainty of the impedance parameters measurements depends on the signal phase shift in the vector voltmeter channel, as well as on the impedance to be measured phase angle. The formulas, which describe these dependencies, were been found and analyzed.*

### 1. ВСТУП

Історія розвитку вимірювань параметрів імпедансу містить кілька рівнів. На першому (початок XIX — середина XX ст.) для вимірювань параметрів імпедансу використовувалися чотириплечові мости різних конструкцій [1]. На початку 20-х років минулого століття почали свій триумфальний хід трансформаторні мости змінного струму [2, 3], які й донині забезпечують найвищу точність еталонних вимірювань параметрів імпедансу в області звукових частот. З XIX ст. стали будуватися вимірники прямого перетворення, в яких вимірювальна шкала калібрувалася за певних умов (усім відомі стрілочні

вимірники різних конструкцій). Ці прилади не мали високої точності вимірювання (їх похибка рідко була нижчою (0,5—1) %). Однак ситуація різко змінилася з кінця 70-х років XX сторіччя, з настанням «процесорної ери», коли стало можливим вміщувати цифровий обчислювач у маленький вимірювальний прилад. Із того часу цілий ряд закордонних і вітчизняних фірм [4—8] вийшли на ринок із вимірниками параметрів імпедансу, у яких вимірювання змінних напруг здійснюється аналого-цифровими методами ВВ, а визначення відношення напруг виконується лише цифровими методами. Сьогодні

ці прилади вже витісняють трансформаторні мости за похибки понад 0,01 %, і, тим більше, у широкому діапазоні частот (постійний струм — одиниці й десятки мегагерц). Можна прогнозувати подальше підвищення точності цих приладів. Їх і сьогодні ще називають приладами прямого перетворення. За своїми властивостями і способом функціонування ці прилади є новим стилем у розглядуваній сфері вимірювань. Різні автори називали ці прилади по-різному (Auto-balancing bridge (9), автокомпенсаційні мости (10, 17)). У зв'язку з тим, що їх основою є операція цифрового розділення, називатимемо їх «логометричними вимірниками».

Незважаючи на велику кількість опублікованих робіт [9—17], систематичного аналізу похибки логометричних вимірників параметрів імпедансу немає. У пропонуваніх для читача статтях подано аналіз основних джерел похибок логометричних вимірників параметрів імпедансу. Цю статтю присвячено аналізу впливу складових похибки ВВ на результат вимірювання параметрів імпедансу.

## 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОХИБКИ ВОЛЬТМЕТРА НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ

### 2.1. Описання узагальненої структури вимірника

Для аналізу впливу похибки ВВ на результат вимірювання розглянемо узагальнену структурну схему типового логарифмічного вимірника імпедансу [9] (рис. 1). На ній: Г — генератор синусоїдального сигналу, ВЛ — вимірювальний ланцюжок,  $K_1$  — комутатор для послідовного підключення диференціального підсилювача П до вимірюваного  $Z_x$  і еталонного  $Z_0$  імпедансів, синхронний детектор СД, фазообертач  $\Phi_{90}$ , аналого-цифровий перетворювач АЦП, мікроконтролер МК, цифровий індикатор І.

Вимірник працює у такий спосіб. Сигнал генератора надходить на об'єкт вимірювання  $Z_x$ , підключений до входу захисного підсилювача, зібраного на операційному підсилювачі П. У ланцюжок зво-

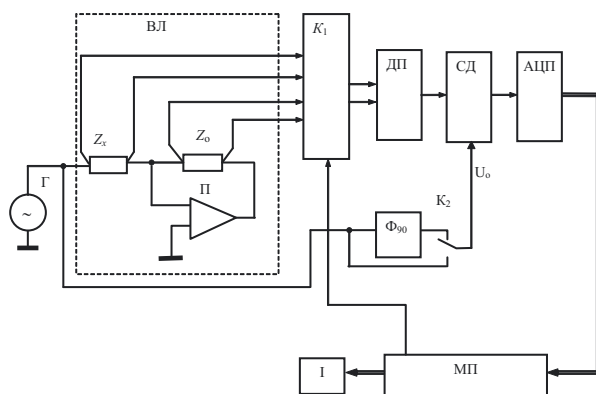


Рис. 1

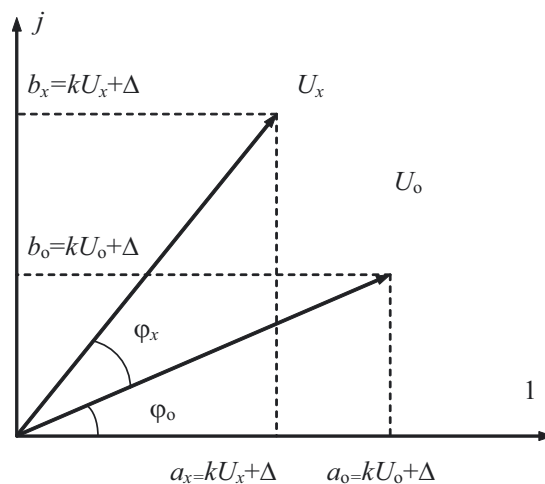


Рис. 2

ротного зв'язку цього підсилювача включено еталонну міру  $Z_0$ . Як правило (хоча й не завжди), еталонна міра  $Z_0$  виконується у виді еталонного резистора  $R_0$ .

Струм, збуджуваний генератором в об'єкті вимірювання  $Z_x$ , протікає через еталонний опір  $R_0$ . Тому справедливим є рівняння (1), що пов'язує відношення падінь напруг  $U_x$  і  $U_0$  на об'єкті вимірювання й еталонній мірі з відношенням відповідних імпедансів:

$$U_x / U_0 = Z_x / Z_0. \quad (1)$$

Як видно із наведеного рівняння, для визначення імпедансу  $Z_x$  необхідно вимірити дві напруги —  $U_x$  і  $U_0$ . Для цього їх за допомогою  $K_1$  подають на ВВ, що складається з послідовно включених ДП, СД і АЦП. СД за чергою (або одночасно за двома паралельними каналами) виділяє синфазну й квадратурну складові вимірюваного сигналу. Для цього на опорний вхід СД за чергою подають за допомогою  $K_2$  і  $\Phi_{90}$  відповідно синфазну або квадратурну опорні напруги  $U_{oc}$  і  $U_{ок}$ . ВВ вимірює дві складові  $a$  й  $b$  напруги  $U_x$  і дві складові  $c$  й  $d$  напруги  $U_0$  (рис. 2).

Результати вимірювань у цифровій формі надходять на мікропроцесор МП, який розраховує шуканий імпеданс за формулами (2), та індидує його на індикаторі І (далі уважатимемо, що  $Z_0 = R_0$ ):

$$Z_x = \frac{a_x + jb_x}{a_0 + jb_0}, \quad B_x = R_0 \frac{a_0 b_x - b_0 a_x}{(a_0)^2 + (b_0)^2},$$

$$R_x = R_0 \frac{a_x a_0 + b_x b_0}{(a_0)^2 + (b_0)^2}. \quad (2)$$

Із рівнянь (2) видно, що за використання одноканального вольтметра на результат вимірювання не впливає його мультиплікативна похибка. На похибку вимірювання імпедансу впливають такі складові похибки ВВ:



- адитивна похибка в одноканальному й дво-канальному ВВ;
- різниця мультиплікативних похибок каналів двоканального ВВ;
- похибка від несиметрії синхронного детектора ВВ;
- похибка від нелінійності ВВ;
- неідеальність квадратури опорних напруг ВВ;
- чутливість ВВ.

Нижче аналізується вплив кожного зі згаданих джерел похибки на результат вимірювання.

## 2.2. Вплив адитивної похибки одноканально-го вольтметра на результат вимірювання

Припустимо, що одноканальний ВВ має адитивну похибку  $\Delta$ . Тоді результати вимірювання напруг  $U_x$  або  $U_o$  описуються рівняннями:

$$a = kU_c + \Delta; b = kU_k + \Delta, \quad (3)$$

де  $k$  — коефіцієнт перетворення вольтметра.

Величина  $\Delta$  складається із двох складових: зсуву нуля ВВ (детермінована складова  $\Delta_0$ ) і вхідних шумів (випадкова складова  $\Delta_{ш}$ ).

Припустимо, що вольтметр має динамічний діапазон  $A_m$ , який використовується у такий спосіб, що:

$$\alpha A_m = a_0^2 + b_0^2, \text{ і } \alpha A_m \geq a_x^2 + b_x^2, \quad (4)$$

де:  $\alpha$  — коефіцієнт використання динамічного діапазону ВВ.

Підставимо рівняння (4) у рівняння (2). Тоді отримаємо такі співвідношення, які описують результат вимірювання імпедансу  $Z_x (Z_x = R_x + jB_x)$ :

$$\begin{aligned} R_x &\approx R_{xn} (1 - 2\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0)) + R_0\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0) + \\ &\quad + |Z_x| \delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0 + \varphi_x), \\ B_x &\approx R_{xn} (1 - 2\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0)) + R_0\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 - \varphi_0) + \\ &\quad + |Z_x| \delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 - \varphi_0 - \varphi_x), \end{aligned} \quad (5)$$

де:  $\varphi_0$  — фазовий зсув сигналу у ВВ,  $\varphi_x$  — фазовий зсув між напругами на об'єкті вимірювання й еталонній мірі,  $\delta = \Delta / \alpha A_m$  — приведена до кінця діапазону адитивна похибка вольтметра,  $R_{xn}$  і  $B_{xn}$  — дійсні значення величин  $R_x$  і  $B_x$ .

Проаналізуємо отримані вирази для окремих випадків. Припустимо, що вимірюється активний опір з малим значенням кута  $\varphi_x \rightarrow 0$  («чистий» опір). У цьому випадку  $Z_x \approx R_x$ . Тоді із рівнянь (5) можна отримати такі вирази для мультиплікативної  $\delta_r$  й адитивних  $\Delta_r$  і  $\Delta_b$  складових похибки вимірювання параметрів імпедансу:

$$\begin{aligned} \delta_r &\approx -\delta\sqrt{2} (2 \sin(\pi/4 + \varphi_0) - \sin(\pi/4 + \varphi_0 + \varphi_x)) \approx \\ &\approx -\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_r &\approx R_0\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0); \\ \Delta_b &\approx R_0\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 - \varphi_0). \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння (6) показують, що похибка вимірювання є синусоїдальною функцією фазового зсуву  $\varphi_0$  вимірюваної напруги у векторному вольтметрі.

За близького до нуля значення величини  $\varphi_0$  (що звичайно має місце) відповідні складові похибки вимірювання дорівнюють:

$$\delta_r \approx -\delta; \Delta_r / R_0 \approx \delta; \Delta_b / R_0 \approx \delta. \quad (7)$$

Припустимо, що вимірюється реактивний опір зі значенням кута  $\varphi_x \rightarrow \pi/2$  («чиста» ємність).

У цьому випадку  $Z_x \approx 1 / j\omega C_x$ . Тоді із рівнянь (5) можна отримати такі вирази для мультиплікативної  $\delta_b$  й адитивних  $\Delta_r$  і  $\Delta_b$  складових похибки вимірювання параметрів імпедансу:

$$\begin{aligned} \delta_b &\approx -\delta\sqrt{2} (2 \sin(\pi/4 + \varphi_0) - \sin(\pi/4 - \varphi_0 - \varphi_x)) \approx \\ &\approx -3\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0); \\ \Delta_r &\approx R_0\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0); \\ \Delta_b &\approx R_0\delta\sqrt{2} \sin(\pi/4 - \varphi_0). \end{aligned} \quad (8)$$

За близького до нуля значення величини  $\varphi_0$  відповідні складові похибки вимірювання дорівнюють:

$$\delta_r \approx -3\delta; \Delta_r / R_0 \approx \delta; \Delta_b / R_0 \approx \delta. \quad (9)$$

Рівняння (6—9) показують, що похибка вимірювання імпедансу суттєво залежить від адитивної похибки ВВ. При цьому мультиплікативна похибка вимірювання є помітно більшою у випадку вимірювання ємності, ніж у разі вимірювання опорного. Аналіз показує, якби за еталонну міру використовувався конденсатор, ситуація була б зворотною: мультиплікативна похибка під час вимірювання опорного була б більшою, ніж за вимірювання ємності.

Для усунення впливу зсуву нуля ВВ звичайно до алгоритму роботи вимірника уводять вимірювання цієї величини й її виключення у цифровій формі. Тоді на результат вимірювання імпедансів впливають лише шуми ВВ.

Рівняння (6—9) дозволяють оцінити й вплив шумів ВВ на результат вимірювання. Із цією метою додавання складових похибки слід вести з урахуванням того, що це випадкові некорельовані величини. Уважаючи, що ці величини розподілені за нормальним законом, отримаємо, що  $\delta_r \approx \delta_b \approx \sqrt{5}\delta$ . Решта випадкових складових похибки вимірювання визначається за формулами (7, 9).

Наведені рівняння показують, що вплив шумів ВВ на похибку вимірювання збільшується наприкінці шкали. Тут цей вплив помітно зростає (більше,

ніж у 2 рази) порівняно із впливом шумів у приладах зрівноважування. На початку шкали випадкова складова похибки вимірювання імпедансу визначається приведеним значенням шумів ВВ й має приблизно таку ж величину, що й у приладах зрівноважування.

У загальному випадку, за вимірювання параметрів об'єктів з довільним значенням фазового кута  $\varphi_x$  й фазового зсуву  $\varphi_0$  у ВВ максимальні значення похибки вимірювання, обумовлені шумами ВВ, збільшуються приблизно у півтора рази:  $\delta_r \approx \delta_c \approx \sqrt{10}\delta$ .

### 2.3 Вплив похибки каналів двоканального вольтметра на результат вимірювання

2.3.1 Визначення впливу адитивних похибок каналів двоканального вольтметра на результат вимірювання

Із урахуванням впливу адитивних похибок каналів двоканального вольтметра на результат вимірювання формули (2) можна записати у виді:

$$R_x = R_0 \frac{(a_x + \Delta_1)(a_0 + \Delta_1) + (b_x + \Delta_2)(b_0 + \Delta_2)}{(a_0 + \Delta_1)^2 + (b_0 + \Delta_2)^2},$$

$$B_x = R_0 \frac{(a_0 + \Delta_1)(b_x + \Delta_2) - (b_0 + \Delta_2)(a_x + \Delta_1)}{(a_0 + \Delta_1)^2 + (b_0 + \Delta_2)^2}, \quad (10)$$

де:  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  — адитивні похибки каналів двоканального вольтметра.

Після математичних перетворень можна записати такі співвідношення:

$$\begin{aligned} \delta_r &\approx -2(\delta_1 \cos \varphi_0 + \delta_2 \sin \varphi_0) + \\ &+ \delta_2 \sin(\varphi_0 + \varphi_x) + \delta_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_x), \\ \Delta_r &\approx R_0(\delta_2 \sin \varphi_0 + \delta_1 \cos \varphi_0), \\ \delta_b &\approx -2(\delta_1 \cos \varphi_0 + \delta_2 \sin \varphi_0) + \\ &+ \delta_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_x) - \delta_2 \cos(\varphi_0 + \varphi_x), \\ \Delta_b &\approx R_0(\delta_2 \cos \varphi_0 - \delta_1 \sin \varphi_0), \end{aligned} \quad (11)$$

де:  $\delta_1, \delta_2$  — приведені до кінця діапазону похибки каналів вольтметра, що дорівнюють ( $\delta_1 = \Delta_1 / \alpha A_m$ ), ( $\delta_2 = \Delta_2 / \alpha A_m$ ), відповідно.

Аналіз наведених рівнянь дозволяє зробити висновки:

1. Похибка вимірювання параметрів комплексного опору є функцією, симетричною відносно адитивних похибок каналів.

2. Похибки вимірювання за рівності нулю похибки синфазного каналу або за рівності нулю похибки квадратурних каналів є рівними за інших рівних умов.

3. Максимальне значення похибки вимірювання параметрів імпедансу приблизно удвічі перевищує похибку окремого каналу ВВ.

### 2.3.2 Визначення впливу нерівності модулів коефіцієнтів передавання каналів ВВ на результат вимірювання

Із урахуванням похибок коефіцієнтів передавання каналів вольтметра формули (2) можна записати у виді:

$$R_x = R_0 \frac{K_a a_x K_a a_0 + K_b b_x K_b b_0}{(K_a a_0)^2 + (K_b b_0)^2},$$

$$B_x = R_0 \frac{K_a a_0 K_b b_x - K_b b_0 K_a a_x}{(K_a a_0)^2 + (K_b b_0)^2}. \quad (12)$$

Позначимо  $K_b / K_a = 1 + \delta K$ .

Тоді є справедливими такі співвідношення:

$$\begin{aligned} \delta_r &\approx -\delta K[(2 \sin^2 \varphi_0 - \sin \varphi_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_x)], \\ \delta_b &\approx -\delta K[(2 \sin^2 \varphi_0 - \sin \varphi_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_x)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння (13) показують, що нерівність модулів коефіцієнтів підсилення каналів ВВ призводить до появи лише мультиплікативної похибки.

Розглянемо випадки вимірювання «чистого опору» ( $\varphi_x \rightarrow 0$ ) і «чистої ємності» ( $\varphi_x \rightarrow \pi/2$ ).

Тоді із (13) отримаємо:

$$\delta_r = \delta_b \approx -\delta K \sin^2 \varphi_0. \quad (14)$$

Звідси видно, що за малих значень фазового зсуву  $\varphi_0$  сигналу у ВВ нерівність модулів коефіцієнтів підсилення каналів ВВ не призводить до значних похибок. Однак за великих значень  $\varphi_0$  (що має місце звичайно на високих частотах) складова похибки вимірювання імпедансу, що розглядається, має порядок  $\delta K$ .

Вплив різниці фазових затримок (різниці величини  $\varphi_0$  для кожного із каналів ВВ) у каналах ВВ еквівалентний впливу на похибку вимірювання неквадратності опорних напруг ВВ, тому він окремо не розглядається.

### 2.4 Вплив неквадратності опорних сигналів вольтметра на результат вимірювання

Припустимо, що уявна вісь системи ортовекторів (1; j) повернена на кут  $\Delta\varphi$  (рис. 3) відносно номінального положення. Тоді складові вимірюваних векторів відповідатимуть рівнянням (15):

$$\begin{aligned} b'_x &= b_{xm} [\cos \Delta\varphi + \text{ctg}(\varphi_0 + \varphi_x) \cdot \sin \Delta\varphi]; \\ b'_0 &= b_{0n} [\cos \Delta\varphi + \text{ctg} \varphi_0 \cdot \sin \Delta\varphi]. \end{aligned} \quad (15)$$

Після підстановки (15) у рівняння (2) отримаємо такі вирази:

$$\begin{aligned} \delta_r &\approx 2\Delta\varphi [\cos(2\varphi_0 + \varphi_x/2) \cdot \sin(\varphi_x/2)]; \Delta_r \rightarrow 0; \\ \delta_b &\approx -\Delta\varphi \cdot \sin 2\varphi_0; \Delta_b \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Рівняння (16) показують, що неквадратність опорних напруг у ВВ призводить до появи мультиплікативних похибок у вимірюванні обох складових імпедансу. Як і очікувалося, ці похибки є пропорційними

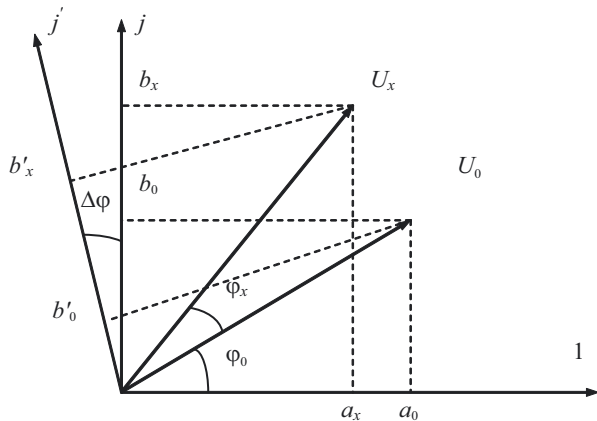


Рис. 3

відхиленню  $\Delta\varphi$  від перпендикулярності осей координат. При цьому похибки вимірювання достатньо складним способом залежать від величин  $\varphi_0$  і  $\varphi_x$ .

## 2.5 Вплив нелінійності ВВ на результат вимірювання

Нелінійність ВВ визначається нелінійністю сукупності всіх його каскадів і описується складною функцією, вид якої залежить від його технічної реалізації.

Розглянемо вплив нелінійності функції перетворення одноканального ВВ на результат вимірювання. Для такої реалізації ВВ можна допустити, що функція перетворення ВВ не залежить від того, яка із квадратурних складових вхідної напруги підлягає вимірюванню. У цьому випадку функцію перетворення можна описати степеневим поліномом:

$$U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} = 1 + \delta_n, \quad (17)$$

де:  $\delta_n$  — поліном, що описує залежність похибки ВВ від величини вимірюваної напруги.

Із урахуванням цього запишемо рівняння (2) у формі:

$$\begin{aligned} R_x &= R_0 \frac{a_x(1+\delta_{nax})a_o(1+\delta_{nao}) + b_x(1+\delta_{nbx})b_o(1+\delta_{nbo})}{a_o^2(1+\delta_{nao})^2 + b_o^2(1+\delta_{nbo})^2} \approx \\ &\approx R_{xn} \left[ 1 - 2(\delta_{nao} \cos^2 \varphi_0 + \delta_{nbo} \sin^2 \varphi_0) \right] + \\ &+ R_0(\delta_{nax} + \delta_{nbo}) \cos \varphi_0 \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_x) + \\ &+ \left| \frac{Z_x}{Z_0} \right| (\delta_{nbx} + \delta_{nbo}) \sin \varphi_0 \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_x); \\ B_x &= R_0 \frac{b_x(1+\delta_{nbx})a_o(1+\delta_{nao}) - a_x(1+\delta_{nax})b_o(1+\delta_{nbo})}{a_o^2(1+\delta_{nao})^2 + b_o^2(1+\delta_{nbo})^2} \approx \\ &\approx B_{xn} \left[ 1 - 2(\delta_{nao} \cos^2 \varphi_0 + \delta_{nbo} \sin^2 \varphi_0) \right] + \\ &+ R_0(\delta_{nbx} + \delta_{nao}) \cos \varphi_0 \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_x) - \\ &- \left| \frac{Z_x}{Z_0} \right| (\delta_{nax} + \delta_{nbo}) \sin \varphi_0 \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_x), \end{aligned} \quad (18)$$

де:  $\delta_{nao}$ ,  $\delta_{nax}$ ,  $\delta_{nbo}$ ,  $\delta_{nbx}$  — відносні значення похибки (полінома  $\delta_n$ ) від нелінійності для відповідних зна-

чень компонентів напруг.

Отримані вирази достатньо складні для аналізу. Розглянемо окремі випадки.

Припустимо, що вимірюється «чистий опір», а фазовий зсув сигналу у ВВ є малим ( $\varphi_0 \rightarrow 0$  і  $\varphi_x \rightarrow 0$ ). Тоді:

$$R_x \approx R_{xn}(1 - \delta_{nao} + \delta_{nax}) \text{ і } B_x \approx B_{xn}(1 - 2\delta_{nao}). \quad (19)$$

Припустимо тепер, що вимірюється «чиста ємність», а фазовий зсув сигналу у ВВ, як і раніше, є малим ( $\varphi_0 \rightarrow 0$  і  $\varphi_x \rightarrow \pi/2$ ). Тоді:

$$B_x \approx B_{xn}(1 - \delta_{nao} + \delta_{nbx}) \text{ і } R_x \approx R_{xn}(1 - 2\delta_{nao}). \quad (20)$$

Вирази (19) і (20) демонструють, що похибка вимірювання переважаючої складової імпедансу визначається різницею похибок від нелінійності ВВ під час вимірювання переважаючих напруг на об'єкті вимірювання й (або) міри. Абсолютна похибка вимірювання другої складової імпедансу, що виникає у цьому випадку, є незначною. Оскільки похибка вимірювання переважаючих складових імпедансу є функцією величин  $\delta_{nao}$ ,  $\delta_{nax}$ ,  $\delta_{nbo}$ ,  $\delta_{nbx}$ , що змінюються у діапазоні вимірювання, ця похибка також є нелінійною й змінюється у діапазоні вимірювання.

## 2.6 Вплив чутливості СД ВВ до вищих гармонік генератора на результат вимірювання

Припустимо, що сигнал генератора  $U_g$  не є чисто синусоїдальним, містить вищі гармоніки й описується рівнянням:

$$U_g = \sum_{i=1}^n U_{gi} \sin(i\omega t + \varphi_i). \quad (21)$$

Напруги  $U_x$  й  $U_0$ , що діють на об'єкті вимірювання й еталонній мірі, без урахування впливу опорів проводів, що підводяться, у цьому випадку дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} U_x &= U_g = \sum_{i=1}^n U_{gi} \sin(i\omega t + \varphi_i), \\ U_0 &= \frac{Z_0}{Z_x} \cdot \sum_{i=1}^n U_{gi} \sin(i\omega t + \varphi_i). \end{aligned} \quad (22)$$

Ідеальний синхронний детектор має синусоїдальну еквівалентну опорну напругу. Тому він повністю подавляє всі вищі гармоніки, присутні в детектованому сигналі.

Реальний детектор має опорну напругу, яку можна описати певним спектром, подібним напрузі генератора:

$$U_d = \sum_{i=1}^n U_{di} \sin(i\omega t + \varphi_i). \quad (23)$$

Детектор перемножує вхідні  $U_x$  або  $U_0$  напруги й опорну  $U_d$ . Пронормуємо опорну напругу детектора, припустивши, що  $U_{d1} = 1$ . Постійна складова вихідної напруги СД визначається сумою добутків

компонент вхідної й опорної напруг, що мають однакову частоту.

$$\begin{aligned} a_0 &= kU_{01} \cos \varphi_{01} \cdot \left[ 1 + \frac{Z_0(i\omega)}{Z_x(i\omega)} \sum_2^n K_{ig} K_{id} \cos(\varphi_{ig} - \varphi_{id}) \right], \\ b_0 &= kU_{01} \sin \varphi_{01} \cdot \left[ 1 + \frac{Z_0(i\omega)}{Z_x(i\omega)} \sum_2^n K_{ig} K_{id} \sin(\varphi_{ig} - \varphi_{id}) \right], \\ a_x &= kU_{x1} \cos(\varphi_{01} + \varphi_{x1}) \cdot \left[ 1 + \sum_2^n K_{ig} K_{id} \cos(\varphi_{ig} - \varphi_{id}) \right], \\ b_x &= kU_{x1} \sin(\varphi_{01} + \varphi_{x1}) \cdot \left[ 1 + \sum_2^n K_{ig} K_{id} \sin(\varphi_{ig} - \varphi_{id}) \right], \end{aligned} \quad (24)$$

де:  $K_{ig}, K_{id}$  — коефіцієнти  $i$ -тої гармоніки (клір-фактори) у напругах генератора й опорної напруги СД:  $K_{ig} = U_{ig} / U_{lg}$  і  $K_{id} = U_{id} / U_{ld}$ .

Рівняння (24) демонструють, що наявність вищих гармонік у напрузі генератора й опорній напрузі СД може призводити до появи додаткової похибки вимірювання. Ця похибка є пропорційною добутку клір-факторів напруги генератора й опорної напруги СД. Вона залежить не лише від амплітуди вищих гармонік, але й від їхньої фази, що ускладнює її аналіз. Тому розглянемо кілька випадків.

1. Припустимо, що вимірюється «чистий опір». Тоді вирази для напруг  $U_x$  і  $U_0$  можна розглядати як помножені на однаковий, що мало відрізняється від одиниці, множник, який у результаті ділення скорочується. Тому вплив вищих гармонік випадку вимірювання «чистого опору» є практично відсутнім.

2. Припустимо, що вимірюється опір з індуктивним характером. Тоді рівень вищих гармонік у сигналі  $U_0$ , що діє на еталонній мірі, є меншим за рівень вищих гармонік у сигналі  $U_x$ , що діє на об'єкті вимірювання. При цьому рівень вищих гармонік у сигналі  $U_0$  спадає із швидшою частотою ніж рівень вищих гармонік у сигналі  $U_x$ . Тому з'являється похибка вимірювання, рівень якої не перевищує суми добутків  $\sum_2^n K_{ig} K_{id}$ .

3. Припустимо, що вимірюється опір з ємнісним характером. Тоді рівень вищих гармонік у сигналі  $U_0$ , що діє на еталонній мірі, є більшим за рівень вищих гармонік у сигналі  $U_x$ , що діє на об'єкті вимірювання. При цьому рівень вищих гармонік у сигналі  $U_0$  значно повільніше спадає із частотою, ніж рівень вищих гармонік у сигналі  $U_x$ . Тому з'являється похибка вимірювання, рівень якої визначається виразом  $\omega C_x R_0 \sum_2^n K_{ig} K_{id}$ . Якщо уважати, що  $K_{ig}$  спадає обернено пропорційно частоті, похибку вимірювання імпедансу в цьому випадку можна оцінити виразом  $\sum_2^n K_{id}$ , і вона значно перевищує відповідну похибку у випадку вимірювання інших видів імпедансу.

4. Із зазначеного випливає, що для зниження похибки вимірювання, обумовленої вищими гармоніками, об'єкт вимірювання й еталонну міру раціонально включати у такий спосіб, щоб вимірювальний ланцюжок описувався інтегрувальною ланкою.

## 2.7 Впливи похибки від небалансу СД ВВ на результат вимірення

У вузлах реального вимірювального ланцюжка (генератор, захисний підсилювач, диференціальний підсилювач) завжди є деякі напруги зсуву. Це призводить до того, що під час вимірювання напруг  $U_x$  або  $U_0$  на вхід детектора надходять також напруги зсуву постійного струму. Величина цих напруг особливо зростає за великих коефіцієнтів підсилення диференціального підсилювача (така ситуація звичайно має місце на низькоомних межах вимірювання). Тут напруги зсуву можуть досягати (10—30) % від робочого сигналу. Ідеально симетричний СД ВВ повністю подавляє такі напруги, тому його вихідний сигнал залежить лише від змінної складової вхідного сигналу. Однак будь-який СД подавляє постійну складову не повністю, а з певним коефіцієнтом подавлення  $K_p$ . У результаті на виході детектора діє певний додатковий сигнал постійного струму, що призводить до появи додаткової похибки вимірювання. Цю складову похибки не можна виключити звичайним урахуванням нулів ВВ, оскільки, крім коефіцієнта подавлення  $K_p$ , додаткова напруга на виході СД також залежить від того, яка із напруг  $U_x$  або  $U_0$  вимірюється, на якому діапазоні і за якого рівня робочого сигналу проводиться вимірювання, тощо.

Припустимо, що на вході СД діють за чергою дві напруги:  $U_x + U_{x0}$  та  $U_0 + U_{00}$ , де  $U_{x0}$  та  $U_{00}$  — постійні напруги зсуву на об'єкті вимірювання й еталонній мірі, а СД має коефіцієнт подавлення постійної складової  $K_p$ . Тоді рівняння (2) можна записати у формі:

$$\begin{aligned} R_x &= R_0 \frac{(a_x + \Delta_x)(a_0 + \Delta_0) + (b_x + \Delta_x)(b_0 + \Delta_0)}{(a_0 + \Delta_0)^2 + (b_0 + \Delta_0)^2}, \\ B_x &= R_0 \frac{(a_0 + \Delta_0)(b_x + \Delta_x) - (b_0 + \Delta_0)(a_x + \Delta_x)}{(a_0 + \Delta_0)^2 + (b_0 + \Delta_0)^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Тут:  $\Delta_x = K_p U_{x0}$  і  $\Delta_0 = K_p U_{00}$ .

Звідси після перетворень отримаємо:

$$\delta_r \approx -\delta_0 \sqrt{2} (2 \sin(\pi/4 + \varphi_0) - \sin(\pi/4 + \varphi_0 + \varphi_x));$$

$$\begin{aligned} \Delta_r &\approx R_0 \delta_x \sqrt{2} \sin(\pi/4 + \varphi_0); \\ \delta_b &\approx -\delta_0 \sqrt{2} (2 \sin(\pi/4 + \varphi_0) - \sin(\pi/4 - \varphi_0 - \varphi_x)); \end{aligned} \quad (26)$$

$$\Delta_b \approx R_0 \delta_x \sqrt{2} \sin(\pi/4 - \varphi_0),$$

де:  $\delta_0 = \Delta_0 / \alpha A_m$ ;  $\delta_x = \Delta_x / \alpha A_m$ .



Рівняння (26) показують, що похибки, обумовлені несиметрією СД, є пропорційними наведеному значенню завади постійному струму й коефіцієнту неідеальності СД. Ці рівняння дозволяють оцінити допустиме значення неідеальності СД залежно від допустимої похибки вимірювання.

### ВИСНОВКИ

1. Похибка ВВ суттєво впливає на похибку вимірювання імпедансу. Проведений аналіз дозволив знайти складові похибки вимірювання параметрів імпедансу як функції різних складових похибки ВВ. Це дозволяє визначити вимоги практично до всіх параметрів ВВ.

2. Проведений аналіз показав, що складові похибки вимірювання імпедансу залежать і від фазо-

вих зсувів у тракці ВВ, і від фазових співвідношень вимірюваного й еталонного імпедансів.

3. Ураховуючи, що результат вимірювання імпедансу обчислюється за чотирма виміряними напругами (ортогональними компонентами напруг на об'єкті вимірювання), має місце накопичення похибок, що призводить у певних випадках до перевищення похибкою вимірювання імпедансу похибки вимірювання ВВ у 2—2,5 рази.

4. Для зниження похибки вимірювання імпедансу необхідно прагнути до зменшення фазових зсувів у підсилювачі ВВ, тобто частота зрізу підсилювача ВВ має у кілька разів перевищувати максимальну робочу частоту, а необхідна для виконання вимірювань вибірковість має забезпечуватися СД ВВ.

### ЛІТЕРАТУРА

- Hall Henry P., A History of Z measurement., IET Lab Inc., 64 pp. [www.ietlabs.com/pdf/GenRad\\_History/A\\_History\\_of\\_Z\\_Measurement.pdf](http://www.ietlabs.com/pdf/GenRad_History/A_History_of_Z_Measurement.pdf)
- Blumlein A.D., British Patent No. 323,037, Alternating Bridge circuits. The Illustrated Official Journal of Patents, 12 Feb. 1930, PP. 7727—7728.
- Brooks H.D., Holtz, F. C The Two-Stage Current Transformer., American Institute of Electrical Engineering, Transaction of., the Volume: XLI, PP. 382 — 393, Jan. 1922.
- Hall H.P. Method of and Apparatus for Automatic Measurement of Impedance or other Parameters with Microprocessor Calculation Techniques. Pat. USA, № 4196475. 1.04.80.
- Maeda K., Narimatsu Y. Multy-Frequency LCR Meter Test Components under Realistic Conditions // Hewlett-Packard Journal. — Vol. 30. — № 2, February 1979. — PP. 24—32.
- Models 4262, 4274A, 4275A, 4276^ 4277 // Measurement Computation systems. — Hewlett — Packard Catalogue. — USA, 1987. — P. 198—203.
- Gen Rad: GR 1689/1689M Precision RLC Digibridge / Instruction Manual. — June, 1985.
- М.Н. Сурду, А.Л. Ламеко, А.Е. Лабузов. Прецизионный RLC-метр // Измерительная Техника. — 2010. — № 9. — С. 54—57.
- Agilent Impedance Measurement Handbook; A guide to measurement technology and techniques; 4th Edition., [cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf](http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf)
- Agilent PN 4294A; New Technologies for Accurate Impedance Measurement; (40 Hz to 110 MHz), Product Note.
- Карандеев К.Б., Гриневич Ф.Б., Грохольский А.Л. и др. Быстродействующие электронные компенсационно-измерительные приборы. — М.: Энергия, 1978. — 134 с.
- Гриневич Ф. Б., Добров Е. Е., Карандеев К. Б. Автокомпесационные мостовые цепи // Автометрия. — 1965. — № 5. — С. 96—103.
- Кнеллер В. Ю. Средства измерения на основе персональных ЭВМ. / В. Ю. Кнеллер, А. М. Павлов // Измерения, контроль, автоматизация. — 1988. — № 3. — С. 3—14.
- Агамалов Ю. Р., Кнеллер В. Ю., Курчавов В. И. Преобразователь емкости и проводимости, работающий в непрерывном диапазоне частот // Приборы и системы управления. — 1978. — № 1. — С. 21—23.
- Кнеллер В. Ю., Павлов А. М. Автоматические измерители и преобразователи параметров комплексных сопротивлений с микропроцессорами // ИКА. — 1979. — № 11 — 12. — С. 11—21.
- Павлов А.М. О построении автоматических измерителей параметров комплексных величин со встроенным микропроцессором // Приборы и системы управления. — 1979. — № 12. — С. 11—13.
- Мелик-Шахназаров А.М., Алиев Т.М., Шайн И.Л., Автокомпесационные системы для измерения комплексных величин переменного тока // Приборы и системы управления. — 1971. — № 3. — С. 13—15. ■



**В. Гусельников**, кандидат технічних наук,  
професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»,  
**Є. Борисенко**, асистент кафедри,  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

*Розглянуто побудову експериментальної установки, яка дозволяє дослідити кількісні характеристики похибок ультразвукових вимірювачів рівня. Для цього розроблено структуру, що дозволяє накопичувати вимірювальну інформацію та зберігати її на ПК або іншому електронному пристрої, оснащеному портом USB. Як приклад проаналізовано похибки ультразвукового рівнеміра у процесі його роботи за складних умов та зі системою вбудованого тестового контролю.*

*Experimental apparatus structure that allows to research ultrasonic level meter error values is observed. Structure design that provides experimental data collecting and saving at any device with USB port is proposed. Ultrasonic level meter errors with embedded testing method system for operating in rough conditions are calculated*

**У**льтразвукові (УЗ) вимірники рівня рідких і сипких середовищ широко застосовуються у різних галузях промисловості. Це обумовлено дешевизною таких рівнемірів, простотою їх установлення, можливістю застосування для визначення рівня практично будь-яких середовищ. Слабкими сторонами УЗ рівнемірів є залежність забезпечуваної точності від умов вимірювання. Так, наявність у середовищі поширення УЗ сигналу турбулентностей і факторів, що призводять до зміни швидкості поширення УЗ, суттєво знижує забезпечувану точність. Тому актуальною проблемою є розроблення методів підвищення точності УЗ рівнемірів, що не призводять до істотного подорожчання й ускладнення останніх.

Існуючі на сьогодні способи підвищення точності УЗ рівнемірів компенсують похибку, що зумовлюється зміною температури або складу середовища поширення, але лише за відсутності градієнта цих параметрів уздовж напрямку поширення УЗ сигналу.



*В. Гусельников*



*Є. Борисенко*

Крім того, вони не здатні скомпенсувати знесення УЗ променя повітряними потоками [1, 2]. Тестові методи підвищення точності за певних умов здатні скомпенсувати зазначені похибки, однак для їхнього застосування потрібно було розробити структурну схему УЗ рівнеміра, що їх реалізує. Для оцінювання доцільності застосування тестових методів потрібно було визначити числові значення складових похибок УЗ рівнеміра зі системою тестового контролю й без нього. В УЗ рівнемірах є присутнім ряд джерел похибок [3]. Серед них джерелами систематичних похибок є:

- зміна швидкості поширення УЗ сигналу, яка, в основному, зумовлена зміною температури й складу середовища поширення;
- поглинання УЗ сигналу середовищем поширення, у результаті чого змінюється амплітуда луна-сигналу на вході компаратора й відбувається зсув моменту його спрацювання; звичайно ця складова похибки компенсується системами автоматичного регулювання посилення.

Джерелами випадкових похибок є:

- зміна швидкості поширення УЗ сигналу на неоднорідностях середовища поширення за наявності турбулентності;
- зміна поглинання УЗ сигналу на неоднорідностях середовища поширення, у результаті чого виникає випадковий зсув моменту спрацювання компаратора;
- заломлення УЗ променя на неоднорідностях, у результаті чого відбувається викривлення траєкторії проходження УЗ хвилі;
- знесення УЗ хвилі, у результаті чого викривлюється траєкторія її проходження

*Мета досліджень.* Границі систематичних складових можна визначити розрахунковим шляхом, але для визначення випадкових складових потрібно було провести експеримент, у якому б створювалися умови виникнення випадкових похибок і забезпечувалася реєстрація багаторазових спостережень для їхнього подальшого статистичного опрацювання.

У разі побудови системи тестового контролю УЗ рівнеміра додатково здійснюється адитивне й мультиплікативне тестування. У результаті для цифрового вимірника рівня отримують систему рівнянь виду [4]:

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{L}{c_0(1+\delta_c)T_0} + \frac{\Delta L}{c_0T_0}; \\ N_1 &= \frac{L+B}{c_0(1+\delta_c)T_0} + \frac{\Delta L}{c_0T_0}; \\ N_2 &= \frac{L}{c_0(1+\delta_c)KT_0} + \frac{\Delta L}{c_0KT_0}, \end{aligned}$$

де  $N_0, N_1, N_2$  — числа імпульсів за першого, другого

й третього вимірювань, відповідно;  $L$  — відстань до поверхні, що відбиває;  $c_0$  — швидкість звуку за нормальних умов (є теоретично відомою);  $B$  — відоме з високою точністю збільшення вимірюваної величини — «адитивний тест»;  $T_0$  — період проходження імпульсів стабільної частоти, що надходять на засіб вимірювання;  $\delta_c$  — результувальна похибка, що є об'єднанням мультиплікативних складових,  $\Delta L$  — результувальна похибка, що є об'єднанням адитивних складових;  $K$  — відома зміна періоду проходження імпульсів стабільної частоти, є мультиплікативним тестом.

Мультиплікативними складовими похибки є систематичні й випадкові похибки, зумовлені зміною швидкості поширення, знесенням, заломленням УЗ хвилі в середовищі поширення. Адитивними складовими похибки є систематичні й випадкові похибки, що призводять до зсуву моменту спрацювання аналогового компаратора.

У результаті розв'язку системи рівнянь різнице-вим методом отримуємо оцінку значення відстані:

$$\hat{L} = \frac{\Delta N_{20}}{\Delta N_{10}} \frac{KB}{(K-1)} - \Delta L(1+\delta_c).$$

Очевидно, що описаний метод здатний суттєво зменшити вплив мультиплікативних складових похибки, але при цьому адитивні складові збільшуються пропорційно результувальній мультиплікативній похибці. Для оцінювання ефективності підвищення точності УЗ рівнемірів цим методом необхідно було встановити числові значення похибок.

Для проведення досліджень використовувався експериментальний зразок УЗ рівнеміра, структурну схему якого представлено нижче.

Установка зібрана на базі МК ATMEGA8 виробництва компанії ATMEL. Використовуючи його апаратні ресурси й програмний код, генерувався зондувальний УЗ сигнал і здійснювалася реєстрація луни-сигналу. Принципову схему установки подано на рис. 1.

Середовищем написання й налагодження програми стало програмне забезпечення BASCOM AVR компанії MCS Electronics. Вибір зупинено на ньому з ряду причин:

- \* умовно-безкоштовна версія програми (за розміру коду програми до 4 кб) є доступною для вільного завантаження з офіційного сайту розроблювача;
- \* програмне середовище містить засоби симуляції, вбудований термінал, можливе «прошивання» (пересилання коду програми до Flash-Пам'яті МК) за використання сумісного програматора;
- \* програма створюється мовою Бейсик, який є добре відомим і має достатньо простий синтаксис, тому для написання програми не потрібно спеціальних навичок.

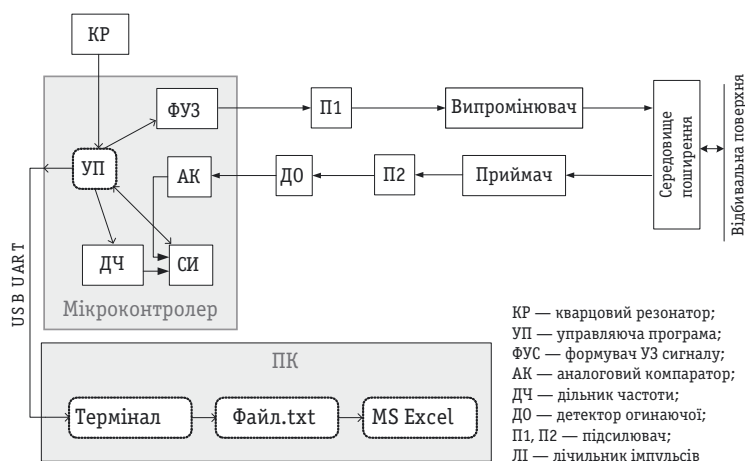


Рис. 1

Для передавання даних за UART-протоколом на персональний комп'ютер (ПК) потрібен перетворювач інтерфейсу (ПІ). Передавання даних через COM порт ПК використовується усе рідше, багато сучасних ПК уже не оснащуються COM портом. Тому ухвалено рішення як такий перетворювач використовувати мікросхему компанії FTDI серії FT232, що дозволяє передавати дані через USB порт. Це дозволило здійснити передавання даних не лише на стаціонарний ПК, але й на портативні пристрої (ноутбук, планшетний ПК), переважна більшість яких мають порт USB. Як UART приймально-передавач використано STK 500-сумісний програматор, що підключається до Usb-Порта, в якому перетворювачем інтерфейсу є ІМС FT232В. У цьому програматорі режим роботи може змінюватися з Ісп-Програмування на приймання або передавання інформації з UART шляхом установлення відповідних перемичок.

В експериментальній установці це МК тактирувався зовнішнім кварцовим резонатором (КР) 8 МГц. Згідно з технічною документацією виробника, за використання такого КР МК здатний передавати інформацію із протоколу UART на швидкості до 1 Мбіт/с (за умови кратності частоти кварцового резонатора й низького рівня завад у каналі зв'язку). Під час проведення досліджень досягнуто швидкості передавання інформації 128000 бод, чого було цілком достатньо для передавання вимірювальної інформації без затримок і з мінімальною кількістю помилок (близько 0,1 %).

На рис. 2 показано діалогове вікно конфігурації емулятора терміналу, що входить до складу програмного пакета BASCOM. Швидкість передавання (baudrate) має бути точно такою, як зазначено у коді програми в МК. У списку, що випадає, «COM port» указувався як номер порта, до якого підключено ПІ. У цьому списку є відсутнім варіант USB, оскільки за підключення ПІ до ПК на останньому створювався віртуальний COM порт, якому привласнювався певний номер.

Для збереження даних, передаваних до терміналу безперервно у часі, у BASCOM реалізована можливість запису файлу реєстрації (LOG-файлу). Інформація у цьому файлі зберігається у текстовому або двійковому форматі, тому його можна згодом відкрити будь-яким текстовим редактором. Отримані дані передавалися до редактора електронних таблиць MS EXCEL, де проводилися їхні аналізування й опрацювання.

Зовнішній вид експериментальної установки показано на рис. 3.

П'єзоелектричні перетворювачі 1, 2 й електронний блок 4 жорстко закріплено до штатива 4 за допомогою поперечини 3. Штатив 4 можна переміщувати у вертикальному напрямку за допомогою 5 обертанням рукояті 6. На одній із напрямних закріплено лінійку, за якою установлювалося переміщення. Під час проведення досліджень поперечина 3 установлювалася або, як показано на рис. 3, або поверталася на 90° у такий спосіб, що УЗ сигнал поширювався у вертикальному напрямку. Так реалізована можливість вимірювання різних відстаней — до 3 м за вертикального напрямку випромінювання й до 5 м за горизонтального.

В експериментальних дослідженнях застосовувалися оборотні приймачі / випромінювачі BPU1640

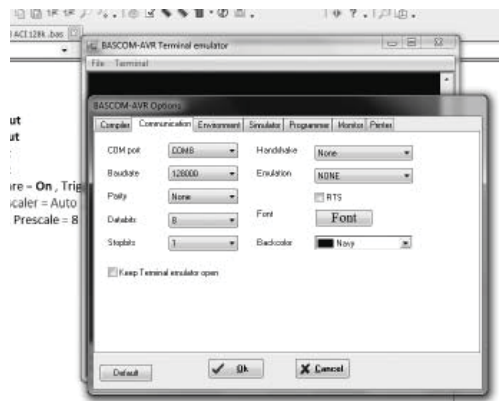


Рис. 2

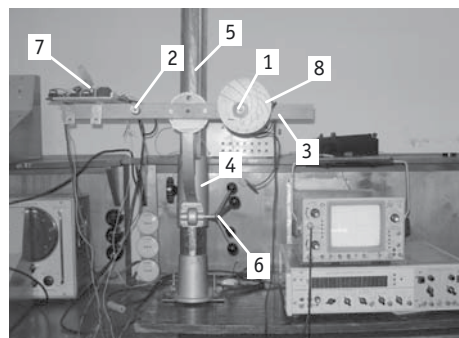


Рис. 3



виробництва BESTAR, на рис. 3 такий показано із установленим кінчним рупором 8. Рупор використовувався для звуження діаграми направленості застосовуваних п'єзоперетворювачів і наближення її виду до діаграми перетворювачів, що використовуються у промислових вимірниках рівня.

Датчик, що використовувався, є оборотним, тобто може використовуватися як передавач, так і як приймач. Він є датчиком відкритого типу, тобто може використовуватися лише за випромінювання у газоподібні середовища.

У результаті проведення експериментів отримано дані, за якими побудовано графіки зміни кількості рахованих імпульсів у часі  $N_x(t)$  і законів розподілу  $Q(N_x)$ , представлені на рис. 4—7. На рис. 4 показано залежності, отримані за спокійного середовища поширення, вимірювання проводилися у за-

критому приміщенні лабораторії кафедри ІВТС НТУ «ХПІ». Видно, що закон розподілу відображає наявність лише похибки квантування.

На рис. 5 показано залежності, отримані за наявності у середовищі поширення повітряних потоків однорідної температури. Закон розподілу відображає наявність, окрім похибки квантування, випадкової похибки, обумовленої або зміною амплітуди сигналу на вході компаратора, або знесенням УЗ хвилі й скривленням траєкторії проходження УЗ сигналу. Значення цієї похибки визначається половиною довжини хвилі УЗ сигналу й за слабких флуктуацій амплітуди має бути меншим від неї. За частоти 40 кГц половина довжини хвилі становить 4 мм або 11—12 імпульсів стабільної частоти. Похибка становить 8—10 імпульсів стабільної частоти, тобто знесення сигналу є практично відсутнім (рис. 5).

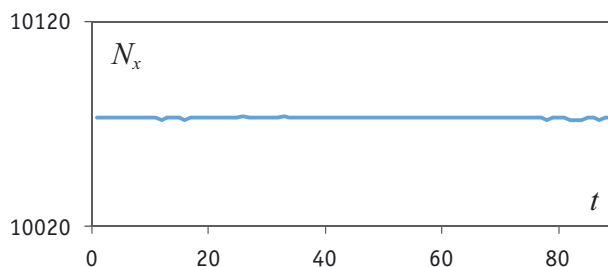
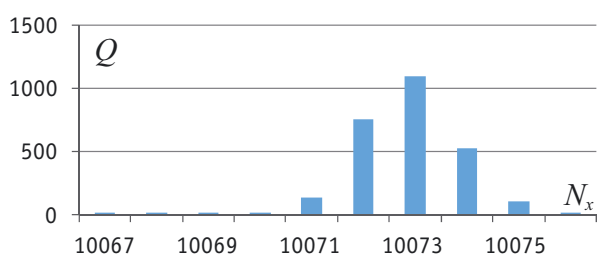


Рис. 4

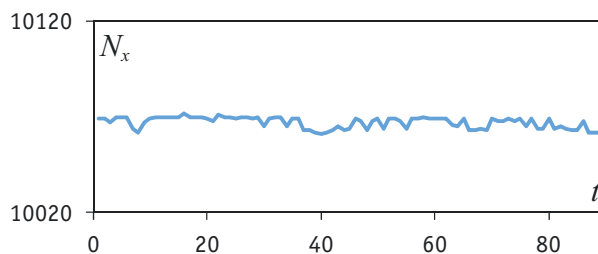
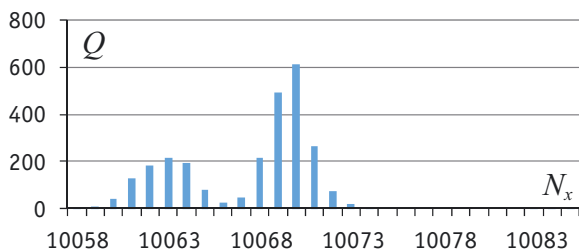


Рис. 5

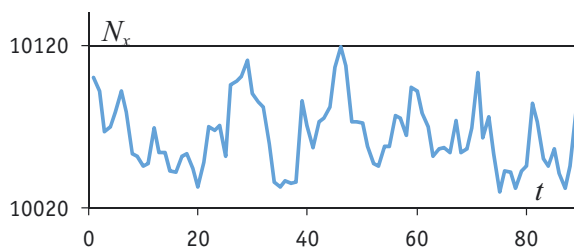
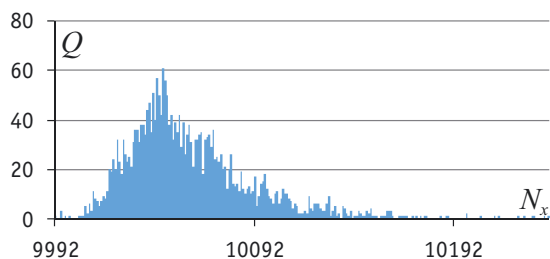


Рис. 6

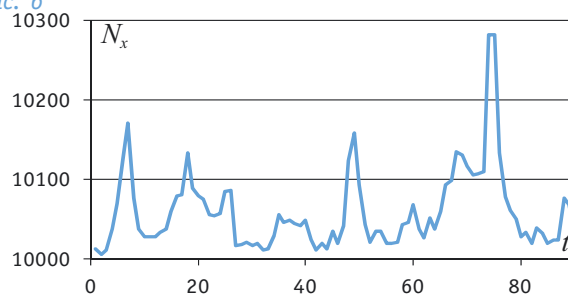
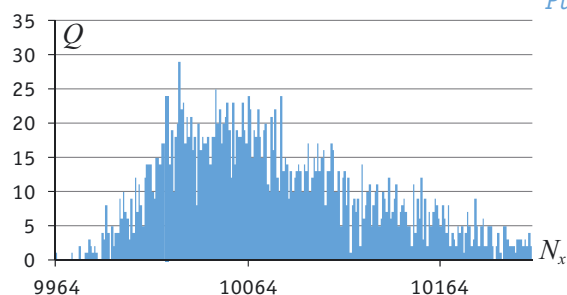


Рис. 7

Таблиця

Експериментальні дані	$S_{\Sigma_E}, \%$	$S_{\text{кв}}, \%$	$S_{\text{п}}, \%$	$S_{\text{м}}, \%$	$\theta_T, \%$	$\theta_V, \%$	$S_{\Sigma_r}, \%$	$S_{\Sigma_{\text{тм}}}, \%$
рис. 4	0,01	0,006	0,02	0			0,01	0,16
рис. 5	0,04		0,08	0			0,04	0,5
рис. 6	0,37		0,5	0,58			0,37	0,9
рис. 7	0,84		0,5	1,8	11,6	14,9	11,5	0,9

На рис. 6 наведено графіки, отримані за наявності повітряних потоків, відмінних від середовища поширення за температурою на (15—20) °С. За отриманими графіками можна говорити стосовно заломлення «на стику» шарів тепле—холодне повітря через відмінності їхніх акустичних опорів. Теоретично у цих умовах також має бути присутньою похибка зсуву моменту спрацювання. Її значення не може перевищувати тривалості фронту лінії, що огинає луна-сигнал, а ця тривалість приблизно дорівнює тривалості пачки зондувальних імпульсів, яка в експериментальній установці становила 250 мкс. Але на практиці похибка зсуву моменту спрацювання звичайно не перевищує 3—4 періодів УЗ сигналу, тобто 100 мкс або  $\pm 50$  мкс.

На рис. 7 показано графіки, отримані за наявності повітряних потоків, відмінних за температурою від середовища поширення на (40—50) °С. Із графіків видно, що заломлення УЗ сигналу підсилюється унаслідок ще більшої різниці акустичних опорів шарів повітря з різною температурою.

Під час проведення експерименту були такі умови: відстань до поверхні, що відбиває, — 1,7 м, температура повітря — 20 °С, розрахункова кількість імпульсів  $N_{\text{розр}}$  — 9970. За кожною із чотирьох умов вимірювань накопичено порядку 2500 відліків. Наведено експериментальні й розрахункові значення складових похибок, серед яких:  $S_{\Sigma_E}$  — значення СКВ, отримане шляхом опрацювання експериментальних даних, є об'єднанням випадкових складових;  $S_{\text{кв}}$  — СКВ похибки квантування;  $S_{\text{п}}$  — СКВ випадкової похибки, зумовленої зсувом моменту спрацювання компаратора;  $S_{\text{м}}$  — СКВ випадкової похибки, зумовленої знесенням заломленням УЗ сигналу й зміною швидкості поширення УЗ на неоднорідностях (таблиця).

Система тестового контролю розрахована на роботу рівнеміра у складних умовах — за зміни температури й складу середовища поширення. У таблиці наведено границі невиключених систематичних похибок, зумовлених зміною температури  $\pm 30$  °С ( $\theta_T$ ) і концентрації пари бензину до 40 % ( $\theta_V$ ).

Також у таблиці:  $S_{\Sigma_r}$  — розрахункове значення результувального СКВ, що враховує випадкові й систематичні складові за умов зміни температури


й складу середовища та наявності у середовищі збурень, що мали місце у процесі проведення експерименту;  $S_{\Sigma_{\text{тм}}}$  — результувальне СКВ, отримане під час роботи рівнеміра з використанням тестових методів за зазначених умов.

Причини погіршення точнісних характеристик УЗ рівнеміра за роботи у нормальних умовах: підсилюється вплив похибок квантування та внесеної зсувом моменту спрацювання компаратора; з'являється додаткове джерело похибки — точність завдання адитивного збільшення  $B$ .

## ВИСНОВКИ

Пропонований пристрій експериментальної установки дозволяє проводити дослідження з реєстрацією вимірювальної інформації на ПК для її подальшого опрацювання. Установку розроблено для проведення досліджень із метою визначення числових значень складових похибок ультразвукового рівнеміра. Аналіз похибок необхідний для визначення ефективності розробленого тестового методу підвищення точності УЗ рівнеміра.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ключев М.С. О погрешностях акустического метода измерения жидкости и методах их снижения / М. С. Ключев, С. П. Ключев, В. В. Краснобородько // Акустический журнал. — 1999. — Т. 45. — № 6. — С. 825—831.
2. О проблемах акустического мониторинга нефтяных резервуаров / В.Д. Свет, С.В. Байков, М. Монтейро, Д. Сандиландс // Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества. Сборник работ научной школы проф. С.А. Рыбака. — 2012. — Вып. 12. — С. 121—130.
3. Гусельников В. К. Способы компенсации погрешностей ультразвуковых уровнемеров / В. К. Гусельников, Е. А. Борисенко // Украинский метрологический журнал. — 2011. — № 4. — С. 31—35.
4. Гусельников В.К. К вопросу о применении тестовых методов при измерении уровня ультразвуковым способом / В. К. Гусельников, Е. А. Борисенко // Вестник НТУ «ХПИ». — Х.: НТУ «ХПИ», 2011. — № 11. — С. 22—27. 

УДК 53.089.6:53.088

# ПРОВЕДЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ ЗВТ З ОЦІНКОЮ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

**О. Малецька**, кандидат технічних наук, начальник НДІ законодавчої метрології,  
ННЦ «Інститут метрології»,

**М. Москаленко**, старший викладач,  
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

*Аналізуються проблеми проведення калібрування засобів виміральної техніки (ЗВТ) відповідно до міжнародних вимог. Розглядаються можливі напрямки їх вирішення, наведено рекомендації щодо реалізації оцінювання похибки ЗВТ та невизначеності вимірювань під час калібрування.*

*The study analyzes the problem of calibration of measuring instruments (MI), in accordance with international requirements. The article discusses the possible directions of the problem solving; the authors provide recommendations for error estimation of MI and concerning uncertainty of measurement during calibration.*

Відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] на підприємствах та в організаціях майже з 1995 року калібрування проводиться як контроль метрологічних характеристик ЗВТ, які застосовуються поза сферою поширення державного метрологічного контролю та нагляду. При цьому калібрування, яке замінило відомчу повірку, повною мірою відповідає потребам підприємств та організацій щодо забезпечення придатності ЗВТ до застосування. Однак, за останні два роки оприлюднено декілька різних проектів нової редакції зазначеного закону, в яких калібрування визначено відповідно до Міжнародного словника з метрології (VIM) [2].

Згідно з VIM поняття «калібрування» ЗВТ (calibration) визначено як «операція, за допомогою якої за заданих умов, на першому етапі встановлюють співвідношення між значеннями величини з невизначеністю вимірювань, які забезпечують еталони, та відповідними показаннями зі зв'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому — застосовують цю інформацію для встановлення залежності спостереженого результату вимірювань від показань».

Упровадження визначення поняття «калібрування ЗВТ» у вітчизняну метрологічну практику потребує розроблення нових нормативних документів, які регламентували б правила, норми та вимоги до проведення експериментальних досліджень та їх опрацювання під час проведення цієї метрологічної роботи. Наразі відсутність таких документів викликає значну кількість питань у процесі упровадження цього поняття в метрологічну практику на підприємстві.



О. Малецька



М. Москаленко

У деяких країнах СНД та Болгарії, окрім поняття «калібрування», використовується поняття «півірка», яке передбачає контроль метрологічних характеристик ЗВТ. При цьому поняття калібрування відповідно до VIM використовується лише для випробувальних лабораторій, які оцінюють відповідність продукції та акредитовані за ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 [3]. А півірка виконується нотифікованими органами у законодавчо-регульованій сфері та метрологічними службами підприємств для власних потреб. Такий підхід відповідає меті метрологічного контролю ЗВТ, який безпосередньо пов'язаний з довірою до результатів вимірювань та випробувань, а підприємства, залежно від обґрунтованої необхідності, можуть проводити або визначення метрологічних характеристик ЗВТ (калібрування відповідно до VIM) або півірку (контроль метрологічних характеристик, встановлених під час затвердження типу).

Нові редакції закону [1] передбачали упровадження калібрування ЗВТ, під час якого визначається фактичне значення похибки на момент калібрування з оцінкою невизначеності вимірювань у всіх сферах метрологічної практики, незалежно від доцільності цього.

*Мета статті* — звернути увагу метрологів на необхідність проведення загальних заходів щодо упровадження нового поняття калібрування. Ці загальні заходи мають розроблятися на підставі двох вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2006:

- під час калібрування ЗВТ має бути встановлено значення невизначеності вимірювань;
- під час калібрування може встановлюватися відповідність ЗВТ технічним вимогам.

Перша вимога означає, що під час калібрування, аналогічно з метрологічною атестацією, має бути встановлене фактичне значення похибки на момент калібрування з оцінкою невизначеності вимірювань.

Друга вимога означає, що під час калібрування, аналогічно з півіркою, контролюється значення похибки, нормоване виробником ЗВТ. Це не викликає ніяких проблем, оскільки реалізується у цей час. Значення невизначеності при цьому може бути «взято до уваги», це по суті означає, що його можна не вказувати. Однак, цей підхід зумовлює питання з боку осіб, які перевіряють відповідність калібрування вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025.

Перша вимога передбачає розроблення основоположних методик калібрування для різних груп ЗВТ, які мають стати основою для розроблення методик калібрування на конкретні типи ЗВТ. Під час розроблення основоположних (типових) методик

мають бути встановлені методи експериментального визначення похибки, рівняння вимірювань, складові бюджету невизначеності та вимоги до оформлення результатів.

Відсутність типових методик призводить до того, що калібрувальні лабораторії розробляють власні методики. При цьому кожна лабораторія за власним розумінням встановлює метод калібрування, рівняння вимірювання та бюджет невизначеності. А це може призвести до порушення єдності вимірювань в Україні, що відіб'ється на якості продукції та її конкурентоспроможності.

Розглянемо першу частину визначення калібрування відповідно до VIM — встановлення співвідношення між значеннями величини, які забезпечують еталони, та відповідними показаннями ЗВТ, що калібрується.

Установлення такого співвідношення слід розглядати як визначення похибки ЗВТ, що калібрується. Похибка ЗВТ у міжнародній та вітчизняній метрологічній практиці розглядається як різниця між показаннями ЗВТ і дійсним значенням вимірюваної величини (яке забезпечується за допомогою еталона). Відповідно до міжнародних документів (наприклад, Директиви 22/2004/ЄС) та ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 [4]) визначення поняття «максимально допустима похибка» й «границя допустимої похибки» збігаються, оскільки вони відповідають граничному значенню похибки вимірювання, яке дозволене специфікацією або нормативними документами для конкретного ЗВТ. Розрахунок цього значення здійснюється за ДСТУ ГОСТ 8.009 на підставі проведених експериментальних досліджень. При цьому еталонні засоби для калібрування ЗВТ необхідно вибирати на підставі відповідної державної повірочної схеми. Отже, для проведення калібрування має бути:

- вибрано еталонний засіб;
- визначено кількість досліджуваних (контрольованих) точок за діапазоном вимірювання (у разі відсутності конкретних вимог замовника). За досліджувані точки звичайно вибирають такі, що рівномірно розташовані у діапазоні вимірювань, не менше 5—6, включаючи 0 і 100 % вимірюваної величини;
- досліджено контрольовані точки. Для ЗВТ звичайно досліджують точки 0, 25, 50, 75, 100 % робочого діапазону вимірювання. Кількість спостережень у досліджуваних точках для отримання достовірних даних щодо похибок має бути не меншою 10 у разі зміни вхідного сигналу зі сторони менших (більших) значень до розрахункового значення у досліджуваній



точці. Можна прийняти інше рішення щодо кількості спостережень у кожній точці, якщо це технічно обґрунтовано, наприклад, випадкова складова похибки є значно меншою порівняно зі систематичною, є відсутньою (достатньо малою) варіація показань або проведення багатократних спостережень є технічно неможливим або економічно необґрунтованим. Однак, у цьому випадку слід прийняти рішення щодо обчислення невизначеності за типом А;

- встановлено значення абсолютної похибки ЗВТ у контрольованих точках.

На сьогодні серед метрологів ведеться дискусія щодо необхідності оцінювання похибки ЗВТ та її зазначення у документах, які засвідчують результати калібрування. Однак, і вітчизняний, і міжнародний досвід підтверджує, що для ЗВТ обов'язково має бути встановлена саме похибка, значення якої можна звірити з максимально допустимою, встановленою виробником цього засобу. Це також відповідає вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 [5] щодо калібрування, яке має безпосереднє відношення до метрологічного підтвердження (metrological confirmation) — сукупності операцій, необхідних для гарантування відповідності вимірювального обладнання вимогам до його застосування за призначенням.

Для деяких ЗВТ, наприклад мір, достатньо під час калібрування встановити дійсне значення на момент калібрування, при цьому різниця між фактичним значенням та номінальним характеризуватиме похибку цієї міри. Для деяких ЗВТ під час калібрування може бути встановлена поправка, яка відповідно до VIM «визначається як компенсація для оціненого ефекту. Компенсація може мати різні форми, такі як додатковий додаток чи коефіцієнт, або може знаходитися із таблиці».

Розглянемо другу частину визначення калібрування — невизначеність вимірювання, яка є мірою якості проведеного калібрування. У міжнародній практиці під час проведення калібрування враховується її ієрархія. У VIM ієрархію калібрування визначено так: «ієрархія калібрування — послідовність калібрувань, починаючи від посилання та до вимірювальної системи, в якій результат кожного калібрування залежить від результату попереднього. *Примітка 1.* Невизначеність зростає разом з послідовністю калібрувань. *Примітка 2.* Елементами ієрархії калібрування є один або більше еталонів та вимірювальні системи, які функціонують відповідно до процедур вимірювань».

В Україні функцію основоположної ієрархії калібрування для конкретного ЗВТ виконує відповідна державна повірочна схема.

Для оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування необхідно, але не достатньо знати загальну теорію невизначеності вимірювань. Практика проведення калібрування ЗВТ показала, що під час калібрування різних груп і типів ЗВТ з'являються нові проблеми оцінювання невизначеності. При цьому всі вони пов'язані з тим, як було складено рівняння вимірювань та як була оцінена похибка ЗВТ, що калібрується. Очевидно, що практично в усіх випадках для кожної складової рівняння вимірювань необхідно буде оцінювати невизначеність за типом А або В. Метод оцінки цих складових невизначеності залежатиме від застосованого під час калібрування методу передавання розміру одиниці вимірювання. Застосовують відповідно до повірочних схем такі методи:

- 1) прямі вимірювання засобом вимірювання, яке калібрується, величини, яка відтворюється еталонною мірою;

- 2) безпосереднє звірення засобу вимірювання, яке калібрується, та еталонного засобу;

- 3) опосередковане вимірювання засобом вимірювання, яке калібрується, значень фізичних величин, які відтворюються еталонними мірами;

- 4) пряме вимірювання еталонним засобом величини, яка відтворюється мірою, що калібрується;

- 5) звірення відтворюваних значень фізичної величини еталонною мірою та мірою, що калібрується, за допомогою компаратора;

- 6) опосередковане вимірювання еталонним засобом величин, які відтворюються мірами.

Методи 1—3 застосовують під час калібрування засобів вимірювання, а методи 4—6 — під час калібрування мір. Методи 1 і 3 також можуть застосовуватися під час калібрування компараторів та обчислювальних компонентів.

Невизначеність вимірювань під час калібрування характеризує якість встановлення похибки ЗВТ:

$$\Delta = X_{\text{ЗВТ}} - X_{\text{ЕТ}}.$$

Під час калібрування мір оцінюється величина фактичного значення міри та невизначеність встановлення цього фактичного значення методом вимірювання еталонним засобом або порівнянням із еталонною мірою. Поправка у цьому випадку визначає різницю між номінальним та фактичним значеннями мір.

Оцінка невизначеності під час калібрування мір міститься в оцінці невизначеності встановлення номінального значення міри.

Під час складання рівняння вимірювань для оцінювання невизначеності необхідно урахувати впливні величини, дія яких не може бути врахована

на підставі експериментальних досліджень, але вони є суттєвими для отримання достовірних результатів калібрування. Наприклад, впливні величини, які пов'язані з нестабільністю відтворюваного значення, з відхиленням умов експлуатації (параметрів довкілля, напруги живлення тощо), похибкою квантування ЗВТ, взаємним впливом еталонного та відкаліброваного засобів. Склад у рівнянні вимірювань впливних величин має бути обґрунтовано поставленим завданням калібрування та нормованою похибкою ЗВТ.

На підставі такого підходу до оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування ЗВТ у ННЦ «Інститут метрології» розроблено методику РМУ 13-064-2008 [6], в якій наведено методи розрахунку невизначеності залежно від застосованих методів, а також методику МІ 13.002-2003 [7], в якій надано рекомендації щодо рівнянь вимірювань.

Для оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування слід також застосовувати міжнародні документи, наприклад ЕА, які регламентують проведення калібрування окремих груп ЗВТ, та настанову ISO/IEC Guide 98-3:2008 [8], визнану, як написано у VIM, промисловістю.

В Україні наразі не сформовано необхідну кількість калібрувальних лабораторій, не розроблено типових методик калібрування, що призводить до необхідності застосування калібрувальними лабораторіями альтернативних методів оцінювання невизначеності за типами А та В.

Відповідно до ISO/IEC Guide 98-3 у процесі оцінювання невизначеності можна урахувати метрологічні характеристики ЗВТ, встановлені виробником і проконтрольовані під час повірки, а саме:

- \* варіацію показань ЗВТ;
- \* нормовану похибку ЗВТ.

Співвідношення значень похибки ЗВТ та невизначеності вимірювання залежить від вибраного рівняння вимірювань. Згідно з РМГ 91-2009 [9] для повірки:

◇ розширена невизначеність вимірювань під час повірки (з коефіцієнтом охоплення 2) не має перевищувати 1/3 границі допустимої похибки;

◇ оцінена похибка ЗВТ не має перевищувати різницю границі похибки та розширеної невизначеності;

◇ оцінена похибка ЗВТ не має перевищувати квадратного кореня з різниці квадратів границі похибки та розширеної невизначеності вимірювань.


Ці співвідношення можна застосовувати і для калібрування.

## ВИСНОВКИ

Проведення калібрування ЗВТ із зазначенням невизначеності вимірювань потребує достатньої науково-технічної підготовки, яка має забезпечити:

- обґрунтоване визначення необхідності для підприємства проводити калібрування ЗВТ з оцінкою невизначеності вимірювання або продовжувати оцінювати придатність ЗВТ на підставі контролю його метрологічних характеристик;
- розроблення методик калібрування для конкретних груп ЗВТ;
- розроблення методичних документів, які обґрунтовують оцінку невизначеності вимірювання, у тому числі визначення рівняння вимірювань, бюджету невизначеності за складовими рівняння вимірювання, які мають стати основою для розроблення калібрувальними лабораторіями методик калібрування;
- розроблення національних нормативних документів з метрології на підставі гармонізації з основоположними міжнародними документами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про метрологію і метрологічну діяльність» № 113/98-ВР від 11.02.1998 зі змінами від 15.06.2004.
2. ISO/IEC Guide 99:2007. International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) (Міжнародний словник з метрології — Основні та загальні поняття та відповідні терміни (VIM)).
3. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT).
4. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
5. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи управління вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT).
6. РМУ 13-064-2008. Метрологія. Методика расчета неопределенности измерений при проведении калибровки средств измерительной техники.
7. МІ 13.002-2003. Методика обґрунтування рівнянь вимірювань та оцінки методичної складової похибки (невизначеності) результатів вимірювань.
8. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Невизначеність вимірювання. Ч. 3. Настанова з подання невизначеності вимірювання.
9. РМГ 91-2009 ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы. 

УДК 389.14:621.317:006.354

# НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ДИРЕКТИВ НА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ: ПОТОЧНИЙ СТАН ТА ПОДАЛЬШИЙ РОЗВИТОК

**О. Величко**, доктор технічних наук, директор НВІ,

ДП «Укрметрестандарт»,

**Т. Гордієнко**, кандидат технічних наук, заступник директора НДІ з наукової роботи — начальник відділу,

ДП «УкрНДНЦ проблем стандартизації, сертифікації та якості», м. Київ

*Розглянуто питання нормативного забезпечення європейських директив (ЄД) щодо засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Проаналізовано зміни й доповнення до них, а також до переліків відповідних міжнародних та європейських стандартів, документів і рекомендацій Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML).*

*Запропоновано зазначені зміни врахувати під час подальшої адаптації національних технічних регламентів (ТР) на ЗВТ з відповідними ЄД та гармонізації національних стандартів, які є доказовою базою ТР щодо ЗВТ.*

*The article discussed issues of regulatory provision of European Directive (ED) for measuring instrument (MI).*

*This paper analyzes the changes and additions to the directives and to lists of appropriate international and European standards, documents and recommendations of the International Organization of Legal Metrology (OIML).*

*The paper proposed to take into account these changes in the further adaptation of national technical regulations (TR) on the MI with the appropriate ED and during harmonization of national standards, which are the evidence base of TR concerning MI.*



О. Величко

**П**ринципи технічної гармонізації в Європі у сфері метрології регламентуються рішеннями Європейського Парламенту і Ради, але їхні директиви закладають лише основні вимоги, а детальні технічні вимоги базуються на міжнародних та європейських стандартах і рекомендаціях OIML [1—5]. У 2004—2009 роках прийнято Директиву 2004/22/ЄС (MID) [6], яка встановлює вимоги до ЗВТ, що застосовуються у сфері законодавчої метрології, і Директиву 2009/23/ЄС (NAWI) [7], яка містить вимоги до зважувальних неавтоматичних пристроїв, а в Україні розроблено ТР, гармонізовані із зазначеними директивами Європейського Союзу (ЄС) [8, 9].



Т. Гордієнко



Цими директивами регламентуються застосування технічних вимог гармонізованих стандартів і модульний підхід до оцінювання відповідності. У директивах і MID, і NAWI встановлено категорії ЗВТ, на які поширюються їхні вимоги. Для упровадження [7] опубліковано Повідомлення для членів ЄС [10], що регламентує європейські стандарти для цієї директиви. Аналогічне Повідомлення [11] опубліковано і для впровадження [6], яким регламентується перелік європейських стандартів і рекомендацій OIML для усіх десяти категорій ЗВТ цієї директиви. З урахуванням зазначеного на національному рівні доцільно впровадити стандарти, регламентовані цими директивами і рекомендаціями. Окрім названих директив, у ЄС діють ще Директива 2011/17/EU, що встановлює вимоги до цілої низки категорій ЗВТ, які не увійшли до [6]; Директива 2009/34/ЄС, в якій встановлено загальні положення щодо ЗВТ і методів їх метрологічного контролю. Планується, що категорії ЗВТ за першою з 01.01.2015 увійдуть до [6].

Метою статті є проведення аналізу нормативного забезпечення ЄД на ЗВТ, а також змін і доповнень до них. Отримані результати необхідно врахувати під час планування подальшої адаптації національних ТР щодо ЗВТ з відповідними ЄД та гармонізації національних стандартів, які є доказовою базою цих ТР.

### 1. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ЗВТ ЗА ДИРЕКТИВОЮ MID

Законодавчий метрологічний контроль на національному рівні не має створювати бар'єри для вільного переміщення ЗВТ між країнами. Це вимагає відповідності ЗВТ встановленим вимогам до характеристик. Окрім того, ЗВТ мають забезпечувати високий рівень захисту, а оцінення їх відповідності — високий рівень довіри. Положення [6] поширюються на оцінювання відповідності складових частин ЗВТ і, якщо вони реалізуються окремо і незалежно від нього, виконання оцінювання їх відповідності має здійснюватися незалежно від самого ЗВТ.

Для полегшення завдання підтвердження відповідності суттєвим вимогам і можливості провести оцінювання відповідності необхідно мати гармонізовані національні стандарти та нормативні документи (НД). У [6] під гармонізованим стандартом розуміють технічні вимоги, прийняті Європейським комітетом зі стандартизації (CEN), Європейською електротехнічною комісією (CENELEC) або спільно двома цими організаціями на прохання Європейської Комісії, а під НД — документ, що містить технічні вимоги, прийняті як рекомендації OIML.

Технічні й експлуатаційні вимоги НД, погоджені на міжнародному рівні, можуть частково або повністю відповідати основним вимогам [6]. У таких випадках застосування зазначених НД може бути альтернативою використанню гармонізованих стандартів і, за певних умов, бути підставою для прийняття висновку стосовно відповідності ЗВТ встановленим вимогам. Відповідність вимогам, що містяться у [6], може бути забезпечена технічними вимогами, які не містяться в європейських технічних стандартах або міжнародних НД, тому їх застосування має бути необов'язковим.

Ст. 13 «Гармонізовані стандарти і нормативні документи» [6] встановлено, що відповідність суттєвим вимогам, зазначеним у Додатку I і відповідних додатках до конкретних категорій ЗВТ, встановлюють із застосуванням елементів у національних стандартах, що реалізують відповідні європейські гармонізовані стандарти для певних ЗВТ. При цьому національні стандарти мають відповідати вимогам тих елементів, які визначено гармонізованими європейськими стандартами, посилення на які опубліковано в «Офіційному журналі Європейського Союзу» (серія C). Якщо ЗВТ лише частково відповідає елементам указаних національних стандартів, має передбачатися відповідність суттєвим вимогам, що належать до елементів національних стандартів, яким ЗВТ відповідає. Посилання на указані національні стандарти мають публікуватися у відповідних офіційних національних виданнях.

Виробник ЗВТ може вибрати будь-яке технічне рішення, що відповідає суттєвим вимогам Додатка I і додатків щодо конкретних категорій ЗВТ (MI-001–MI-010); має правильно застосовувати рішення або в європейських гармонізованих стандартах, або в частинах НД зі списків, опублікованих в офіційних виданнях ЄС. При цьому передбачається узгодженість з відповідними програмами випробувань ЗВТ, які мають розроблятися на основі зазначених вище стандартів або НД, за умови, що результати випробувань забезпечують відповідність суттєвим вимогам [6].

### 2. СТАНДАРТИ ТА НД ДЛЯ НАЯВНИХ КАТЕГОРІЙ ЗВТ

Для оцінювання відповідності ЗВТ вимогам [6, 7] мають застосовуватися європейські стандарти і рекомендації OIML (табл. 1). Усього для одинадцяти категорій ЗВТ, які регламентують [6, 7], застосовано 18 європейських стандартів (їх частин), 22 рекомендації OIML (їх частини). У графі «Примітки» (табл. 1) наведено інформацію щодо рівня відповідності стандартів і рекомендацій вимогам директив MID і NAWI [12–14].



Таблиця 1

Категорія ЗВТ (NAWI або додаток до MID)	Позначення стандарту або НД	Примітка
1	2	3
Лічильники води (MI-001)	OIML R49-1 OIML R49-2 EN 14154-1 EN 14154-2 EN 14154-3	Не всі класи і характеристики OIML внесено до MI-001
Лічильники газу й пристрої перетворення об'єму (MI-002)	EN 1359 EN 12261 EN 12405-1 EN 12480 EN 14236	
Лічильники активної електроенергії (MI-003)	EN 50470-1 EN 50470-2 EN 50470-3 EN 62058-21 EN 62058-31	
Лічильники тепла (MI-004)	OIML R75-1 OIML R75-2 EN 1434-1 EN 1434-2 EN 1434-4 EN 1434-5	Деякі пункти MI-004 не охоплено рекомендаціями OIML
Вимірювальні системи для безперервного і динамічного вимірювання кількості будь-яких рідин, окрім води (MI-005)	OIML R117 OIML R120 OIML D11	Не всі класи і характеристики OIML внесено до MI-005
Неавтоматичні засоби зважування (NAWI)	EN 45501 OIML R76-1 OIML R76-2	
Автоматичні засоби зважування (автоматичні порційні ваги; автоматичні вагові гравіметричні пристрої; підсумувальні ваги дискретної й безперервної дії; автоматичні ваги для залізничних платформ) для механічних систем, електромеханічні інструменти й електронні системи або системи, що містять програмне забезпечення (MI-006)	OIML R47 OIML R50-1 OIML R51-1 OIML R52 OIML R61-1 OIML R106-1 OIML R107-1 OIML R134-1	Деякі пункти MI-006 не охоплено рекомендаціями OIML, не всі класи і характеристики OIML внесено до MI-006
Таксометри (MI-007)	OIML R21	—
Матеріальні міри (міри довжини, сервісні міри вмісту) (MI-008)	—	Деякі пункти MI-008 не охоплено рекомендаціями OIML
Координатні (лінійні) засоби вимірювань (засоби вимірювання довжини, площі, багатокоординатні) для приладів механічних або електромеханічних, і електронних або з програмним забезпеченням (MI-009)	OIML R66 OIML R129 OIML R136-1	Більшість пунктів MI-009 не охоплено рекомендаціями OIML, не всі класи і характеристики OIML внесено до MI-009
Аналізатори вихлопних газів (MI-010)	OIML R99	Не всі класи і характеристики OIML внесено до MI-010

### 3. УЗАГАЛЬНЕНІ ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ЗМІН І ДОПОВНЕНЬ ДИРЕКТИВИ MID

У 2008 році Європейська асоціація національних метрологічних органів (WELMEC) створила спеціальні робочі групи (MI-WG) за категоріями [6] з метою відпрацювання пропозицій стосовно відповід-

них змін і доповнень. Результати роботи зазначених робочих груп розглянуто у 2010—2011 роках та відповідно розроблено узагальнені рекомендації [15] щодо змін і доповнень до Директиви 2004/22/ЕС.

У результаті проведеного аналізу визначено категорії ЗВТ, якими рекомендовано доповнити [6].

Наявні та рекомендовані додаткові категорії ЗВТ у [6] наведено у табл. 2. Пропонується змінити ви-  
моги і розширити вісім із десяти наявних катего-

рій, доповнити її ще дванадцятьма. Останнє сто-  
сується категорій ЗВТ, які регламентує Директива  
2011/17/EU.

Таблиця 2

Додаток до MID*	Наявна категорія ЗВТ	Додаткові або уточнені категорії ЗВТ
MI-001	Лічильники води	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Іригаційні лічильники води;</li> <li>• Лічильники води-витратоміри;</li> <li>• Лічильники води великошкальні</li> </ul>
MI-002	Лічильники газу, пристрої перетворення об'єму й вимірювачі енергії	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Вимірювачі енергії газу</li> </ul>
MI-003	Лічильники активної електроенергії	Електричне вимірювальне устаткування: <ul style="list-style-type: none"> <li>• вимірювальні трансформатори струму і напруги;</li> <li>• лічильники реактивної електроенергії;</li> <li>• високоточні електричні вимірювачі</li> </ul> або <ul style="list-style-type: none"> <li>• лічильники активної електричної енергії та реєструвальні прилади;</li> <li>• реєструвальні прилади</li> </ul>
MI-004	Лічильники тепла	Вимірювачі теплової енергії та реєструвальні прилади: <ul style="list-style-type: none"> <li>• вимірювачі теплової енергії (змін);</li> <li>• реєструвальні прилади</li> </ul>
MI-005	Вимірювальні системи для безперервного та динамічного вимірювання кількості будь-яких рідин, окрім води	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Паливо-заправні колонки з підсумовувальним пристроєм</li> </ul>
MI-006	Автоматичні засоби зважування: <ul style="list-style-type: none"> <li>• для механічних систем;</li> <li>• для електромеханічних систем;</li> <li>• для електронних систем або систем, що містять програмне забезпечення</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Категорія x-координатних інструментів;</li> <li>• Високоточні ваговимірювальні пристрої;</li> <li>• Динамічні установки</li> </ul>
MI-009	Координатні (лінійні) засоби вимірювання для приладів механічних або електромеханічних, електронних або з програмним забезпеченням	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Нові засоби вимірювання довжини</li> </ul>
MI-010	Аналізатори вихлопних газів (розширення сфери застосування)	—
MI-xx1	—	Устаткування для вимірювання швидкості транспортних засобів
MI-xx2	—	Аналізатори спирту при видиханні
MI-xx3	—	Електричні зарядні облаштування транспортних засобів
MI-xx4	—	Вимірювальні енергетичні системи для використання на залізничних транспортних засобах
MI-xx5	—	Автоматичне зважування дорожніх транспортних засобів
MI-xx6	—	Вимірювальні системи для стислого натурального газу (CNG)
MI-xx7	—	Рівнеміри для автоцистерн і стаціонарні резервуари-сховища
MI-xx8	—	Спиртометри, ареометри і термометри для спиртометрії
MI-xx9	—	Гирі
MI-x10	—	Манометри для автомобільних покришок
MI-x11	—	ЄС еталони маси для зберігання об'єму зерна
MI-x12	—	Наливні танкери

\* позначення MI-xxx означає новий додаток до MID

#### 4. СТАНДАРТИ ТА НД ДЛЯ ДОДАТКОВИХ КАТЕГОРІЙ ЗВТ

Для оцінення відповідності ЗВТ вимогам зміненої та доповненої Директиви [6] мають застосовуватися європейські стандарти і рекомендації OIML (табл. 3). Усього для 12-ти нових категорій ЗВТ і 8-ми змінених використовуються 7 європейських стандартів (їх частини), а також 51 рекомендація і документи OIML (їх частини). Деякі з європейських стандартів, рекомендацій та документів OIML вже засто-

совувалися для наявних категорій ЗВТ Директиви MID — відповідно 18 і 22, але все-таки ще 4 європейські стандарти (їх частини), а також 28 рекомендацій і документів OIML (їх частини) необхідні для додаткових категорій ЗВТ цієї Директиви.

У процесі прийняття змінених і доповнених категорій ЗВТ Директиви MID необхідна також регламентація вживаних для них комбінацій модулів оцінювання відповідності для оцінення відповідності ЗВТ вимогам [6] за вибором виробника ЗВТ.

Таблиця 3

Додаток до MID*	Додаткові категорії ЗВТ	Позначення стандарту або НД
1	2	3
MI-001	Іригаційні лічильники води	OIML R49-1—3
	Лічильники води-витратоміри	OIML D25
	Лічильники води великошкальні	OIML R49-1—3
MI-002	Лічильники газу й облаштування для перетворення об'єму	OIML R137-1, 2
MI-003	Вимірювальні трансформатори	EN 61869-1 EN 61869-2 EN 61869-3
	Лічильники реактивної електроенергії	IEC/EN 62052-11/62053-23
	Високоточні електричні вимірювачі	EN 62059-32-1
MI-004	Лічильники теплової енергії	EN 1434-1—5 OIML R75-1—3
MI-005	Паливо-заправні колонки з підсумовувальним пристроєм	OIML R63 OIML R105 OIML R105-C OIML R117-1 OIML R119 OIML R120 OIML D25
MI-006	Категорія X-координатних інструментів, високоточні ваговимірювальні пристрої, динамічні установки	OIML R51-1 OIML R81 OIML R81-D
MI-009	Нові засоби вимірювання довжини	OIML R66
MI-010	Аналізатори вихлопних газів (розширення сфери застосування)	OIML R99
MI-xx1	Устаткування для вимірювання швидкості транспортних засобів	OIML R46-1, 2 OIML R55 OIML R91
MI-xx2	Аналізатори спирту при видиханні	EN 15964 OIML R22 OIML R44 OIML R126
MI-xx3	Електричні зарядні облаштування транспортних засобів	...
MI-xx4	Вимірювальні енергетичні системи для використання на залізничних транспортних засобах	...
MI-xx5	Автоматичне зважування дорожніх транспортних засобів	OIML R47 OIML R50-1 OIML R51-1 OIML R52 OIML R107 OIML R134-1, 2

Закінчення таблиці 3

1	2	3
MI-xx6	Вимірювальні системи для стислого природного газу (CNG)	OIML R139 OIML R140
MI-xx7	Рівнеміри для автоцистерн і стаціонарні резервуари-сховища	OIML R71 OIML R80-1 OIML R85-1—3 OIML R95
MI-xx8	Спиртометри, ареометри і термометри для спиртометрії	OIML R22 OIML R44 OIML R126
MI-xx9	Гирі	OIML R111-1, 2
MI-x10	Манометри для автопокришок	OIML R23
MI-x11	ЄС еталони маси для зберігання об'єму зерна	OIML R15
MI-x12	Наливні танкери	OIML R85-1—3 OIML R125

\* MI-xxx означає новий додаток до MID

#### 5. ТК, ЯКІ РОЗРОБЛЯЮТЬ СТАНДАРТИ ТА НД ДЛЯ КАТЕГОРІЙ ЗВТ

Розроблянням європейських стандартів для різних категорій ЗВТ займаються технічні комітети стандартизації (ТК) та підкомітети (ПК) CEN/CENELEC, а документів (D) та рекомендацій (R) OIML — дев'ять ТК (ПК) OIML. Позначення і назви ТК CEN/CENELEC і OIML, які розробляють стандарти для різних категорій ЗВТ згідно з Директивами MID і NAWI, наведено у табл. 4.

Сучасні питання ТК CEN/CENELEC, зокрема, стосуються підготовки європейських стандартів

та ліквідації відставання їх прийняття від прийняття Директив ЄС. Питання прискорення термінів опублікування стандартів наразі є достатньо актуальним для CEN/CENELEC, оскільки кількість опублікованих стандартів із року в рік відстає від кількості їхніх проектів.

Велика кількість документів і рекомендацій OIML, розроблених ТК OIML, призначена забезпечити специфічними НД Директиви MID і NAWI, що підтверджує провідну роль OIML для європейського співтовариства.

Таблиця 4

Директива NAWI або додаток до MID	ТК, який розробляє стандарти під певну категорію ЗВТ	
	CEN/CENELEC	МОЗМ
1	2	3
MI-001	CEN/TK 92 «Лічильники води»	OIML/TK 8 «Вимірювання кількості рідини» OIML/TK 8 ПК 5 «Лічильники води»
MI-002	CEN/TK 237 «Лічильники газу»	OIML/TK 8 ПК 7 «Вимірювання газу»
MI-003	CLC/TK 13 «Устаткування для електричного вимірювання енергії та контролю завантаження» CLC/TK 38 «Вимірювальні трансформатори»	—
MI-004	CEN/TK 176 «Лічильники тепла»	OIML/TK 11 «Прилади для вимірювання температури та пов'язаних одиниць»
MI-005	—	OIML/TK 5 ПК 1 «Навколишнє середовище» OIML/TK 8 «Вимірювання кількості рідини» OIML/TK 8 ПК 3 «Динамічне вимірювання об'єму та кількості будь-яких рідин, окрім води»
NAWI	CEN/SS F05 «Вимірювальні прилади»	OIML/TK 9 ПК 2 «Неавтоматичні прилади зважування»



Закінчення таблиці 4

1	2	3
MI-006	—	OIML/TK 8 ПК 6 «Вимірювання криогенних рідин» OIML/TK 9 ПК 2 «Автоматичні прилади зважування»
MI-007	—	OIML/TK 7 ПК 4 «Вимірювальні прилади для дорожнього руху»
MI-009	—	OIML/TK 7 ПК 1 «Прилади для вимірювання довжини» OIML/TK 7 ПК 3 «Вимірювання площі» OIML/TK 7 ПК 5 «Координатні (лінійні) засоби вимірювань»
MI-010	—	OIML/TK 16 ПК 1 «Забруднення повітря»
MI-xx1	—	OIML/TK 7 «Прилади для вимірювання довжини і пов'язаних одиниць» OIML/TK 7 ПК 4 «Вимірювальні прилади для дорожнього руху» OIML/TK 12 «Прилади для вимірювання кількості електроенергії»
MI-xx2	CEN/TR 367 «Дихальні спиртові аналізатори»	OIML/TK 9 ПК 4 «Вимірювання густини» OIML/TK 17 ПК 7 «Випробувачі дихання»
MI-xx5	—	OIML/TK 9 ПК 2 «Автоматичні прилади зважування» OIML/TK 9 ПК 3 «Ваги»
MI-xx6	—	OIML/TK 8 ПК 7 «Вимірювання газу»
MI-xx7	—	OIML/TK 8 ПК 1 «Статичний об'єм і вимірювання маси»
MI-xx8	—	OIML/TK 9 ПК 4 «Вимірювання густини» OIML/TK 17 ПК 7 «Випробувачі дихання»
MI-xx9	—	OIML/TK 9 ПК 3 «Ваги»
MI-x10	—	OIML/TK 10 «Прилади для вимірювання тиску, сили та пов'язаних одиниць»
MI-x11	—	OIML/TK 9 ПК 4 «Вимірювання щільності»
MI-x12	—	OIML/TK 8 ПК 1 «Статичний об'єм і вимірювання маси»

### ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Після прийняття зміненої й доповненої Директиви [6] необхідно на національному рівні внести відповідні зміни у впроваджений ТР на категорії ЗВТ, які застосовуються у сфері законодавчої метрології. З метою ефективнішого упровадження можливих змін до вказаного національного ТР вже зараз необхідно визнати пріоритетним упровадження та внесення змін у національні стандарти, гармонізовані з європейськими стандартами, рекомендаціями та документами OIML, які застосовуватимуться


для додаткових категорій ЗВТ Директиви MID.

2. Основою для оцінення відповідності ЗВТ, згідно з пропонованими змінами і доповненнями [6], має бути використання національних стандартів, гармонізованих з офіційно регламентованими європейськими стандартами, рекомендаціями і документами OIML, які є доказовою базою для національних ТР на ЗВТ.

3. ТК CEN/CENELEC і ТК OIML відіграють значну роль у нормативному забезпеченні Директив [6, 7] стосовно регламентування вимог до ЗВТ.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Velychko O. Harmonization of the legislative acts and normative documents on metrology in Ukraine / O. Velychko // OIML Bulletin. — Vol. XLI. — № 2. — April, 2000. — P. 19—24.
2. Velychko O., Gordiyenko T. Implementation of the European Directive on Measurement Instruments in Ukraine // OIML Bulletin. — 2010. — Vol. LI. — № 2. — April. — P. 23—29.
3. Величко О. Гармонізація нормативно-правових актів з питань метрології / О. Величко // Стандартизація, сертифікація, якість. — 2005. — № 3. — С. 36—40.
4. Величко О. Н., Гордиенко Т. Б., Коломиец Л. В.

- Нормативное обеспечение технических регламентов на средства измерений // Стандарты и качество. — 2011. — № 12. — С. 18—21.
5. Величко О. Н., Коломиец Л. В., Гордиенко Т. Б. Нормативное обеспечение технических регламентов на средства измерений, гармонизированных с европейскими директивами // Электротехнические и компьютерные системы. — 2012. — № 06 (82). — С. 178 — 187.
  6. Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 on measuring instruments / Official Journal of the European Union. — L 135/1. 30.04.2004.
  7. Directive 2009/23/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on non-automatic weighing instruments (codified version) / Official Journal of the European Union. — L 122, 16.05.2009.
  8. Технічний регламент щодо неавтоматичних зважувальних приладів, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 11.03.2009 № 190.
  9. Технічний регламент щодо суттєвих вимог до засобів вимірювань, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 08.04.2009 № 332.
  10. Commission Communication 1994 / C 153 in the framework of the implementation of Council Directive 90/384/EEC of 20 June 1990 on the harmonization of the laws of the Member States relating to non-automatic weighing instruments / Official Journal of the European Union. — C 153 of 4.6.1994.
  11. Commission Communication 2012 / C 218 in the framework of the implementation of the Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council on measuring instruments / Official Journal of the European Union. — C 218 of 24.07.2012.
  12. Європейські стандарти, розроблені ТК CEN. Режим доступу: <http://www.cen.eu>.
  13. Європейські стандарти, розроблені ТК CENELEC. Режим доступу: <http://www.cenelec.eu>.
  14. Документи та рекомендації OIML. Режим доступу: <http://www.oiml.org/publications>.
  15. Impact Assessment Study on the Review of the Measuring Instruments Directive 2004/22/EC. — Report on Suggestions for Amendments and Additions to the MI Directive 2004/22/EC. — Final Report prepared for European Commission DG Enterprise and Industry. — RPA, March 2011. — 150 p. 

Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка»,  
ДП «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем»,  
Лодзький технічний університет (Польща), Академія метрології України,  
Рада підприємців у Львівській області

**Міжнародна науково-технічна конференція «СИСТЕМИ — 2013»  
«ТЕРМОГРАФІЯ І ТЕРМОМЕТРІЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ»**

23—27 вересня 2013 року, м. Львів

Конференція **TTM3—2013** проводиться спільно із Всепольською науково-технічною конференцією **«Termometria i Termografia Podczterwieni» TTP-2013** за підтримки *ООО «Харківприлад», Науково-виробничого об'єднання «Термоприлад», Управління магістральних газопроводів «Львівтрансгаз».*

**ПРОБЛЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ:**

1. *Науково-технічні аспекти термографії та термометрії:* термографічні системи; засоби та методи вимірювання температури; приймачі випромінювання та контактні первинні перетворювачі термометрії; моделювання та вимірювання параметрів теплового поля і теплових процесів; неруйнівні дослідження з використанням засобів термометрії; застосування тепловізорів у науці, промисловості та медицині; опрацювання оптичної інформації.

2. *Метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань:* розвиток методів та засобів вимірювання фізичних величин; теорія та практика вимірювань та випробувань; невизначеність у вимірюваннях; сертифікацій-

ні випробування; нормативне забезпечення вимірювань та випробувань; організація метрологічної діяльності.

3. *Комп'ютерні та інформаційні технології в метрології:* кібер-фізичні системи в метрології; комп'ютерні вимірювальні системи; обчислювальні компоненти вимірювальних систем (числові вимірювальні перетворювачі); атестація програмного забезпечення вимірювальних систем.

4. Системи управління якістю та екологічного управління. Оцінка відповідності.

У рамках конференції планується презентація промислового метрологічного обладнання, яка може бути проведена у формі стендової презентації або виставки.

Детальна інформація на сайтах:  
<http://conference.lp.edu.ua/metrolog-2013>  
<http://www.dndi-systema.lviv.ua>  
<http://thermo.p.lodz.pl/ttp>

*Запитання та пропозиції:*  
секретаріат (Гоц Наталія Євгенівна):  
E-mail: [natalia.gots@lp.edu.ua](mailto:natalia.gots@lp.edu.ua), [ttp@info.p.lodz.pl](mailto:ttp@info.p.lodz.pl)  
Тел.: (038)-(032)-258-23-94  
Моб.тел.: (038)-(067)-927-08-53

УДК 621:874:539.421

# ЩОДО ДЕЯКИХ ПРОБЛЕМ МОНІТОРИНГУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ПІДЙОМНИХ СПОРУД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАГНІТНОЇ СТРУКТУРОСКОПІЇ

**В. Попов**, академік ПТАН України, м. Харків,

**В. Гудошник**, Генеральний директор,

ТОВ СП «Товариство технічного нагляду ДІЕКС», м. Дніпропетровськ,

**Н. Хорло**, директор Атестаційного центру з неруйнівного контролю,

ПАТ «ВТП «Укренергочормет», м. Харків

*Обговорюється практика діагностики металоконструкцій підйомних споруд на основі магнітної структуроскопії. Представлено досвід застосування такого методу під час проведення експертизи промислової безпеки.*

*This article discusses practices of a diagnostic of metal framework of lifting equipment based on magnetic structurescopy. The study presents the experience of applying this method in the examination of industrial safety.*

**К**онтроль напружено-деформованого стану (НДС) сталевих металоконструкцій є одним із визначальних факторів в оціненні надійності підйомної споруди у процесі експлуатації.

Із упровадженням у виробництво зварних металоконструкцій необхідність оцінення НДС ставала актуальнішою на всіх стадіях життєвого циклу виробу, оскільки темпи старіння устаткування значно випереджають темпи технічного переозброєння.

Існуюча система постановки на виробництво нових видів кранової техніки, що передбачала проведення цілого комплексу досліджень, випробувань головних зразків, тензометрирування для оцінення напруг в окремих елементах і вузлах, «канула в Лету».

У 2004 році на семінарі «Сучасні технології й прилади неруйнівного контролю й технічної діагностики» у м. Харкові всебічно обговорювалося питання стосовно практичного застосування магнітної структуроскопії під час створення нової техніки й експлуатації вантажопідйомних кранів. Констатувалося, що виробник кранової техніки, де-

кларуючи надійність і якість своєї продукції, фактично не проводить контролю залишкових напруг після складально-зварювальних робіт.

За останні двадцять років через фізичне старіння понад 85 % кранового парку вийшло за межі нормативного терміну експлуатації, що створює загрозу промисловій безпеці. Разом з тим з'явилися нові виробництва, які стали споживачами на «вторинному ринку» дешевої кранової техніки.

Як відзначалося на Московському міжнародному семінарі «Контроль напружено-деформованого стану промислового устаткування й металоконструкцій під час визначення залишкового ресурсу» в 2010 році, сьогодні цією проблемою займаються всі провідні діагностичні центри світу.

Як один з напрямів вирішення цієї проблеми на основі багаторічних досліджень отримала поширення практика діагностики металоконструкцій підйомних споруд у разі експертизи промислової безпеки на основі вимірювання магнітної характеристики металу — коерцитивної сили ( $H_C$ ) [1, 2].

В основу цього методу неруйнівного контролю (МТКС) покладено кореляційні залежності між механічними властивостями металу й одним із основних фізичних параметрів петлі магнітного гістерезису — коерцитивною силою,  $H_C$  (А/см), як найбільш чутливої до зміни щільності дислокацій структури сталі [3].

Приріст величини коерцитивної сили у випадку появи напруг у металі відносно вихідного стану поставки  $H_C^0$  й до стану руйнування  $H_C^B$  становить 100—400 % залежно від марки металу. Такої інформаційної чутливості до процесів деградації металу поки не виявлено ні в якого іншого параметра неруйнівного контролю. Більше того, якщо метал у разі навантаження зазнав у будь-якому локальному об'ємі хоча б однократного впливу навантаження, що перевищує значення границі плинності  $G_{0,2}$ , за наступного вимірювання, значення  $H_C$  у цьому місці вже ніколи не повернеться до вихідного значення  $H_C^0$  [6], оскільки в цій області метал переходить із області пружних (оборотних) деформацій у пружно-пластичну область діаграми навантаження [4]. По суті значення  $H_C^0$ ,  $H_C^T$  і  $H_C^B$  є такими ж характерними значеннями для кожної марки металу, як і механічні характеристики  $G_{0,2}$  і  $G_B$ , а відношення приросту значень  $\Delta H_C$  до розглянутого інтервалу часу ( $\Delta T$ ) визначає швидкість нагромадження ушкоджень у структурі металу від напруг, що виникають, яку можна описати лінійною залежністю типу  $\Delta H / \Delta T = C \cdot \Delta G^n$ , де  $G$  — внутрішні напруження, а  $C$  й  $n$  — властивості сталі [1].

На відміну від локальних і трудомістких методів, таких як тензометрирування або методів фотопружності, у тому числі методу оптично чутливих покриттів, магнітна діагностика за коерцитивною силою реагує на структурну перебудову й на весь комплекс залишкових напруг.

Напруги у металі можна представити як векторну суму всіх внутрішніх і зовнішніх сил, що діють на метал у зоні контролю:

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_{\text{монт}} + \sigma_{\text{роб}},$$

де перші три напруги — це результат вихідного структурного стану металопрокату, технології виготовлення конструкції з урахуванням зварювальних напруг, а також складання готового виробу. Останні два доданки — робочі напруги, що виникають після монтажу вантажопідйомної машини, на які накладаються напруги від фізичних циклів у процесі її експлуатації. У більшості розроблень з контролю НДС розглядаються лише робочі цикли й відповідні їм  $\sigma_{\text{роб}}$ , що не відповідає реальному двочастотному циклу навантаження конструкції [5].

Використовуючи магнітну теорію напруг, можна здійснювати спочатку аналіз вихідного стану металу за величиною  $H_C^0$ , а потім його зміну за навантаження у процесі експлуатації металоконструкції, тобто отримувати інформацію стосовно поведінки доменної структури, накопичення розсіяних пошкоджень, мікропластичної деформації, збільшення внутрішніх (залишкових) напруг у металі протягом усього його «життя» аж до руйнування.

У результаті досліджень [6], для традиційних маловуглецевих і низьколегованих сталей (за товщини прокату 5—15 мм) узагальнено базові (усереднені) параметри контролю стану металу за величиною коерцитивної сили:  $H_C^0$  — вихідне значення коерцитивної сили;  $H_C^T$  — відповідає рівню напруг, рівних фізичній границі плинності сталі  $G_T (= G_{0,2})$ ;  $H_C^B$  — відповідає границі витривалості за малоциклової втоми (МЦУ) у випадку пульсуючого циклу навантаження.

Процес накопичення пошкоджень і наростання напруг у металоконструкції можна представити у виді схеми:

$$H_C^{\text{факт.}} = H_C^0 + \Delta H_C^{\text{св}} + \Delta H_C^{\text{монт.}} + \Delta H_C^{\text{с}} + \Delta H_C^{\text{р}} + \Delta H_C^{\text{кн}},$$

де  $H_C^{\text{факт.}}$  — значення  $H_C$ , отримані у процесі вимірювань (А/см);  $H_C^0$  — характеризує первісне значення коерцитивної сили у металопрокаті (у стані поставки);  $\Delta H_C^{\text{св}}$  — приріст значень  $H_C$  від напруг у процесі виготовлення конструкції;  $\Delta H_C^{\text{монт.}}$  — приріст значень  $H_C$  від напруг під час виконання монтажних робіт на об'єкті експлуатації крана;  $\Delta H_C^{\text{с}}$  — приріст значень  $H_C$  залежно від часу й умов експлуатації;  $\Delta H_C^{\text{р}}$  — приріст значень  $H_C$  від появи напруг під час проведення ремонтних робіт із застосуванням зварювання;  $\Delta H_C^{\text{кн}}$  — відображає залежність змін значень  $H_C$  (за показаннями приладу) від впливу концентраторів напруг в окремих зонах металоконструкції.

Нормативною базою магнітного (коерцитиметричного) контролю (МТКС) є: міжнародний стандарт ISO 4301 [4], міждержавний стандарт ГОСТ 30415-96 (зі змінами 1) [7], методичні вказівки РД ИКЦ «Кран» 007/97/02 (Росія) [8], МВ 0.00-7.01-05 (Україна) [9].

Найбільшого поширення для практичної роботи отримали переносні магнітні структуроскопи типу КРМ-Ц-Д02М, достатньо прості й зручні в обігу.

Первісні значення коерцитивної сили  $H_C^0$ , втім, як і механічні властивості, залежать від багатьох факторів: хімічного складу сталі, величини зерна, наявності структурної неоднорідності, стану поставки металопрокату (гарячекатаний або холоднокатаний прокат, у відпаленому або нормалізованому стані).



Тому в методичних вказівках [8, 9] допускається розкид значень  $H_C^0$ , наприклад, для маловуглецевих сталей У Ст3 — (2,3—3,2) А/см, для сталі 09Г2С — (2,5—4,5) А/см.

Протягом 10 років під час проведення науково-дослідних робіт з оцінювання НДС металокопункцій у процесі виготовлення кранів на Харківському заводі підйомно-транспортного устаткування (ХЗПТУ) весь металопродукт, що надходив на завод, за вхідного контролю піддавався не лише хімічному й механічному контролю, але й металографічним дослідженням і вимірюванням коерцитивної сили ( $H_C^0$ ).

Після виготовлення кранових металокопункцій складалася карта магнітного контролю (КМК) на основі вимірювань значень  $H_C$  відповідно до схеми контролю. Тим самим визначалися залишкові зварювальні напруги.

У такий спосіб також оцінювалася технологічність конструкції з одночасним контролем дотримання технології виробництва зварювальних робіт [2].

На підставі отриманого досвіду, російськими колегами ще у 2002 році висловлена думка: під час виготовлення кранових металокопункцій необхідно вимірювати первісні значення коерцитивної сили, щоб у подальшому стежити за зміною значень  $H_C$  для своєчасного запобігання аварійним ситуаціям. Цю ідею надалі трансформовано у паспорт магнітного контролю (ПМК) [10], форму якого затверджено Держгортехнаглядом Росії, і протягом декількох років ХЗПТУ у разі поставок у Росію комплектував супровідну документацію ПМК на крани спеціальні достатньо важкого й важкого режимів роботи.

ПМК є підтвердженням гарантій заводу-виробника якості металокопункцій у тому розумінні, що первісний стан зварної конструкції відповідає вимогам надійної експлуатації (за ISO 4301) з точки зору зварювальних напруг.

У перші роки упровадження магнітної структуроскопії «головним боєм» фахівців з неруйнівного контролю було оцінювання НДС металокопункцій з товщиною елемента понад 20 мм, що особливо важливо для кранів гірничо-металургійного комплексу, що працюють у важкому й достатньо важкому режимах роботи. За наявності ознак деградації металу в окремих зонах (особливо біля зварних швів) показання приладів явно були занижені.

У процесі розроблення переносних коерцитиметрів розроблявачами вибиралися оптимальні розміри електромагнітів, щоб глибина проникнення магнітного потоку у виріб, яка задається перетином магнітних полюсів електромагніта ( $S_p$ ), забезпечувала можливість вимірювання  $H_C$  для товщин

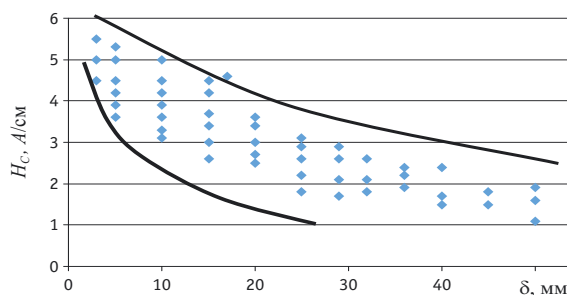


Рис. 1. Залежність змін значень  $H_C^0$  (за показаннями структуроскопа КРМ-ЦК-2М) від товщини прокату зі сталі 09Г2С

у (6—20) мм. Але й у цьому випадку, як показали дослідження, показання приладів не є пропорційними коерцитивній силі за зміни товщини металу.

Під час аналізування результатів вхідного контролю спостерігався значний розкид значень  $H_C^0$  (рис. 1) залежно як від вихідного стану прокату (величини зерна), так і товщини.

Тому для вирішення проблем вимірювання  $H_C$  у різних за товщиною елементах металокопункції застосовуються паспортизовані експериментальні зразки із різних марок сталей зі східчастою (покроковою) зміною перетинів з відомими механічними властивостями, хімічним складом, мікроструктурою й значенням  $H_C$  у кожному перетині зразка (фото). При цьому прокат кожної марки сталі розділяється на групи, у тому числі за величиною зерна, станом поставки й термообробкою.

Після математичного опрацювання результатів вимірювань за методикою [11] для кожного зразка визначалися апроксимувальні функції, які покладені в основу програмного забезпечення інтерпретації вимірювань  $H_C^0$ , отримуваних на об'єкті.

Проведення порівняльних вимірювань  $H_C$  на зразках-еталонах (зі змінним перетином) різними структуроскопами

Показано залежність значень  $H_C$  (за показниками приладу КРМ-ЦК-2М) від товщини металопродукту



Проведення порівняльних вимірювань  $H_C^0$  на зразках-еталонах (зі змінним перетином) різними структуроскопами

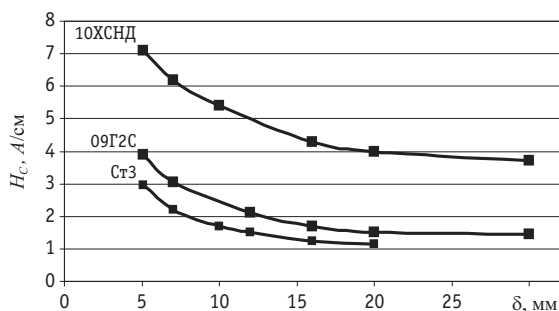


Рис. 2. Залежність змін значень  $H_c$  від товщини металопрокату ( $\delta$ , мм) для різних марок сталей (з величиною зерна 9 балів, ГОСТ 5639-82)

для сталей марок 09Г2С і Ст3 у стані поставки й для сталі 10ХСНД на східчастому зразку, вирізаному із обичайки труби крана-перевантажувача (після аварії) із зони з найбільшим значенням  $H_c$  (рис. 2).

У результаті проведених робіт створювався банк даних паспортизованих зразків, у тому числі з металопрокату, вирізаного з елементів металлоконструкцій на різних стадіях деградації металу, у тому числі із зон руйнування металлоконструкцій після аварій.

Такий підхід (за сучасного розвитку комп'ютерних технологій) дозволив не лише отримувати більш достовірні результати під час оцінювання НДС кранових металлоконструкцій, але й автоматизувати сам процес інтерпретації вимірювань  $H_c$ , у тому числі отримувати у тривимірному графічному зображенні розподіл напруг у різних зонах, як за довжиною конструкції (вузла, елемента), так і за висотою (у перетині) кожного елемента, а у сукупності з проведеними розрахунками за методом граничних станів (з урахуванням поправок на напружений стан конструкції на основі вимірювань  $H_c$ ) можна добитися достатньо повної картини НДС конструкції у цілому.

На основі цієї ідеології в рамках програми науково-дослідних робіт фахівцями корпорації «Інтерпідйомтрансаш» (м. Харків) розроблено і впроваджено метод аналізування вимірювань коерцитивної сили у процесі оцінювання НДС металлоконструкцій кранів з різними товщинами елементів для різних марок сталей, у тому числі імпортного виробництва [12, 13].

Разом з тим, результати цих наукових розроблень стали надбанням українського обмеженого кола експертних організацій, що не вирішує проблеми моніторингу НДС металлоконструкцій навіть для кранів, що працюють у важкому й достатньо важкому режимах роботи.

Практичний досвід застосування магнітної структуроскопії у випадку моніторингу НДС металлоконструкцій «висвітлює» ще одну проблему — відтво-

рюваності результатів коерцитиметрії у разі застосування коерцитиметрів, виготовлених у різні роки.

Контрольні вимірювання  $H_c$  на тих самих контрольних зразках (зі змінним перетином), але різними коерцитиметрами, проведені фахівцями Сумського, Рівненського, Придніпровського ЕТЦ, а також експертами ТОВ «Підйомсервіс» (м. Харків) і ТОВ СП «Товариство технічного нагляду ДІЕКС» (м. Дніпропетровськ), показали, що різниця у результатах вимірювань суттєво впливає на оцінювання НДС металлоконструкцій у процесі їх моніторингу із застосуванням магнітної структуроскопії.

На рис. 3 подано результати вимірювань  $H_c$  на одному з контрольних зразків (№586) зі сталі St 38-в2 (TGL 7960-1981), виготовленого з металу нижнього пояса головної балки крана (виробництва НДР), що відпрацював 25 років.

Вимірювання проводилися переносними структуроскопами типу КРМ-Ц-К2М (зав. №№ 501, 532, 542) і стаціонарним.

Первісні вимірювання на нижньому поясі головної балки крана (після аварії) проводилися коерцитиметром (зав. №542) і містилися у межах (3,6—3,8) А/см (за товщини 25 мм). Після вирізання зразків відбулася релаксація напруг, і значення  $H_c$  (за показаннями приладу) знизилися до (0,8—2,0) А/см.

Різниця у показаннях приладів (залежно від товщини) стає відчутнішою зі збільшенням товщини металопрокату й залежить від роздільної здатності приладів (рис. 3).

Виготовлені останніми роками коерцитиметри мають хорошу відтворюваність результатів вимірювань і вищу роздільну здатність під час вимірювань  $H_c$  за різної товщини елементів конструкції. Але й збільшується різниця з результатами вимірювань приладами перших серій минулих років (рис. 3, 4).

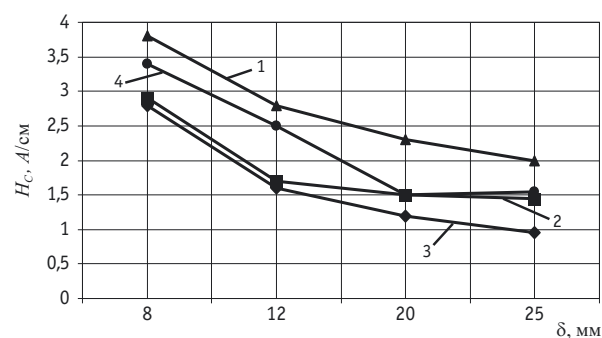


Рис. 3. Результати вимірювань коерцитивної сили ( $H_c$ ) на паспортизованому східчастому еталоні № 586 зі сталі St 38-в2 коерцитиметрами (зав. № № 501(1), 532(2), 542(3)) і стаціонарним (4)

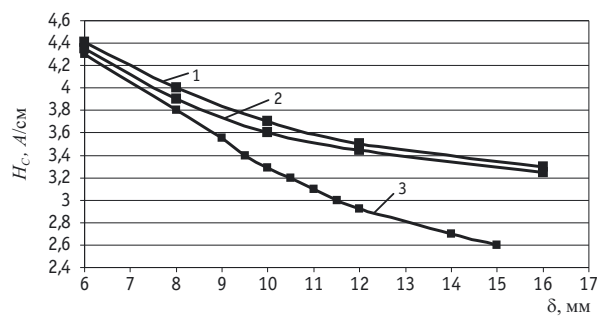


Рис. 4. Результати вимірювань коерцитивної сили ( $H_c$ ) на паспортизованому східчастому еталоні №202 зі сталі 09Г2С коерцитиметрами (зав. №№ 834(1), 830(2), 542(3))

Із наведених вище прикладів випливає, що подальший розвиток магнітного контролю для оці-

нювання НДС металоконструкцій має будуватися на основі удосконалювання магнітних структуроскопів із застосуванням комп'ютерних технологій, що дозволяють фіксувати не лише показання приладів у процесі контролю, але й здійснювати інтерпретацію отриманих значень в автоматизованому режимі під час контролю різних за товщиною елементів металоконструкцій для різних марок сталей.

Накопичений досвід оцінення НДС металоконструкцій підйомних споруд із застосуванням магнітної структуроскопії показав, що систематичний магнітний контроль коерцитивної сили  $H_c$ , починаючи з даних ПМК, дозволяє попереджати перехід металу у стадію розміцнення й запобігати аварійним ситуаціям у процесі експлуатації підйомних споруд.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Котельников В.С., Попов Б.Е., Левин Е.А., Зарудный В.В., Безлюдько Г.Я. Практика магнитной диагностики подъёмных сооружений при проведении экспертизы промышленной безопасности // Подъёмные сооружения. Специальная техника. — 2003. — № 6—7.
2. Попов В.А. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии // Подъёмные сооружения. Специальная техника. — 2004. — № 9.
3. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. — Москва: Наука, 1993.
4. ИСО 4301. Краны грузоподъемные. Классификация. Подъемные устройства. Словарь. Ч. 1—5.
5. Загребельный В.М. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния сварных соединений и стальных металлоконструкций. Определение их остаточного ресурса // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 1999. — № 4.
6. Котельников В.С., Попов Б.Е., Безлюдько Е.Я., Левин Е.А., Зарудный В.В. Теория и практика магнитной диагностики и контроля остаточного ресурса металлоконструкций подъёмных сооружений в России и Украине // Сборник трудов научно-практической конференции «Проблемы производства и безопасной эксплуатации подъёмных сооружений в Украине и России». — Одесса, 2002.
7. ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом.
8. РД ИКЦ «Кран»-007-97/02. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъёмных сооружений при проведении обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности). — Москва, 2002.
9. МВ 0.00-7.01-05. Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу. — Харків, 2005.
10. Котельников В.С., Янов Л.И., Попов В.А., Попов Б.Е. и др. Паспорт магнитного контроля // Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 6.
11. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — Москва: Мир, 1972.
12. Попов В.А. Метод анализа замеров коэрцитивной силы при технической диагностике металлоконструкций кранов с разными толщинами элементов, 6-я Национальная научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 2009.
13. Григоров О.В., Губський С.А., Попов В.А., Хорло Н.Ф. Метод аналізу вимірювань коерцитивної сили під час технічної діагностики металоконструкцій кранів з різними товщинами елементів // Метрологія та прилади. — 2009. — № 5. — С. 51—55. ■



**П. Євтух**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем електроспоживання та комп'ютерних технологій в електроенергетиці,

**С. Бабюк**, кандидат технічних наук, асистент кафедри,  
Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

*Подано процедуру компенсації систематичних похибок, яка в усіх випадках коригує показання виміральної системи і знижує похибку вимірювання. Розглянуто можливість використання розроблених положень стосовно зниження систематичної похибки на прикладі найпростішої системи обліку електроенергії (ЕЕ), яка включає лічильники, встановлені безпосередньо на місцях споживання. Зазначено ряд зауважень щодо питання компенсації систематичної похибки лічильника.*

*The article presents the procedure of the systematic errors compensation which corrects the measuring system data in all cases and decreases the measuring error. The study analyzes the possibility to apply the developed propositions on the decrease of the systematic error on the example of the conventional system of the electric energy calculation, which includes the meters installed at the places of consumption directly. The paper offers some remarks on the problem of the meter systematic error compensation.*

Обсяг втрат ЕЕ в електричних мережах — найважливіший показник економічності їхньої роботи, наочний індикатор стану системи обліку ЕЕ; ефективності енергозбутової діяльності енергопостачальних організацій. Цей індикатор засвідчує проблеми, які вимагають невідкладних рішень у розвитку, реконструкції й технічному переозброєнні електромереж; удосконаленні методів і засобів їхньої експлуатації й керування; підвищенні точності обліку ЕЕ; ефективності збору коштів за спожиту ЕЕ тощо [1].

Стає очевидним, що різке загострення проблеми зниження втрат ЕЕ в електромережах вимагає активного пошуку нових шляхів її вирішення, нових підходів до вибору відповідних заходів, а головне, до організації роботи зі зниження втрат [1]. Загальний підхід до проблеми компенсації систематичних похибок описано у [2—5].



П. Євтух



С. Бабюк



У [2] подано формули поправок для автоматичної компенсації систематичних похибок результатів вимірювання потужності, які вносяться вимірювальними трансформаторами струму та напруги (ТС та ТН), у високовольтних колах, використовуючи паспортні дані характеристик цих трансформаторів. Визначення поправок для корекції характеристик високовольтних ТН за допомогою їх паспортних даних подано у [3]. Розроблення алгоритму для компенсації мультиплікативної, адитивної та адитивно-мультиплікативної складових похибки, а також похибок у процесі вимірювання комплексних величин, зокрема потужності, представлено у [4]. Доведено, що величина остаточної похибки високовольтного вимірювального ТН, скоректована за паспортними даними, не перевищує 0,05 % [5].

Під час проведення вимірювань певної величини  $P$  дійсний результат вимірювань є не лише функцією вимірюваної величини (ВВ), але і впливних факторів:

$$\hat{P} = f(P, q_1, q_2, \dots, q_N), \quad (1)$$

де  $\hat{P}$  — реально вимірене значення ВВ;  $q_1, q_2, \dots, q_N$  — впливні фактори: навантаження, температура, напруга живлення, вологість тощо.

Абсолютна систематична похибка вимірювання виникає через зміну впливних факторів щодо деяких їхніх вихідних значень  $q_{10}, q_{20}, \dots, q_{N0}$ , які приймаються як нормальні умови експлуатації. Тоді абсолютна похибка ВВ дорівнюватиме:

$$\Delta P = \hat{P} - \hat{P}_0 = f(P, q_1, \dots, q_N) - f(P, q_{10}, \dots, q_{N0}). \quad (2)$$

Однак у більшості випадків за нормальні умови експлуатації береться не задане значення  $q_{10}, \dots, q_{N0}$ , а деякий їх діапазон  $q_{10} \div q_{10}, \dots, q_{N0} \div q_{N0}$ . У цьому випадку або завищується клас приладу (збільшується похибка), або уводиться додаткова похибка, яка має або випадковий характер, або систематичний, але неконтрольований, а тому внаслідок випадкових змін впливних факторів її також відносять до категорії випадкової.

Природно, що більш високочастотні вимірювання параметрів впливних факторів, навіть у межах їх нормального діапазону вимірювань  $q_{10} \div q_{10}, \dots, q_{N0} \div q_{N0}$ , дозволяють компенсувати їхній вплив, точніше проводити вимірювання низькочастотних параметрів. Для простоти викладення уважатимемо, що існує один впливний фактор  $q$ , уведемо періоди компенсації  $T_K$  і вимірювання  $T_{\text{вим}}$ , причому  $T_K \ll T_{\text{вим}}$ . Будь-який вимірювальний прилад або вимірювальна процедура, яка працює з періодом  $T_{\text{вим}}$ , дає деяке середнє або сумарне для випадку енергії значення ВВ за час  $T_{\text{вим}}$ ; період цих вимірювань складає швидкодію вимірювальної процедури (приладу).

У цьому випадку точний результат вимірювань, який потрібно прийняти як дійсне значення, має вигляд:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, \quad (3)$$

де  $P_i$  — «миттєве» значення ВВ, що отримується через проміжки компенсації  $T_K = T_{\text{вим}} / N$ ,  $N \gg 1$ .

Нагадаємо, що поняття миттєвого значення ВВ, на відміну від часу вимірювання  $T_{\text{вим}}$ , яке характеризує швидкодію вимірювальної процедури чи приладу, можна увести у випадку, якщо  $N$  є достатньо великою величиною.

За реального вимірювання миттєве значення у момент  $i$  має вид:

$$\hat{P}_i = f(P_i, q_i) + \Delta_i^0, \quad (4)$$

де  $\Delta^0$  — випадкова складова похибки вимірювання миттєвої величини.

Розглянемо спочатку випадок адитивного впливу впливного фактору:

$$\hat{P}_i = P_i + \phi(q_i) + \Delta_i^0, \quad (5)$$

де  $\phi(q_i)$  — функція впливу за значення фактору  $q_i$ , причому  $\phi(q_0) = 0$ . Це співвідношення відображає правильно вибране настроювання приладу (або процедури) за нормального значення впливного фактору.

Якщо вид функції  $\phi(q_i)$  є відомим і відоме миттєве значення  $q_i$ , можна здійснити компенсацію миттєвого значення ВВ:

$$P_{ik} = \hat{P}_i - \phi(q_i) = P_i + \Delta_i^0, \quad (6)$$

а результат вимірювання за час  $T_{\text{вим}}$  матиме такий вид:

$$P_{NK} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i + \Delta_i^0), \quad (7)$$

або

$$P_{NK} = P + \Delta_{cp}^0, \quad (8)$$

тобто, після компенсації миттєвих значень ВВ результат вимірень відрізнятиметься від дійсного значення на середнє за час  $T_{\text{вим}}$  значення випадкової похибки.

Для вимірювання, яке дає суму миттєвих значень, матимемо:

$$P_{NK} = \sum_{i=1}^N P_i + \sum_{i=1}^N \Delta_i^0. \quad (8a)$$

Тобто випадкова помилка накопичуватиметься, але з випадковим знаком, і буде випадковою за величиною, з чого не впливає, що відносна похибка результату вимірень буде більшою за відносну похибку миттєвого вимірювання.

Необхідно відзначити, що впливний фактор виміряти точно недоцільно. Це легко показати, якщо припустити, що абсолютна похибка вимірювання впливного фактору, яка виникає,  $\Delta q$  є постійною.

Тоді, урахувавши неперервність функції  $\phi(q_i)$ , отримаємо:

$$\phi(q_i + \Delta q) = \phi(q_i) + \Delta q_i. \quad (9)$$

Підставляючи цей вираз у (6), маємо доданок, що з'являється за рахунок неточності вимірювання впливного фактору. Ураховуючи відсутність даних щодо знаку похибки третього члена суми у правій частині виразу, отримаємо:

$$P_{ik} = P_i + \Delta_i + \Delta q_i. \quad (10)$$

Після підстановки у (7) остаточно

$$P_{NK} = P + \Delta_{cp} + \bar{\Delta}q, \quad (11)$$

де  $\bar{\Delta}q$  — середнє значення похибки компенсувальної величини за рахунок неточності відліку впливного фактору.

Очевидно, що значення  $\Delta q \ll \phi(q_i)$ . Оскільки  $\phi(q_i)$  є систематичною похибкою, впливає, що, в принципі, похибка вимірювання впливного фактору в цій задачі компенсації має другий порядок малості, й величиною  $\bar{\Delta}q$  можна знехтувати.

Отже, абсолютна похибка після корекції дорівнює:

$$\Delta P_{NK} = \Delta_{cp}. \quad (12)$$

Легко визначити коефіцієнт зменшення похибки:

$$\gamma = 1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi(q_i) / \Delta_{cp}. \quad (13)$$

Розглянемо загальний випадок неадитивної функції впливу. Тоді миттєве значення ВВ матиме вид:

$$\hat{P} = f(P_i, q_i) + \Delta_i, \quad (14)$$

де функція  $f(P_i, q_i)$  має задовільняти умові  $f(P_i, q_0) = P_i$ . Це означає, що за значення впливного фактору, рівного  $q_0$ , система є повністю скомпенсованою, настроєною і вплив факторів з'явиться за  $q_i \neq q_0$ . Прикладом неадитивної функції може бути функція  $\hat{P} = P_i(q_i/q_0)$ . Компенсації впливного фактору за значення  $q_0$  відповідає настроювання системи, і випадкова похибка при цьому компенсується.

Ураховуючи, що вплив факторів має бути малим порівняно з впливом зміни ВВ, отримаємо:

$$\hat{P}_i = f(P_i, q_i) + \frac{\partial f(P_i, q_i)}{\partial q} (q_i - q_0) + \Delta_i. \quad (15)$$

Для компенсації формуємо другий член суми, який стоїть у правій частині (15). Однак значення  $P_i$  до компенсації є невідомим, відомим є значення  $\hat{P}_i$ . Тому другий член суми, який представляє некомпенсовану систематичну похибку, знаходимо у виді:

$$\Delta_i = \frac{\partial f(\hat{P}_i, q_i)}{\partial q} (q_i - q_0).$$

Очевидно, що значення відрізнятиметься від другого члена суми (15), однак легко показати,

що ця відмінність, як і у випадку неточності знання впливного фактору, має другий порядок малості, й ним можна знехтувати.

Звідси остаточно отримаємо:

$$\hat{P}_i = f(P_i, q_0) + \Delta_i = P_i + \Delta_i. \quad (16)$$

Виконавши вимірювання параметра  $P$  за час  $T_{\text{вим}}$ , що дорівнює  $NT_k$ , отримаємо скомпенсоване значення параметра:

$$\Delta P_{NK} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(P_i, q_0) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i. \quad (17)$$

Використовуючи властивості функції  $f(P_i, q_i)$ , остаточно отримаємо:

$$\Delta P_{NK} = P + \Delta_{cp}. \quad (18)$$

Похибки у випадках компенсації та некомпенсації мають вид:

$$\Delta P_{NK} = \Delta_{cp},$$

$$\Delta P_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\partial f(\hat{P}_i, q_0)}{\partial q} (q_i - q_0), \quad (19)$$

а коефіцієнт зменшення похибки дорівнюватиме:

$$\gamma = 1 + \frac{\Delta P_N}{\Delta_{cp}}. \quad (20)$$

Отже, процедура компенсації у всіх випадках коригує показання вимірювальної системи і знижує в  $\gamma$  разів похибку.

Розглянемо порядок побудови алгоритму корекції методичної похибки.

Покроково визначаються:

- функція впливу (14), яка має надаватися розробниками систем, приладів, трансформаторів. Ця функція має задовільняти умові компенсації;
- миттєве значення впливного фактору  $q_i$ , з періодом  $T_k$ , значно меншим від періоду вимірювань  $T_k$ ;
- миттєве значення поправки, для чого вираховується частинна похідна функції  $f(P_i, q_i)$ , і величина поправки заноситься до оперативної пам'яті машини;
- компенсоване миттєве значення ВВ і заноситься до пам'яті машини;
- значення ВВ, як середнє арифметичне (або суми) усіх компенсованих миттєвих значень.

На завершення викладення загальних положень зазначимо: компенсація за динаміки впливного фактору буде точнішою, що буде меншим період компенсації  $T_k$  від періоду вимірювання  $T_k$  і часу помітної зміни впливного фактору. Крім того, вимірювання (або інформація) щодо впливного фактору дозволяє використовувати властивості систематичної похибки, а відсутність цієї інформації переводить її до розряду випадкових.

Розглянемо можливість використання розроблених положень стосовно зниження систематичної

похибки на прикладі найпростішої системи обліку ЕЕ, яка включає лічильники, встановлені безпосередньо на місцях споживання. Функціональну схему розподілу ЕЕ представлено на рис. 1.

Система електропостачання живить  $M$  споживачів енергії, кожний з яких контролюється лічильниками активної енергії. Ці лічильники мають імпульсні перетворювачі, які через кожні  $K$  кВт · год передають один імпульс до пункту обліку. Отже, енергія, що споживається, надходить на пункт обліку з дискретністю  $K$  кВт · год. Відомо, що лічильники характеризуються класом точності, однак це нормована похибка, яка для хороших виробництв є у (1,2—1,5) рази більшою за дійсну похибку лічильника. Крім того, похибка лічильника залежить від струму навантаження  $I$  або відношення  $I/I_H$ , де  $I_H$  — номінальне для даного лічильника значення навантаження, похибка також залежить від  $\cos \varphi$ . Під час випуску лічильників ці залежності контролюються на заводі за еталонними лічильниками.

Наприклад, на Вільнюському заводі електровимірювальних приладів відносні похибки від струму навантаження контролюються у п'яти точках за  $I/I_H = 0,05; 0,2; 0,5; 1; 2$ , а від зміни  $\cos \varphi$  — у точках  $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ .

Типові значення відносної систематичної похибки  $\delta_s, \%$ , які виникають у такому випадку, подано у таблиці.

Аналіз таблиці показує, що зміни додаткової похибки для кожного лічильника мають індивідуальну залежність. Встановлено експериментально, що ця залежність під час експлуатації майже не змінює свого характеру протягом (8—10) років, хоча термін для перевіряння є меншим. Найчастіше зміни похибки виявляються, як у 6-ому лічильнику таблиці, однак значення похибки може змінитися у достатньо широких межах (0—1) % і мати індивідуальний характер.

Сьогодні ці дані використовуються для аналізування якості технології виготовлення лічильника, матеріалів, із яких його виготовлено, і якості налаштування. Коли характерні залежності порушуються на заводі, проводять аналіз причин. За наве-

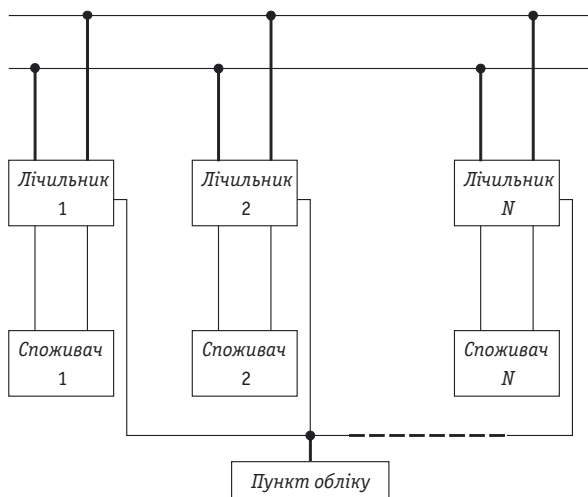


Рис. 1. Функціональна схема розподілу ЕЕ

деними даними лічильники 1—5 сигналізують стосовно певної занепокоєності щодо рівня якості процесу їх виготовлення і налаштування. Для характеристики класу лічильників, зменшення їх похибки ці дані не використовуються.

Однак, внаслідок відзначеної стабільності цих характеристик у часі, їх можна успішно використовувати для підвищення точності обліку шляхом виключення систематичної похибки, якщо контролюється струм навантаження. Звичайно в колах обліку ЕЕ представляє інтерес і враховується півгодинна енергія, яка дає можливість за майже постійної напруги мережі  $U$  визначити середній за півгодини струм навантаження, який для щомісячних вимірювань є миттєвим значенням, як величину  $I_{0,5} = \hat{W}_{0,5}/U$ .

Кожні півгодини ця величина складає значення впливного фактору  $q_i$ , і це дозволяє в середньому за кожні півгодини компенсувати вплив струму навантаження. Для такої мети через точки функції впливу, яка отримана на заводі і має у цьому випадку адитивний характер (таблиця, лічильник 6), проводимо апроксимовані прямі (рис. 2). Припускається, що між експериментальними точками функція веде себе плавно. Якщо це положення не дотримується, необхідно докладніше зняти значення функції впливу.

Типові значення відносної систематичної похибки  $\delta_s, \%$

Лічильники \ $I/I_H; \varphi$	0,05	0,2	0,5	1	2	0	30°	50°
1	-0,7	-0,5	-0,2	0	-0,6	0,4	-0,1	-0,6
2	-0,2	-0,3	0,1	1,5	0	0	0,2	-0,8
3	-0,7	-1,9	-1,2	0,4	-1,2	-0,4	-0,3	-0,8
4	0,4	-0,7	0,1	0,5	-0,2	0,3	0	0
5	0,7	-0,8	0	1,9	0,8	-0,2	0,2	1,5
6	-0,6	-0,4	-0,5	0,5	0,4	-0,1	0,3	0

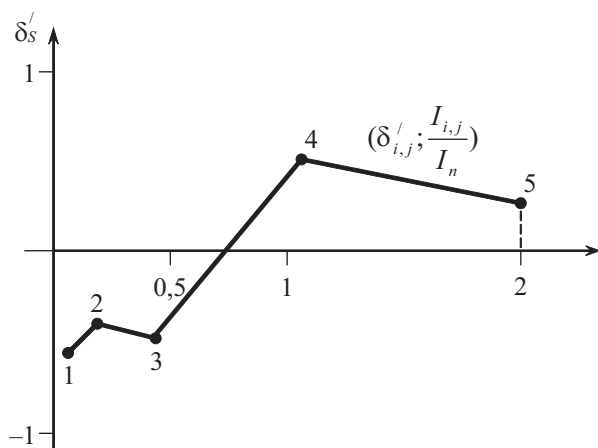


Рис. 2

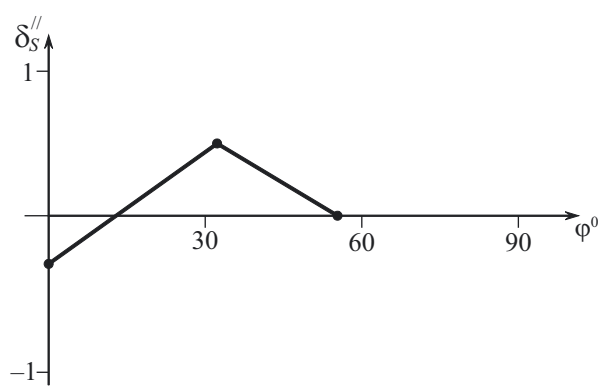


Рис. 3

Для довільного миттєвого значення струму  $I_{0,5i}$  отримаємо за видом функції (рис. 2) значення  $\delta'_{si}$ . Потім визначаємо величину поправки за півгодини, яка дорівнює  $\delta'_{si} \hat{W}_{0,5i}$ , після чого підстановкою в (6) з урахуванням знаку отримаємо:

$$\hat{W}_{0,5i} = \hat{W}_{0,5i} - \delta'_{si} \hat{W}_{0,5i} \quad (21)$$

У подальшому індекс, відповідний періоду компенсації, опускаємо. Отриману величину півгодинної енергії додаємо в суматор. Підсумкова похибка має випадковий характер, який важко контролювати, й її визначення потребує додаткових досліджень властивостей як лічильників, так й інтегральних характеристик навантаження.

Описана процедура компенсації похибки є першим кроком у виключенні методичної похибки. Другим є облік впливу коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ . Якщо є лічильники активної та реактивної потужності, можна через кожні півгодини визначити  $\cos \varphi$ . Для кожного лічильника будується за експериментальними даними функція впливу  $\delta''_{si}$ , потім у такому ж порядку, як і для випадку впливу струму, виконується компенсація систематичної складової похибки. При цьому потрібно скористатися графіком на рис. 3.

## ВИСНОВКИ


Відзначимо ряд зауважень щодо питання компенсації систематичної похибки лічильника. Перше стосується необхідності мати для кожного лічильника його індивідуальну характеристику впливних факторів. Легко показати, що, у разі деяких усереднень за характеристиками сукупності лічильників, залежно від дисперсії цих характеристик відносно деякої середньої виникне некомпенсована випадкова похибка, тобто для деяких лічильників залежно від того, наскільки характеристики є далекими від середньої, компенсація буде неточною. Оцінювання цієї неточності виконати легко. Аналогічним способом вирішується питання і з усередненням характеристик від впливу коефіцієнта потужності.

Друге — на сьогодні, під час випуску лічильників, їхні характеристики з точки зору компенсації ніхто не використовував, і тому вони зняті достатньо грубо і з грубою дискретністю. Необхідно детальніше зняти функції впливу і вивчити їх вид.

Третє — необхідно, залежно від виду індивідуальних функцій впливу, вибрати оптимально їх апроксимацію між точками. Не виключено, що достатньою буде проста лінійна або прямокутна апроксимація.

Четверте — період компенсації  $T_k$  має бути значно меншим за час вимірювання  $T_{\text{вим}}$ , тоді навіть стрибки навантаження протягом будь-якого проміжку  $T_k$  усереднюватимуться і не дадуть великої помилки некомпенсації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Інформаційний портал електротехнічної галузі «ПроЕлектро» [Електронний ресурс] / — Львів: ТзОВ «Мережеві медіа», 2009. — Режим доступу: <http://www.proelectro.info/content/detail/4250>.
2. Євтух П. С. Автоматична компенсація систематичних похибок при вимірюваннях потужності в колах з вимірювальними трансформаторами струму та напруги / П. С. Євтух // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2000. — № 56. — С. 27—28.
3. Євтух П. С. Моделі похибки високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги / Євтух П., Куземко Н., Бабюк С. // Вісник ТДТУ. — 2009. — Т. 14. — № 2. — С. 85—93.
4. Євтух П. С. Структура алгоритмів автоматичної компенсації систематичних похибок масштабуючих вимірювальних перетворювачів / Євтух П., Куземко Н., Бабюк С. // Вісник ТДТУ. — 2010. — Т. 15. — С. 163—170.
5. Євтух П. С. Оцінювання похибок джерел сигналів електроенергетичних систем за навантаженням / П. С. Євтух, С. М. Бабюк // Метрологія та прилади. — 2012. — № 1. — С. 49—53. 



УДК 53.082.7:621.317.37

# КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ КУТА ФАЗОВОГО ЗСУВУ МІЖ ДВОМА ГАРМОНІЧНИМИ СИГНАЛАМИ

**Ю. Євдокименко**, кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
Харківський торговельно-економічний інститут  
Київського національного торговельно-економічного університету,

**О. Нарежній**, старший науковий співробітник,

**М. Світенко**, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник,  
Метрологічний центр військових еталонів Збройних Сил України, м. Харків

*Запропоновано кореляційно-екстремальний метод вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами. Він дозволяє визначити поточні значення амплітуд і фаз вихідних сигналів калібратора фазових зсувів шляхом розв'язання лінійної системи рівнянь, отриманих за допомогою мінімізації функціонала, що містить нев'язки між результатами миттєвих вимірювань вихідних сигналів та апріорними еталонними сигналами.*

*The research proposes by correlation-extreme method of measurement of the angle of phase shift between the two harmonic signals. It allows determine the current value of the amplitudes and phases of the output signals of the calibrator phase shifts by solving a linear system of equations obtained by minimizing a functional containing a discrepancy between the results of instantaneous measurements of output signals and a priori reference signal.*



Ю. Євдокименко



О. Нарежній



М. Світенко

## ВСТУП

У Збройних Силах України методи фазометрії широко використовуються під час калібрування радіолокаційних і гідролокаційних станцій, курсоглісадних систем посадки літаків, у процесах полігонних випробувань та експлуатації інших зразків озброєння й військової техніки. У роботі [1] наведено класифікацію методів вимі-

рювання фазових зсувів гармонічних сигналів.

Аналіз фазовимірювальної апаратури спеціального призначення показав, що для забезпечення єдності та точності фазових вимірювань в Україні необхідна система передавання одиниці кута фазового зсуву між двома електричними коливаннями із похибками на рівні  $(0,1-0,01)^\circ$  у діапазоні частот  $(5-10)$  МГц і динамічним

діапазоном амплітуд сигналів (40—50) дБ. При цьому формування кута фазового зсуву із такими параметрами не зумовлює ускладнень у цифрових калібраторах фазових зсувів, на відміну від вимірювань цих параметрів. У зв'язку з цим актуальним став пошук методу фазових вимірювань, який дозволяє забезпечити необхідну точність і автоматизацію фазових вимірювань.

Як модель еталонного сигналу для калібраторів фазових зсувів застосовується модель гармонічного сигналу, параметри якого не змінюються на нескінченному інтервалі часу. Така модель є ідеалізованою, і на практиці використовується лише з фінітним тимчасовим вікном під час проведення вимірювань. Аналізування потенційних можливостей і основних похибок відомого кореляційного методу оцінювання кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами проведено у роботах [1—8]. До недоліків кореляційного методу належать такі: обмежений величиною в декілька кілогерц верхній частотний діапазон; необхідність взаємної синхронізації частоти тактового генератора для аналого-цифрового перетворювача (АЦП) цифрового корелометра і вихідних сигналів калібратора фази; косинусоїдальний характер шкали; однозначність відліку лише у межах (0 — 180)°; великі значення похибки вимірювань кутів фазового зсуву, близьких до значень 0° і 180°.

У [9] описано цифровий кореляційний фазометр зі спрощеним алгоритмом роботи арифметичного пристрою. Можливі реалізації, в яких лінеаризується шкала [7], але наявність великих похибок вимірювання кутів фазового зсуву, близьких до значень 0° і 180°, є принциповою для цього методу та не може бути компенсована.

Усереднення результатів вимірювань кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами за допомогою математичного опрацювання результатів вимірен миттєвих значень напруги досліджуваних гармонічних сигналів призводить до появи різного роду похибок, обумовлених наявністю зон нечутливості методу до змін фази. Ця нечутливість пов'язана з проявом нелінійних функціональних зв'язків між миттєвими значеннями напруги і фази гармонічних сигналів. Ця обставина призводить до необхідності пошуку таких методів перетворення результатів вимірен миттєвих значень напруг двох гармонічних сигналів у кут їх фазового зсуву, які б не мали зон нечутливості.

Метою статті є підвищення точності фазових вимірювань у сучасній фазовимірювальній апаратурі спеціального призначення на основі розроблення ме-

тоду вимірювання кута фазового зсуву в діапазоні частот від 5 Гц до 10 МГц з абсолютною похибкою, не більшою  $\pm 0,01$ , і динамічним діапазоном (40—50) дБ.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Суть запропонованого кореляційно-екстремального методу вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами описано нижче. Вимірюваному сигналу, який можна описати певною функцією  $f(t)$ , ставиться у відповідність еталонний сигнал, який можна описати функцією  $F(t, \vec{P})$ , де  $t$  — поточний час,  $\vec{P}$  — вектор параметрів еталонного сигналу, що підлягають визначенню. Потім визначається взаємна кореляція:

$$R(\tau, \vec{P}) = \int_0^{\infty} [f(t) - F(t, \vec{P})] \cdot [f(t - \tau) - F(t - \tau, \vec{P})] dt, \quad (1)$$

де  $\tau = \varphi T / 2\pi$  — час запізнювання,  $\varphi$  — кут фазового зсуву, однозначно визначений лише на інтервалі  $[0, 2\pi)$ , а  $T$  — період коливань опорної частоти.

Взаємна кореляція, як функція від параметрів  $\vec{P}$  і  $\tau$ , матиме глобальний екстремум за таких значень указаних параметрів, за яких функція  $F(t, \vec{P})$  найбільш точно відображає функцію  $f(t)$ .

Відомо, що похідна функції в місці її екстремуму дорівнює нулю. Відповідно до викладеного можна стверджувати, що розв'язання системи рівнянь, складеної шляхом прирівнювання нулю частинних похідних за усіма елементами вектора  $\vec{P}$  і параметра  $\tau$ , дозволяє отримати однозначні оцінки елементів вектора  $\vec{P}$  і параметра  $\tau$ , за яких еталонний сигнал найточніше відображатиме вимірюваний сигнал.

Якщо при цьому є відомим клас функцій, до яких належить вимірюваний сигнал, задача ідентифікації вимірюваного сигналу за допомогою еталонного розв'язується оптимальним способом.

У такій постановці задачі  $R(\tau, \vec{P})$  є функціоналом, що підлягає мінімізації. При цьому як критерій оптимальності використовується умова мінімуму площі, що міститься між графіками обох функцій, тобто мінімум квадратичної форми [2].

Калібратор фази відтворює два гармонічних сигнали із заданим кутом фазового зсуву між ними, тому вимірені функції належать до класу гармонічних функцій.

У цьому випадку сигнали з виходів калібратора фази можна представити у виді:

$$f_1(t) = A_R \cos \omega t + A_I \sin \omega t + \xi_1(t), \quad (2)$$

$$f_2(t) = B_R \cos \omega t + B_I \sin \omega t + \xi_2(t), \quad (3)$$

де  $A_R, A_I, B_R, B_I$  — параметри сигналів, що підлягають визначенню,  $\xi_1(t), \xi_2(t)$  — шумові складові сигналів калібратора фази, що мають такі характеристики: математичні очікування  $M[\xi_i(t)] = 0$ ,

$M[\xi_2(t)] = 0$  і дисперсії  $D[\xi_1(t)] = \sigma_1^2$ ,  $D[\xi_2(t)] = \sigma_2^2$  відповідно; опорна частота калібратора фазового зсуву  $\omega = 2\pi/T$  (априорі відома величина).

При цьому для сигналів (2) і (3) за еталонні можна обрати такі функції:

$$F_1(t, \omega, X_R, X_I) = X_R \cos \omega t + X_I \sin \omega t; \quad (4)$$

$$F_2(t, \omega, Y_R, Y_I) = Y_R \cos \omega t + Y_I \sin \omega t. \quad (5)$$

З урахуванням (4) і (5) вираз (1) для  $\Phi(\vec{P})$  функціонала за двома каналами калібратора фази можна представити у виді:

$$\Phi_1(X_R, X_I, \omega) = \int_0^\infty [f_1(t) - X_R \cos \omega t - X_I \sin \omega t]^2 dt; \quad (6)$$

$$\Phi_2(Y_R, Y_I, \omega) = \int_0^\infty [f_2(t) - Y_R \cos \omega t - Y_I \sin \omega t]^2 dt. \quad (7)$$

Значення функцій  $f_1(t)$  і  $f_2(t)$  можна вимірити за допомогою АЦП у дискретні моменти часу. При цьому на кінцевому інтервалі спостереження можна отримати лише кінцеві вибірки  $f_1(t_j)$  і  $f_2(t_j)$  за  $j \in 1 \dots N$ . У цьому випадку вирази (6) і (7) трансформуються у кінцеві суми.

Перед тим, як отримати систему рівнянь щодо параметрів еталонного сигналу, звернемо увагу на таке. По-перше: частота сигналів у виразах (2) і (3) задається калібратором фазових зсувів, її значення можна уточнити шляхом вимірювання частотоміром. Тому цей параметр еталонного сигналу можна вважати відомим. По-друге: інтервал часу  $\Delta t = t_{j+1} - t_j$  між двома сусідніми відліками вимірюваних сигналів також є відомим і визначається частотою вибірки АЦП. Тому невідомими параметрами еталонних сигналів є амплітуди  $X_R, X_I, Y_R, Y_I$ , щодо яких і необхідно будувати систему рівнянь. По-третє: за відомої частоти  $\omega$  система рівнянь щодо шуканих параметрів розпадається на дві незалежні системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial X_R} \Phi_1(X_R, X_I) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial X_I} \Phi_1(X_R, X_I) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial Y_R} \Phi_2(Y_R, Y_I) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial Y_I} \Phi_2(Y_R, Y_I) = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

Після виконання операцій диференціювання системи (8) набувають виду:

$$\begin{cases} (N-a)X_R + bX_I = 2c_I; \\ bX_R + (N+a)X_I = 2c_R, \\ (N-a)Y_R + bY_I = 2g_I; \\ bY_R + (N+a)Y_I = 2g_R, \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{де} \quad a = \sum_{j=1}^N \cos(j\omega\Delta t); \quad b = \sum_{j=1}^N \sin(j\omega\Delta t);$$

$$\begin{aligned} c_R &= \sum_{j=1}^N f_1(t_j) \cos(j\omega\Delta t); & c_I &= \sum_{j=1}^N f_1(t_j) \sin(j\omega\Delta t); \\ g_R &= \sum_{j=1}^N f_2(t_j) \cos(j\omega\Delta t); & g_I &= \sum_{j=1}^N f_2(t_j) \sin(j\omega\Delta t), \end{aligned}$$

$N$  — кількість вимірювань вихідних сигналів, що використовуються для визначення параметрів еталонних сигналів.

Системи (9) мають такі розв'язки:

$$\begin{aligned} X_R &= \frac{2[bc_R - (N+a)c_I]}{b^2 + a^2 - N^2}; & X_I &= \frac{2[bc_I - (N-a)c_R]}{b^2 + a^2 - N^2}; \\ Y_R &= \frac{2[bg_R - (N+a)g_I]}{b^2 + a^2 - N^2}; & Y_I &= \frac{2[bg_I - (N-a)g_R]}{b^2 + a^2 - N^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Пари амплітуд  $X_R$  і  $X_I$ ,  $Y_R$  і  $Y_I$  є реальними та уявними складовими комплексних амплітуд, за допомогою яких можна представити гармонічні сигнали на виходах калібратора фазового зсуву, тобто:

$$X = X_R + jX_I = X_0 \exp(j\phi_1);$$

$$Y = Y_R + jY_I = Y_0 \exp(j\phi_2).$$

Із урахуванням наведеного, значення фази в першому  $\phi_1$  і другому  $\phi_2$  каналах можна представити у такий спосіб:

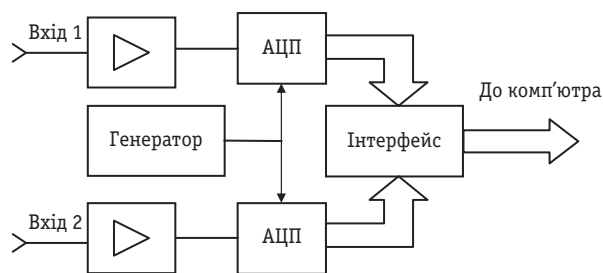
$$\phi_1 = \begin{cases} \arctg\left(\frac{X_I}{X_R}\right), & \text{за } X_R > 0, X_I > 0; \\ \arctg\left(\frac{X_I}{X_R}\right) + \frac{\pi}{2}, & \text{за } X_R < 0, X_I > 0; \\ \arctg\left(\frac{X_I}{X_R}\right) + \pi, & \text{за } X_R < 0, X_I < 0; \\ \arctg\left(\frac{X_I}{X_R}\right) + \frac{3\pi}{2}, & \text{за } X_R > 0, X_I < 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$\phi_2 = \begin{cases} \arctg\left(\frac{Y_I}{Y_R}\right), & \text{за } Y_R > 0, Y_I > 0; \\ \arctg\left(\frac{Y_I}{Y_R}\right) + \frac{\pi}{2}, & \text{за } Y_R < 0, Y_I > 0; \\ \arctg\left(\frac{Y_I}{Y_R}\right) + \pi, & \text{за } Y_R < 0, Y_I < 0; \\ \arctg\left(\frac{Y_I}{Y_R}\right) + \frac{3\pi}{2}, & \text{за } Y_R > 0, Y_I < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Отже, задача визначення різниці фаз  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  між двома вихідними сигналами калібратора фази є розв'язаною.

Реалізація методу, запропонованого у статті, базується на апостеріорному математичному опрацюванні достатньо великих масивів результатів вимірень, отриманих від АЦП. Таке опрацювання достатньо просто виконати за допомогою сучасної комп'ютерної техніки.

Щоби вимірювання амплітуди вихідних сигналів з обох виходів калібратора здійснювалися



Структурна схема пристрою

одночасно аби виключити спотворення форми вихідних сигналів за рахунок нееквідистантності інтервалів часу між вимірюваннями, доцільно здійснювати синхронізацію роботи обох АЦП. На рисунку представлено структурну схему пристрою, який реалізує кореляційно-екстремальний метод вимірювань різниці фаз між двома гармонічними сигналами.

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу існуючих цифрових методів вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами показано, що за наявності сучасних швидкісних комп'ютерів та прецизійних швидкісних багаторозрядних АЦП на передній план з точки зору оперативності та точності вимірювань виступають методи прямого вимірювання миттєвих значень напруги гармонічних сигналів у діапазоні частот до декількох мегагерц із подальшим чисельним опрацюванням результатів вимірювань із метою визначення кута фазового зсуву. Представлено кореляційно-екстремальний метод вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонічними сигналами на основі використання сучасних АЦП. Запропоновано структурну схему пристрою, що реалізує цей метод.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія / Під ред. Л.М. Щербак. — Тернопіль: ТДТУ, 2009. — 384 с.
2. Волков В.М., Іванько А.А. Нестационарные процессы в элементах фазометрических систем. — К.: Техніка, 1977. — 120 с.
3. Чмых М.К. Цифровая фазометрия. — М.: Радио и связь, 1993. — 184 с.
4. Ганзинг К.И. Измерение фазовых характеристик методом корреляции // Вопросы радиоэлектроники. Сер. VI. Радиоизмерительная техника. — 1962. — Вып. 4. — С. 87—96.
5. Молодов В.Д. Корреляционный метод измерения фазового сдвига // Контрольно-измерительная техника. — Львов, 1969. — Вып. 6. — С. 40—43.
6. Молодов В.Д. Корреляционные фазометры // Контрольно-измерительная техника. — Вып. 6. — Львов, 1969. — С. 44—48.
7. Молодов В.Д. Влияние помех и формы кривой на погрешность двухканального корреляционного фазометра // Контрольно-измерительная техника. — Вып. 10. — Львов, 1971. — С. 25—29.
8. Колтик Е.Д., Коровкин Е.И. Корреляционный метод измерения фазового сдвига // Тр. метролог. ин-тов СССР. — 1971. — Вып. 126 (186). — С. 26—34.
9. Циделко В.Д., Кузнецов В.И., Иванов Б.Р. Цифровой корреляционный фазометр. Автор. свид. № 423066. — «Бюл. изобр.». — 1974. — № 13.

## МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «NANOSCALE 2013»

**25—26** квітня у Парижі відбулася чергова міжнародна конференція, присвячена кількісним вимірюванням у мікро- і нанометровому діапазоні, що включала семінари з кількісної мікроскопії, методів і стандартів калібрування у нанометровому масштабі. Її організаторами виступили: Інститут РТВ, Німеччина; Група нанометрології й ТК «Довжина» EURAMET; Національна лабораторія метрології й випробувань LNE, Франція.

На ній презентовано близько 110 доповідей учених із країн Європи, Америки й Азії. Обговорювалися проблемні питання, практичні результати й перспективи розвитку, пов'язані з кількісними вимірюваннями розмірних параметрів у нанометровому діапазоні, що є основою контролю й керування в нанотехнологіях і має важливе значення для вивчення характеристик і властивостей наноструктур. Ці питання є достатньо актуальними, оскільки

у нанометровому діапазоні знання розмірних властивостей структур є фундаментальною підставою, від якої залежить ряд фізичних і хімічних властивостей наноструктур і наноматеріалів, що важливо для забезпечення як належної якості, так і безпеки продукції нанотехнологій у мікро- й наноелектроніці, біології, медицині, матеріалознавстві, фізиці й обробці поверхні, інших областях.

Україна на конференції була представлена із презентацією доповіді, присвяченої розвитку інтерференційних високоточних методів лінійних вимірювань «Підвищення точності лінійних вимірювань інтерферометром переміщення з використанням методу рандомізації» (автори : Купко В. С, Ковшов С. Б., Лукін І. В., Омельченко А. В., ННЦ «Інститут метрології», м. Харків).

**С. Ковшов**, старший науковий співробітник,  
ННЦ «Інститут метрології», м. Харків



УДК 543.27

# ПРОБЛЕМИ УПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО І ПОБУТ ПОЖЕЖНИХ ГАЗОВИХ СПОВІЩУВАЧІВ

**В. Козубовський**, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,

**М. Федак**, аспірант,

Ужгородський національний університет

*Розглянуто проблемні питання упровадження у виробництво пожежних сповіщувачів газових (ПСГ). Наголошено, що сертифікаційні випробування ПСГ є необґрунтовано складними і суттєво відрізняються від випробувань газосигналізаторів, хоча вони мають фактично одне і те ж призначення — визначення загазованості приміщень. Показано переваги і недоліки ПСГ. Широкому їх упровадженню може сприяти їхнє використання як приладів подвійного призначення — для виявлення пожежі на ранніх стадіях її розвитку і для визначення загазованості приміщень токсичними і пожежонебезпечними газами та парами.*

*The article discusses the problems of manufacturing application of gas-sensing fire detector. It is shown that certification test of gas-sensing fire detector are unreasonably difficult and essentially differ from tests of gas alarm detector though they have actually the same application — definition of a gassy areas. The paper clarified the advantages and disadvantages of fire alarms gas. Authors consider that a wide application of fire alarms gas can be promoted by their use as a devices of dual-purpose — for fire detection at early stages its development and for detection of a gas-polluted by toxic both fire-dangerous gases and steams.*



В. Козубовський



М. Федак

Останнім часом велика увага приділяється ПСГ як приладам виявлення пожеж на початкових стадіях їх розвитку [1]. Дійсно, за низьких температур горіння проходить неповне окиснення вуглецю й виділяється велика кількість чадного газу (CO) і диму (незгорілих частинок вуглецю). Однак, добре відомі й широко використовувані димові сповіщувачі не дозволяють виявити пожежу на етапі тління речовини настільки швидко, як це можуть зробити ПСГ CO. Як уже зазначалося, дим — незгорілі частинки, які є достатньо важкими, накопичуються внизу й піднімаються

уверх до сповіщувачів за рахунок конвекційних і дифузійних потоків за значного градієнта температур. Ці потоки достатньо інтенсивні лише за значного перепаду температур, тобто, коли температура горіння достатньо висока й початковий етап горіння пройдено. У випадку ж чадного газу він швидко піднімається вверх за рахунок броунівського хаотичного руху молекул. Дійсно, молекулярна вага CO — 28, така ж як і в азоту, й ці газу швидко переміщуються за рахунок хаотичного руху молекул. Ураховуючи ці фактори, нині **розроблено ряд міжнародних стандартів ISO 7240-8, EN 54-30, які визначають вимоги до ПСГ, наводять методи їх випробувань**; а також проект стандарту РФ ГОСТ Р 53325 за мотивами EN 54 (за мотивами, бо дуже багато «відхилень»). Однак методи випробувань цих приладів є не обґрунтовано складними, дорогими, що перешкоджає їхньому широкому впро-

вадженню у виробництво. Дійсно, ПСГ є по суті газосигналізаторами. Методику випробувань останніх достатньо добре відпрацьовано метрологічними службами. А для пожежних сертифікаційних центрів — це річ у собі, й вони не знають, як грамотно й з найменшими зусиллями провести випробування цих приладів. Тому центри проводять сертифікаційні випробування за стандартною методикою, як і для всіх інших пожежних сповіщувачів (ПС). Однак у цих випробуваннях як контрольний прилад CO використовується газоаналізатор CO, за допомогою якого й визначаються всі основні параметри ПСГ CO. Тобто сам контрольний прилад випробовувався як газоаналізатор, йому приписувалися певні метрологічні параметри, однак характеристик ПС він не має, оскільки не випробовувався як ПС, наприклад, на вплив напрямку, швидкості повітряного потоку, компонентів, що заважають, які виникають

Таблиця 1. План випробувань (ISO 7240-8)

Випробування	Розділ	Номер зразка
1. Повторюваність (CO)	5.2	Довільно обраний
2. Залежність від напрямку (CO)	5.3	Довільно обраний
3. Відтворюваність (CO)	5.6	Усі зразки
4. Перехресна чутливість	5.8	1
5. Довготермінова стабільність (CO)	5.9	4
6. Насичення (CO)	5.10	2
7. Схильність до впливу хімічних компонентів, які можуть бути присутніми під час пожежі	5.11	3
8. Зміна параметрів електроживлення	5.12	5
9. Повітряний потік	5.13	6
10. Сухе тепло (стійкість)	5.14	7
11. Холод (стійкість)	5.15	8
12. Вологе тепло, циклічне (стійкість)	5.16	9
13. Вологе тепло, постійний режим (міцність)	5.17	10
14. Низька вологість, постійний режим (міцність)	5.18	11
15. Корозійний вплив діоксиду сірки SO <sub>2</sub> (міцність)	5.19	12
16. Поштовх (стійкість)	5.20	13
17. Удар (стійкість)	5.21	14
18. Вібрація синусоїдальна (стійкість)	5.22	15
19. Вібрація синусоїдальна (міцність)	5.23	15
20. Електромагнітна сумісність (ЕМС), випробування на захищеність (стійкість)	5.24	16 а)
Електростатичний розряд		17 а)
Випромінювання електромагнітного поля		18 а)
Кондуктивні перешкоди, зумовлені електромагнітними полями		19 а)
Пачки коротких перехідних імпульсів		20 а)
Повільні кидки напруги великої енергії		
21. Чутливість до пожежі	5.25	21, 22, 23, 24
а) З метою спрощення випробування дозволено використовувати той самий зразок для декількох випробувань з ЕМС. У такому випадку проміжні функціональні випробування на зразках, використовуваних для більш ніж одного випробування, можна виключити, і функціональне випробування можна проводити наприкінці такої серії випробувань. Однак, слід зазначити, що у випадку відмови важко буде визначити, за якого саме випробування відбулася відмова.		

під час пожежі, тощо. Тобто, додаткові похибки газоаналізатора від цих факторів впливу не є визначеними, а похибки, зазначені у технічних параметрах приладу, наприклад від температури, не враховуються у процесі випробувань ПСГ СО, як й інші додаткові похибки. Якщо «де-юре» вважається, що параметри газоаналізатора не залежать від цих факторів, то навіщо проводити випробування ПСГ СО за цими параметрами — адже він «де-факто» і є таким же газоаналізатором. Якщо припустити, що така залежність є, то як можна тоді використовувати газоаналізатор як контрольний прилад? Напевно, спочатку його слід випробувати на фактори, що впливають, визначити додаткові похибки, а потім урахувати ці додаткові похибки під час проведення сертифікаційних випробувань ПСГ. Отже, виникає ряд питань, які не знаходять свого вирішення у прийнятих нормативних документах (НД).

Розглянемо коротенько **вимоги й методи випробувань, закладені в цих стандартах, та їх доцільність**. Почнемо з ISO 7240-8:2007 «Fire detection and alarm systems — Part 8: Carbon monoxide fire detectors using an electro-chemical cell in combination with a heat sensor», а саме, з Плану випробувань — Табл. 1 цього стандарту й основного випробувального устаткування — каналу СО (рис. 1). Необхідно відзначити, що стандарт є чинним і описує випадок мультисенсорного сповісвача СО+тепло. Що стосується тепла, то не розглядатимемо у цій статті вимоги й методи випробувань теплових сповісвачів, оскільки вони є загальноприйнятими.

Перше, що впадає в око, — велика кількість зразків — 24 од. Для порівняння у випадку проведення сертифікаційних випробувань газосигналізаторів метрологами необхідно 3 зразка, а за відмови — подвоєна партія. Тобто усього 9.

Далі, як вже зазначалося, СО поширюється за рахунок хаотичного руху молекул. Навіщо тоді потрібно створювати ламінарний потік у каналі СО? Навіщо проводити випробування чутливості приладу залежно від напрямку потоку? Чи потрібно розміщувати в каналі СО контрольний прилад СО, якщо для випробувань використовувати перевірочні газові суміші (ПГС)? Крім того, за такої конструкції газового каналу необхідна велика кількість ПГС, які, як відомо, є достатньо дорогими.

Стенд (рис. 1) складається з аеродинамічної труби замкнутого типу зі спеціальним пристроєм уведення певної концентрації газів. Концентрація газів, що вводяться, має бути однорідною за всім об'ємом вимірювальної зони. Поперечний переріз аеродинамічної труби має бути не меншим (300×300) мм.

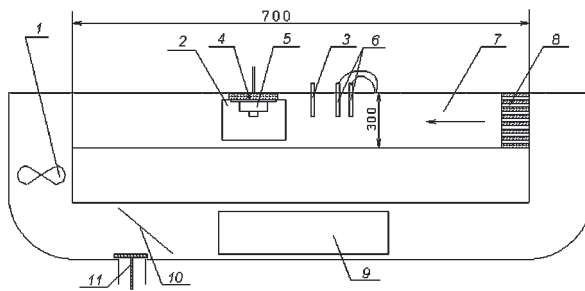


Рис. 1. Стенд «Газовий канал» для вимірювання чутливості ПСГ

Стенд має забезпечувати можливість підтримувати температуру контрольованого середовища від мінус 10 до +55 °С. Довжина його вимірювальної зони має бути не меншою 700 мм. Він має забезпечувати створення швидкості повітряного потоку від  $(0,20 \pm 0,04)$  до  $(1,00 \pm 0,04)$  м/с.

У вимірювальній зоні стенда установлюється випробовуваний ПСГ — 5. Повітряний потік в об'ємі камери створюється за допомогою вентилятора 1. Підтримання температури усередині випробовуваної камери забезпечується електронагрівником і холодильником 9. Спрямовувач 8 призначений для рівномірного розподілу газу за поперечним перерізом й вирівнювання повітряного потоку. Контроль температури здійснюється за допомогою датчика температури 6, встановленого на відстані, що не перевищує 20 мм від випробовуваного ПСГ; швидкості повітряного потоку — за допомогою її вимірювача; концентрації газу — за допомогою газоаналізатора СО. 2 — кришка відсіку для встановлення випробовуваного ПСГ зі скляним оглядовим вікном; 4 — плита з поворотним пристроєм для встановлення випробовуваного ПСГ; 7 — напрямок потоку повітря; 10 — регулятор швидкості потоку повітря; 11 — вентиляційний отвір.

Дійсно, звичайно газовий канал має розміри (1,5×3) м за перерізу самого каналу (0,3—0,5) м<sup>2</sup>. Тобто об'єм каналу становить (2,7 — 4,5) м<sup>3</sup>. Для того, щоб продути канал, необхідний трикратний об'єм, таку конструкцію каналу важко зробити герметичною. Отже, для зняття однієї точки для одного зразка необхідний об'єм ПГС приблизно 15 м<sup>3</sup>. А таких точок близько 100, тобто мінімальна потреба у ПГС окису вуглецю — 1500 м<sup>3</sup>. Відтак необхідним є балон 40 л під тиском 75 атм. А якщо врахувати випробування на перехресну чутливість та компоненти, що виникають під час пожежі, необхідно ще 12 ПГС різних газів (парів).

Зовсім незрозуміло, як у такому каналі проводити випробування на перехресну чутливість за 8-ма газовими компонентами, коли одне випробування

триває 96 год. І це за відсутності повної герметичності каналу.

Тепер розглянемо варіант, коли використовується ПГС значної концентрації, скажімо 0,1 % об. CO, а концентрація спрацьовування (діапазон (25—75) мкл/л) досягається за рахунок повільного збільшення концентрації в каналі зі швидкістю  $(1 \div 6)$  мкл/л · хв<sup>-1</sup>. Швидкість потоку в каналі — 0,2 м/с. Тоді мінімальний час для досягнення концентрації 75 мкл/л складе 12,5 хв за швидкості потоку 0,2 м/с (30 м/хв), і для перерізу каналу 0,09 м<sup>2</sup> отримаємо близько 40 м<sup>3</sup> ПГС. Звичайно, у випадку відносної герметичності каналу й циркуляції ПГС витрата ПГС буде приблизно такою ж — 15 м<sup>3</sup>. У такий спосіб у разі проведення випробувань за ISO 7240-8 необхідне дуже дороге устаткування й величезна кількість ПГС.

Укладачі проекту ГОСТ Р 53325 «Техніка пожежна. Технічні засоби пожежної автоматики. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань» значно спростили методи випробувань (у всякому разі було таке бажання), хоча у ньому багато неточностей (наприклад, що таке швидкість наростання 6 ppm?) і незрозумілих вимог (наприклад, як подавати на ПСГ

концентрацію газу, здатну зумовити спрацьовування ПСГ у кліматичній камері, і яку концентрацію — може кінця діапазону спрацьовування?).

Дійсно, замість 24 зразків маємо 6, замість 21 виду випробувань (табл. 1) — 17, вогневих випробувань теж стало менше (табл. 2). Але, звичайно, основні проблеми залишаються — не обґрунтовано складне випробувальне устаткування й велика кількість ПГС, що спричиняє високу вартість випробування для багатьох виробників цієї продукції.

*Що можна рекомендувати у такій ситуації?* По-перше, спочатку підключати до випробувань метрологів. По-друге, необхідно спростити газовий канал: вилучити спрямовувач (подавання газу на чутливий елемент дифузійне) і газоаналізатор (використовувати ПГС на спрацьовування — 75 ppm і на неспрацьовування — 25 ppm або використовувати оцифратор і атестувати (повірити) у метрологів перед випробуваннями ПСГ — адже він і є по суті газоаналізатором); вилучити датчик температури у випадку, якщо випробовується мультисенсорний сповіщувач CO/тепло, і використовувати вбудований у ПСГ датчик температури й оцифратор; вилучити вентильатор, а ПГС подавати із балона під тиском через

Таблиця 2. Програма сертифікаційних випробувань ПСГ (проект ГОСТ Р 53325)

Найменування випробувань	Номер пункту		Номер зразка сповіщувача					
	Технічні вимоги	Метод випробувань	1	2	3	4	5	6
1. Вогневі випробування	За 4.2.1.4	За додатку А	—	—	+	+	+	+
2. Стабільність	За 4.12.1.2	За 4.12.3.1	+	—	—	—	—	—
3. Залежність значення чутливості від напрямку ПСГ щодо повітряного потоку	За 4.12.1.4	За 4.12.3.2	—	—	+	—	—	—
4. Повторюваність, оптична індикація режимів роботи	За 4.12.1.3, 4.2.5.1	За 4.12.3.3	+	+	+	+	+	+
5. Стійкість до повітряних потоків	За 4.12.1.5	За 4.12.3.4	—	+	—	—	—	—
6. Стійкість до насичення	За 4.13.1.6	За 4.12.3.5	—	—	+	—	—	—
7. Зміна напруги живлення. Стійкість. Пріоритет сигналу спрацьовування*	За 4.2.1.5, 4.2.1.7	За 4.4.1, 4.4.8.2, 4.13.3.6	—	—	—	—	+	—
8. Перевірка рівня звукового тиску сигналу*	За 4.2.1.6	За 4.4.8.1	+	+	+	+	+	+
9. Сухе тепло. Стійкість	За 4.2.2.1	За 4.12.3.7	—	—	—	—	—	+
10. Холод. Стійкість	За 4.2.2.2	За 4.4.2, 4.12.3.8	—	+	—	—	—	—
11. Вологе тепло, постійний режим. Стійкість	За 4.2.2.3	За 4.4.3, 4.12.3.9	—	—	—	—	+	—
12. Прямий механічний удар. Стійкість	За 4.2.2.6	За 4.4.4, 4.12.3.10	—	—	+	—	—	—
13. Синусоїдальна вібрація. Стійкість	За 4.2.2.4	По 4.4.5, 4.12.3.11	—	—	—	+	—	—
14. Електрична міцність	За 4.2.2.7	За 4.4.7	—	—	—	—	+	—
15. Опір ізоляції	За 4.2.2.8	За 4.4.7	—	—	—	—	+	—
16. Електромагнітна сумісність	За 4.2.3	За 4.4.6, 4.12.3.12	—	—	+	—	—	—
17. Пожежна безпека	За 4.2.9.2	За 4.4.9	+	—	—	—	—	—

\* Випробування проводять для сповіщувачів пожежних автономних



ротаметр, — знаючи швидкість витрати ПГС і переріз каналу, можна встановити бажану швидкість потоку в каналі; зменшити поперечний переріз каналу (наприклад, до подвоєного розміру ПСГ) — ламінарний потік газу не потрібен. Після всього цього конструкція каналу значно спроститься, обсяг ПГС, необхідних для випробувань, поменшає до розумних меж (ураховуючи вартість ПГС), а розмір каналу дозволить установлювати його в кліматичну камеру й проводити там температурні випробування — тоді не потрібні обігрівач і холодильник у каналі. Випробування на компоненти, що заважають, й на перехресну чутливість можна проводити в ексикаторі — установити в ексикатор ПСГ, продати його необхідною концентрацією газу, закрити крани ексикатора й витримати в ньому сповіщувач необхідний час.

Під час випробування на чутливість до пожежі можна як контрольний газоаналізатор використовувати повірений (атестований) метрологами той же ПСГ із оцифратором.

У такий спосіб пропонується спростити й здешевити сертифікаційні випробування, зробити їх доступними для виробників цього типу приладів.

Нижче наведено конструкцію розробленого нами газового каналу СО (рис. 2) і результати проведених випробувань зразків пожежних сповіщувачів СО/тепло СПКГТ-01 виробництва ПП «Артон».

Лабораторні випробування такого сповіщувача мультисенсорного проводилися згідно з розробленими у НДІ ЗАТ УжНУ ТУ У 30.5-30150047-031:2012, що поширюються на сповіщувачі пожежні комбіновані газові і теплові, призначені для попередження пожеж на ранніх стадіях, видавання світлово-

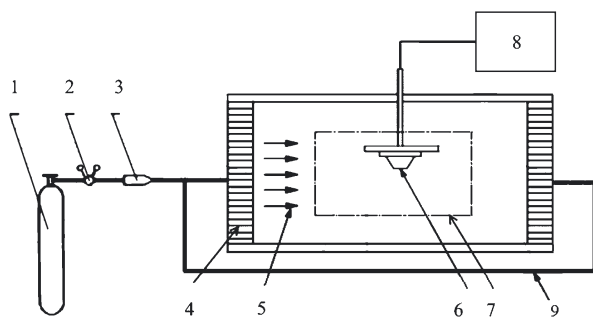


Рис. 2. Газова випробувальна камера, робоча секція, вид збоку:

- 1 — балон з ПГС; 2 — вентиль тонкого регулювання; 3 — ротаметр РМ-А-0,1г УЗ; 4 — спрямовувач; 5 — повітряний потік; 6 — випробовуваний (-і) сповіщувач (-і); 7 — робочий об'єм; 8 — оцифратор сигналу сповіщувача; 9 — обвідний канал

Таблиця 3. Основні параметри та розміри сповіщувача

Назва параметра та розміри	Норма
1. Номінальна напруга живлення, В	12,6
2. Споживана потужність у робочому режимі, Вт, не більше	0,5
3. Ступінь захисту оболонки згідно з ГОСТ 14254	IP 30
4. Габаритні розміри, мм, не більше	
▪ діаметр	100
▪ висота	55
5. Маса, кг, не більше	0,3

го сигналу, а також комутацію зовнішніх електричних кіл, за досягнення встановлених порогових значень об'ємної частки окису вуглецю (чадного газу) та температури. Перевірка теплових параметрів проводилася на базі ПП «Артон», методи теплових випробувань є загальноприйнятими, тому результати теплових випробувань тут не приводяться, хоча вони й були успішними.

Основні параметри та розміри сповіщувача наведено у табл. 3, зовнішній вид — на рис. 3.

Перевірка часу спрацювання за СО (п. 5.2 ТУ СПКГТ-01) (швидкість зростання концентрації 6 мкл/л · хв<sup>-1</sup>; поріг спрацювання  $S = 50$  мкл/л)

Сповіщувач встановлювався (у каналі для СО) у його нормальному робочому положенні за допомогою звичайних засобів кріплення. Щодо напрямку повітряного потоку він встановлювався у положенні, в якому під час випробувань залежності від напрямку фіксувалася найменша чутливість. Перед кожним вимірюванням канал СО провітрювався, аби гарантувати, що канал і зразок є вільними від СО і концентрація СО у каналі  $\leq 1$  мкл/л. Швидкість повітряного потоку поблизу сповіщувача під час вимірювань —  $(0,2 \pm 0,04)$  м/с. Температура повітря у каналі —  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$  під час проведення усіх вимірювань для сповіщувачів і не змінювалася більше, ніж на  $5^\circ\text{C}$ . Сповіщувач приєднувався до його блока живлення й оцифратора для контролю наростання концентрації СО і стабілізувався протягом, як мінімум, 15 хв. Окис вуглецю вводився у канал у такий спосіб, щоб швидкість зростання концентрації СО була приблизно 6 мкл/л · хв<sup>-1</sup>, доки взірець не перейде у стан спрацювання. Випробування припинялося, коли концентрація СО досягала рівня 100 мкл/л.

Концентрація СО знімалася у момент подання сповіщувачем сигналу тривоги. Її взято як величину порогу спрацювання СО:  $S$ . Величину часу спрацювання за СО оцінено як час, витрачений від

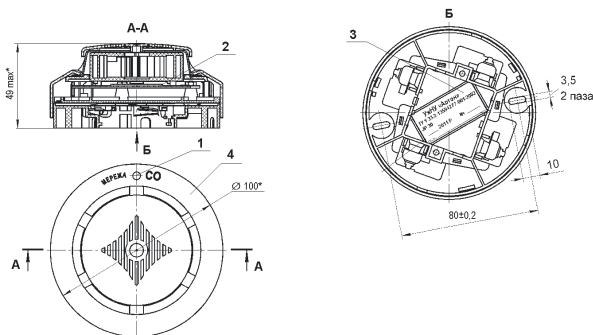


Рис. 3. Сповіслювач СПКГТ-01:

- 1 — світлодіод, 2 — плата МЦІ 301411.015,  
3 — піддон МЦІ 711431.032,  
4 — кришка МЦІ 725325.025

Таблиця 4

Вимоги ТУ	Результати випробувань	Висновки
< 12 хв	8 хв 2 с	Відпов.

початку зростання концентрації CO до точки, у якій сповіслювач видає сигнал тривоги. Вимірену величину часу спрацювання записано як TCO.

**Вимоги:** Результати перевірки є позитивними, якщо час спрацювання сповіслювача за CO у межах від 25 до 75 мкл/л — не більший 12 хв (за швидкості наростання концентрації CO 6 мкл/л · хв<sup>-1</sup>). Результати випробувань наведено у табл. 4.

**Перевірка повторності (CO)** (п. 5.4 ТУ СПКГТ-01)

Значення порогу спрацювання сповіслювача CO вимірювалося шість разів відповідно до п. 5.2 цих ТУ. Положення сповіслювача щодо напрямку повітряного потоку — довільне, але залишалося однаковим під час проведення усіх шести вимірювань. Максимальне вимірене значення порогу спрацювання позначено як  $S_{max}$ , а мінімальне —  $S_{min}$ . Результати перевірки є позитивними, якщо чутливість сповіслювача за CO залишається постійною і відповідає таким **вимогам**: чутливість сповіслювачів залишається постійною навіть після великої кількості спрацювань; мінімальне значення порогу спрацювання,  $S_{min}$ , має бути не меншим за 25 мкл/л; співвідношення  $S_{max} / S_{min}$  не має бути більшим 1,6. Результати випробувань наведено у табл. 5.

**Перевірка залежності від напрямку (CO)** (п. 5.5 ТУ СПКГТ-01)

Значення порогу спрацювання випробовуваного зразка вимірювалося вісім разів відповідно до п. 5.3 цих ТУ. Зразок повертався після кожного вимірювання на 45° навколо його вертикальної

осі так, щоб вимірені значення відповідали вісьмом різним положенням стосовно напрямку повітряного потоку. Максимальне вимірене значення порогу спрацювання CO позначалося як  $S_{max}$ , а мінімальне —  $S_{min}$ . Обидва положення, у яких були вимірені максимальне і мінімальне значення порогу спрацювання, фіксувалися.

Під час подальших випробувань положення, у якому було вимірене максимальне значення порогу спрацювання, позначалося як положення з найменшою чутливістю, а положення з мінімальним значенням порогу — як положення з найбільшою чутливістю.

**Вимоги:** Чутливість сповіслювачів CO не має залежати надмірно від напрямку потоку повітря навколо сповіслювачів. Мінімальне значення порогу спрацювання,  $S_{min}$ , має бути не меншим, ніж 25 мкл/л. Співвідношення  $S_{max} / S_{min}$  не має бути більшим 1,6. Результати випробувань наведено у табл. 6.

Таблиця 5

№ випробування	Поріг спрацювання CO (мкл/л)
1	48
2	48
3	48
4	48
5	49
6	48

	Вимоги ТУ	Результати випробувань	Висновки
$S_{min}$	$\geq 25$ мкл/л	48 мкл/л	Відпов.
$S_{max}$		49 мкл/л	
$S_{max} : S_{min}$	$\leq 1,6$	1,02	Відпов.

Таблиця 6

Положення сповіслювача відносно вертикальної осі	Поріг спрацювання CO
0°	48 мкл/л
90°	49 мкл/л
180°	48 мкл/л
270°	48 мкл/л

	Вимоги ТУ	Результати випробувань	Висновки
$S_{min}$	$\geq 25$ мкл/л	48 мкл/л	Відпов.
$S_{max}$		49 мкл/л	
$S_{max} : S_{min}$	$< 1,6$	1,02	Відпов.

Таблиця 7

№ зразка	Поріг спрацьовування CO (мкл/л)
1	46
2	48
3	48
4	48
5	49

	Вимоги ТУ	Результати випробувань	Висновки
$S_{\min}$	$\geq 25$ мкл/л	46 мкл/л	Відпов.
$S_{\max}$		49 мкл/л	
$\hat{S}$		47,8 мкл/л	
$S_{\max} / \hat{S}$	$\leq 1,33$	1,025	Відпов.
$\hat{S} / S_{\min}$	$\leq 1,5$	1,04	Відпов.

#### Перевірка відтворюваності (CO) (п. 5.8 ТУ СПКГТ-01)

Значення порогу спрацьовування кожного із випробовуваних сповіщувачів вимірювалося відповідно до п. 5.2 цих ТУ. Середнє арифметичне отриманих значень порогу спрацьовування CO, позначалося як  $\hat{S}$ . Максимальне вимірене значення порогу спрацьовування позначалося як  $S_{\max}$ , мінімальне —  $S_{\min}$ .

**Вимоги:** Чутливість сповіщувачів не має відрізнятися надмірно від зразка до зразка. Мінімальне значення порогу спрацьовування,  $S_{\min}$ , має бути не меншим за 25 мкл/л. Співвідношення  $S_{\max}/\hat{S}$  не має перевищувати 1,33, а співвідношення  $\hat{S}/S_{\min}$  — 1,5. Результати випробувань наведено у табл. 7.

#### Перевірка перехресної чутливості (п. 5.10 ТУ СПКГТ-01)

Перед початком випробування сповіщувач встановлювався у випробувальну газову камеру в нормальному робочому положенні за допомогою стандартних засобів кріплення. Перед початком кожного випробування випробувальна газова камера провітрювалася так, щоб перед початком кожного випробування концентрація окису вуглецю і випробувального газу була меншою від 1 мкл/л. Швидкість повітря поблизу взірця —  $(0,2 \pm 0,04)$  м/с протягом усього вимірювання. Температура повітря у каналі —  $(23 \pm 5)$  °C і не змінювалася більше, ніж на 5 K протягом усього вимірювання сповіщувача.

Сповіщувач з'єднувався з устаткуванням електроживлення і контролювання відповідно до ТУ, взірець стабілізувався протягом не менше 15 хв. Уводився певний газ у газову випробувальну камеру, щоб його концентрація досягала встановленого

значення у межах 10 хв (табл. 8). Сповіщувач стабілізувався протягом 1 год за досягнутої концентрації газу. Перехресна чутливість визначалася за умови найчутливішого положення у випадках, коли поріг спрацьовування було встановлено.

**Вимоги:** Сповіщувачі мають протистояти впливу забруднювачів атмосфери або хімічних компонентів, які можуть бути присутніми у процесі експлуатації. Сповіщувачі не мають видавати сигналу тривоги чи несправності; не мають видавати ні сигналу тривоги, ні сигналу помилки під час випробувань, коли повітря є вільним від CO.

Проведено дослідження впливу парів спирту та аміаку на показання ПГС і встановлено, що ці речовини практично не впливають на роботу ПГС СПКГТ-01. Результати випробувань наведено у табл. 9.

#### Перевірка стійкості до насичення (п. 5.17 ТУ СПКГТ-01)

Сповіщувач встановлювався у його нормальному положенні у випробувальну газову камеру і закріплювався за допомогою стандартних засобів кріплення. Орієнтація сповіщувача відносно напрямку повітряного потоку була з найменшою чутливістю, що визначається під час випробувань на залежність від напрямку повітряного потоку.

Перед початком кожного випробування випробувальна газова камера провітрювалася, аби гарантувати,

Таблиця 8. Концентрація газів і парів

Впливання	Хімічний компонент	Концентрація $\mu$ l/l	Час впливання (год)	Час відновлення (год)
1	Оксид вуглецю	$15 \pm 10$ %	24	1—2
2	Диоксид азоту	$5 \pm 10$ %	96	1—2
3	Диоксид сірки	$5 \pm 10$ %	96	1—2
4	Хлор	$2 \pm 10$ %	96	1—2
5	Аміак	$50 \pm 10$ %	1	1—2
6	Гептан	$100 \pm 10$ %	1	1—2
7	Етанол	$500 \pm 10$ %	1	24—25
8	Ацетон	$1500 \pm 10$ %	1	24—25

Таблиця 9

Хімічний компонент	Концентраційний вплив, мкл/л	Відповідність ТУ
$C_2H_5OH$	10	Відпов.
$NH_3$	10	Відпов.

що концентрація окису вуглецю є меншою від 1 мкл/л перед кожним випробуванням. Швидкість повітря поблизу сповіщувача —  $(0,2 \pm 0,04)$  м/с протягом усього вимірювання. Температура повітря у тунелі —  $(23 \pm 5)$  °С і не змінювалася більше, ніж на 5 К протягом усього випробування. Сповіщувач з'єднувався з устаткуванням електроживлення і контролювання згідно з ТУ і стабілізувався протягом не менше 15 хв.

Окис вуглецю вводився у газову випробувальну камеру так, щоб швидкість наростання концентрації була 50 мкл/л/хв до досягнення значення концентрації 500 мкл/л. Ця концентрація підтримувалася протягом 2 год. Після впливання сповіщувач відновлювався за стандартних робочих умов протягом 4 год, і вимірювалося значення порогу спрацьовування CO згідно з п. 5.2 цих ТУ. Більші зі значень порогу спрацьовування CO, вимічених у цьому випробуванні та у випробуванні на відтворюваність цього самого сповіщувача, позначалися як  $S_{\max}$ , а менші — як  $S_{\min}$ .

**Вимоги:** Сповіщувачі мають протистояти впливу високих концентрацій моноокису вуглецю, які виникають під час пожежі. Сповіщувачі мають бути у режимі спрацьовування під час впливання і генерувати сигнал тривоги протягом приблизно 1 хв після того, як будуть встановлені за стандартних робочих умов наприкінці періоду впливання. Найнижче значення порогу спрацьовування  $S_{\min}$  не має бути меншим за 25 мкл/л. Співвідношення  $S_{\max} / S_{\min}$  не має перевищувати 1,6.

Результати випробувань наведено у табл. 10.

**Перевірка довготермінової стабільності (CO)** (п. 5.11 ТУ СПКГТ-01)

Чотири сповіщувачі з'єднувалися з відповідним устаткуванням живлення й контролю відповідно до цих ТУ і розміщувалися на 84 дні у приміщенні, вільному від CO й атмосферних забруднювачів. Значення порогу спрацьовування CO знімалися, як описано у п. 5.2 цих ТУ, на 28, 56 і 84 дні від початку випробування. Найбільші із величин, вимірені у цьому випробуванні й для того ж самого сповіщувача у випробуваннях на відтворюваність, зафіксовані як  $S_{\max}$ , найменші — як  $S_{\min}$ .

**Вимоги:** Поріг спрацьовування сповіщувачів не має змінюватися протягом тривалого періоду часу. Найнижче значення порогу спрацьовування  $S_{\min}$  не має бути меншим за 25 мкл/л. Співвідношення  $S_{\max} / S_{\min}$  не має бути більшим 1,6. Результати випробувань наведено у табл. 11.

Отже, проведені випробування ПСГ на такі фактори, як напрямок повітряного потоку, його швид-

Таблиця 10

	Вимоги ТУ	Результати випробувань	Висновки
$S_{\min}$		48 мкл/л	
$S_{\max}$		49 мкл/л	
$S_{\max} / S_{\min}$	$\leq 1,6$	1,02	Відпов.

Таблиця 11

№ зразка	S (мкл/л)		
	28 день	56 день	84 день
1	49	50	49
2	47	48	48
3	50	48	48
4	49	47	48

	Вимоги ТУ	Результати випробувань	Висновки
$S_{\min}$	$\geq 25$ мкл/л	47 мкл/л	Відпов.
$S_{\max}$		50 мкл/л	
$S_{\max} / S_{\min}$	$\leq 1,6$	1,06	Відпов.

кість, ламінарність, показали, що вони не впливають суттєво на поріг спрацьовування ПСГ. Методика проведення інших типів випробувань аналогічна тим, які проводяться у випадку газосигналізаторів.

Далі розглянемо **розрахункові моделі процесів дифузії CO** [2], які теж підтверджують відсутність необхідності включати до переліку випробувань залежність показань ПСГ від напрямку і швидкості (у розумних межах) повітряного потоку.

У чинних НД закладено спрощену методику, яка не враховує динаміки поширення концентрації газу для ПСГ. Нині за широкого використання обчислювальної техніки можна отримати реальну картину тепломасообміну в приміщенні, у реальному часі, тривимірному просторі, і легко моделювати будь-які аварійні ситуації. На підставі таких розрахунків можна раціонально розміщувати ПСГ.

Для розрахунку дифузії CO у кімнаті, де рух повітря зумовлено природною конвекцією, використано програмний комплекс «FLOW-3D». Розміри кімнати  $(6 \times 4,5 \times 3)$  м. Газ, що дифундує, подається з отвору в центрі підлоги розмірами  $(0,5 \times 0,5)$  м. Подавання газу здійснюється шляхом завдання швидкості газу через отвір. Джерело тепла задається нагрітою до температури 65 °С ділянкою стіни (імітація радіатора опалення), при цьому стік тепла здійснюється на протилежній стінці, на якій граничною умовою є температура 15 °С. Коефіцієнт теплообміну задається з одновимірного розрахунку конвекції



біля вертикальної поверхні. На решті стінок задаються адіабатичні умови.

У процесі розрахунку вирішувалися повні усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса для двокомпонентної суміші повітря — уведений газ у тривимірному просторі. У феноменологічній теорії кожний рухомий об'єм розглядається як єдине фізичне тіло з певними фізико-механічними характеристиками.

Використовувалася RNG модель турбулентності, а не стандартна, оскільки остання дає завищені значення турбулентної в'язкості в областях з низькими швидкостями і, як наслідок, — завищену швидкість дифузії. У процесі розрахунку дифузії у рамках такої розрахункової програми використовується потрійна аналогія Рейнольдса, тобто коефіцієнт дифузії дорівнює добутку динамічної в'язкості на число Шмідта. Це наближення добре описує лише турбулентну дифузію з розвинутою турбулентністю, а молекулярну дифузію — наближено.

Розрахунок проводився у три етапи:

1. Розраховувався конвективний рух повітря у кімнаті до стаціонарного стану. Це займало близько 20 хв фізичного часу і кілька годин розрахункового (комп'ютерного).

2. Розраховувалося введення газу протягом 10 с фізичного часу. При цьому швидкість газу в отворі лінійно зростала від 0 до 0,04 м/с протягом 5 с, а потім лінійно спадала до 0 протягом наступних 5 с. У такий спосіб у кімнату протягом 10 с вводилося 0,05 м<sup>3</sup> газу.

3. Уведення газу припинялося. Розраховувалися подальша дифузія і конвекція уведеного газу протягом 20 хв фізичного часу.

Як видно (рис. 4), дифузійне поширення сигнальних концентрацій чадного газу відбувається достатньо швидко навіть за відсутності конвекційних потоків від фактора пожежі. У стандарті ж запропонована швидкість подавання газу на ПСГ 0,2 м/с. Таку швидкість повітряного потоку в закритому приміщенні можна досягти у випадку, коли є значні перепади температури — пожежа розвинулася і є значні конвекційні потоки. Тобто у випадку, коли ПСГ СО вже не є ефективними. Отже, немає необхідності створювати ламінарний потік зі швидкістю 0,2 м/с для перевірки характеристик зразка, як і досліджувати залежність показань від напрямку цього потоку.

Наприкінці наголосимо на перевагах і недоліках ПСГ СО і наведемо рекомендації стосовно їх установлення.

1. На початкових стадіях більшості пожеж, якщо розвиток пожежі є повільним, матеріал тліє

або жевріє, реєструються достатньо високі рівні монооксиду вуглецю. За переходу пожежі до стадії відкритого полум'я рівень концентрації СО спадає. Найефективніше виявляється перевага ПСГ перед іншими відомими засобами виявлення загоряння тоді, коли через малий доступ кисню пожежа розвивається повільно й підвищення концентрації чадного газу стає переважаючим фактором для її класифікації.

2. За повного згоряння матеріалів, що містять вуглець, або у випадку швидкого розвитку пожежі за достатньої концентрації кисню спостерігаються звичайно низькі рівні чадного газу, оскільки відбувається процес повного згоряння й виділяються пари води і СО<sub>2</sub>. За розвитку пожежі у закритих приміщеннях доступу повітря може бути недостатньо для продовження пожежі, при цьому відбувається вигорання кисню у повітрі, концентрація СО збільшується.

3. Порівняно з димовими сповіщувачами ПСГ СО додатково виграє у швидкодії з появою теплових конвекційних потоків у разі виникнення пожежі. Ці потоки допомагають СО швидше поширюватися й досягати чутливого елемента детектора. Як відзначалося

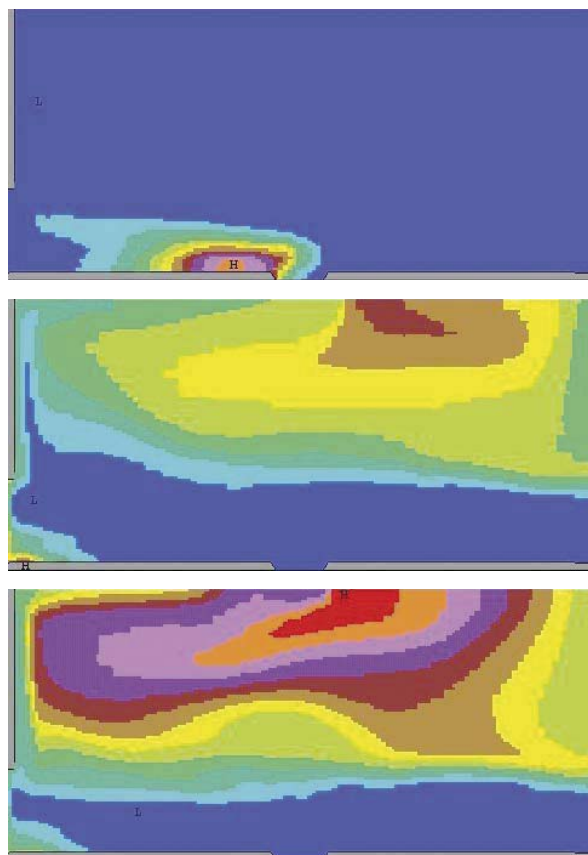


Рис. 4. Динаміка фронту концентрації СО у разі подавання газу в центрі закритого приміщення (у зоні L концентрація 20 ppm, H — 90 ppm) через 3, 10, 15 хв

раніше, монооксид вуглецю має питому густину, близьку до густини повітря, розміри молекул газу є значно меншими від розмірів частинок диму, що у результаті призводить до інтенсивнішого процесу дифузії, й цей газ швидше розсіюється у межах об'єму, що захищається, ніж складові диму, які реєструються оптичними СПД. Це дозволяє ПСГ СО працювати ефективніше у місцях, де є присутність фізичних бар'єрів, балок, перегородок, які обмежують поширення диму (прикладом таких бар'єрів є стелі зі значними перепадами за висотою, підвісні стелі, переміщення газу в суміжні приміщення й гарячі повітряні потоки).

4. Слід зазначити, що застосування ПСГ СО може призводити до раннього виявлення пожежі не лише у контрольованому приміщенні, але й у суміжних приміщеннях. Спрацювання сповісвача у цьому випадку може сприйнятися обслуговуючим персоналом як неправильне, оскільки не точно виконується ідентифікація вогнища пожежі. Для урахування такої особливості необхідно інформувати проектні, монтажні й експлуатаційні організації стосовно властивості поширення монооксиду вуглецю.

5. ПСГ СО рекомендується розміщувати за правилами розміщення точкових димових сповісвачів. Під час розміщення сповісвача можна не враховувати обмеження, пов'язані з наявністю будівельних конструкцій (балок, прогонів, ребер плит тощо), оскільки на поширення чадного газу суттєво впливає процес дифузії. Наприклад, для захисту гаражів і гаражних боксів рекомендується встановлювати ПСГ на стіни на рівні близько 5 м у гаражних боксах з висотою стелі 5—6 м. Використання правил, заснованих на процесах конвекції за переміщення диму, дає для ПСГ приріст у швидкодії виявлення загоряння, зумовлюваний перевагами газового дифузійного процесу. На один бокс розмірами (11,5×17,94) м у середньому рекомендується встановлювати 6 ПСГ СО. Додатково рекомендується використання комбінації різних типів ПС, наприклад, газового й теплового. За використання ПСГ як сигналізаторів чадного газу, наприклад, у спальних приміщеннях для збільшення рівня безпеки рекомендується їхнє двоярусне розміщення за висотою

Таблиця 12

Висота приміщення, що захищається, м	Середня площа, контрольована одним ПС, м²	Максимальна відстань, м	
		між ПС	від стіни до ПС
до 3,5	до 95	9,0	4,5
від 3,5 до 6,0	до 70	8,5	4,0
від 6,0 до 10,0	до 65	8,0	4,0
від 10,5 до 12,0	до 55	7,5	3,5


приміщення, що захищається на рівні стелі й на висоті середнього людського росту (органів дихання).

6. Контрольована площа встановлюється згідно з табл. 12.

### ВИСНОВКИ

Отже, ПСГ з каналом СО є приладами, які гарантують виявлення пожежі на початкових стадіях її розвитку. Методи випробувань ПСГ є необґрунтовано складними, й їх слід максимально наблизити до методів випробувань інших типів приладів газового аналізу — газоаналізаторів, газосигналізаторів. Крім того, технічні параметри ПСГ дають можливість їх використання для виявлення загазованості приміщень токсичними, пожежонебезпечними газами і парами для запобігання отруєнню людей, покращання пожежної безпеки приміщень. Тобто, ПСГ є фактично приладами подвійного призначення, й їх додаткова сертифікація як газосигналізаторів дасть можливість замість двох приладів (ПС і газосигналізаторів) встановлювати один — ПСГ, що дає додатковий економічний ефект.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Неплохов И. Г. Выбор извещателя в зависимости от типа помещений и условий эксплуатации // Технологии защиты. — 2012. — № 4—6. — С. 5—12.
2. Федоров А. В., Членов А. Н., Лукьяненко А. А., Буцынская Т. А., Демехин Ф. В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара. — Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2009. — 158 с. 

## ДО 55-РІЧЧЯ ОЛЕГА МИКОЛАЙОВИЧА ВЕЛИЧКА

**12** червня 2013 року виповнилося 55 років доктору технічних наук, професору, директору науково-виробничого інституту Державного підприємства «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт») **Олегу Миколайовичу Величку**, Заслуженому метрологу COOMET, Заслуженому діячеві науки і техніки України.

Закінчивши у 1980 році Харківський інститут радіоелектроніки за спеціальністю радіотехніка, О. М. Величко дев'ять років працював інженером, старшим інженером, інженером I-ї категорії у науково-дослідних відділах Київського науково-дослідного інституту радіовиміральної апаратури Виробничого об'єднання ім. С. П. Корольова, потім ще три — провідним інженером і старшим науковим співробітником Спеціального конструкторського бюро товарів народного вжитку «Меридіан» цього ж об'єднання.

У 1990 році в Інституті електродинаміки Академії наук України захистив кандидатську дисертацію з питань прецизійних вимірювань електричних сигналів. У 1998 році йому присвоєно вчене звання старшого наукового співробітника зі спеціальності «Стандартизація та сертифікація», а через рік — доцента кафедри метрологічного забезпечення електричних і радіотехнічних засобів вимірювань. У 1992—1996 роках Олег Миколайович — начальник відділу Українського науково-дослідного інституту стандартизації, сертифікації та інформатики Держстандарту України, у 1996—2000 — заступник Голови Держстандарту України з питань метрології, державний службовець 3 рангу. На цих посадах завжди був і залишається до сьогодні ініціатором та активним учасником розроблення законодавчих, нормативно-правових, організаційно-методичних документів з питань метрології.

Із 2003 року Олег Миколайович працює директором Науково-виробничого інституту метрологічного забезпечення вимірювань електромагнітних величин ДП «Укрметртестстандарт». За його ініціативи на підприємстві започатковано проведення нового виду метрологічної роботи — атестації програмного забезпечення сучасних засобів виміральної техніки (ЗВТ), розроблення організаційно-технічних систем дистанційного калібрування ЗВТ у сфері вимірювання електромагнітних величин. Під його керівництвом створено три системи, які пройшли практичну апробацію, зокрема, на великих дистанціях (канал Київ, Україна—Томськ, Російська Федерація); проводяться спільні наукові дослідження з Національним дослідницьким Томським політехнічним університетом зі створення новітніх ЗВТ у цій сфері вимірювання. Він є керівником науково-дослідної роботи щодо звірення державних еталонів, які зберігаються у ДП «Укрметртестстандарт». Уже організовано проведення майже десяти ключових і додаткових звірень COOMET і EURAMET державних еталонів у сфері електромагнітних величин, які зберігаються в ДП «Укрметртестстандарт».

Під його керівництвом і за його безпосередньої участі підготовлено й успішно пройдено міжрегіональну експертизу 34 рядків таблиць калібрувальних і вимірювальних можливостей (СМС) ДП «Укрметртестстандарт» у сфері електрики і магнетизму, які опубліковані на сайті Міжнародного бюро з мір і вагів (BIPM) у спеціальній базі даних ключових звірень (KCDB BIPM). Це дозволило отримати міжнародне визнання шести вітчизняних державних еталонів одиниць електричних величин. Як експертом регіональної метрологічної організації (РМО) COOMET у сфері електрики і магнетизму ним здійснюються міжрегіональні експертизи СМС-таблиць країн-членів РМО EURAMET, APMP, SIM.

Із 1996 року О. М. Величко є членом Науково-технічної комісії з метрології при Держстандарті України, а нині при Мінекономрозвитку України. У 1996—2000 роках був членом Комітету від України Організації метрологічних закладів країн Східної та Центральної Європи (COOMET). Брав участь у складі офіційних делегацій від України у 12-й Міжнародній конференції законодавчої метрології (OIML) та 23-й Генеральній конференції з мір і вагів (CGPM), низці засідань Науково-технічної комісії з метрології Міждержавної ради з питань стандартизації, метрології та сертифікації, Технічного комітету 1.3 «Електрика і магнетизм» COOMET. Є членом спеціалізованих вчених рад із захисту докторських і кандидатських дисертацій за спеціальністю «Стандартизація, сертифікація і метрологічне забезпечення» при Київському національному університеті технологій та дизайну та Одеській державній академії технічного регулювання та якості; редакційних колегій наукових журналів «Метрологія та прилади» та «Український метрологічний журнал».

У 2007 році О. М. Величко захистив докторську дисертацію з питань теорії та практики оптимізації багаторівневої системи стандартизації національного рівня у галузі метрології за спеціальністю «Стандартизація та сертифікація», у 2012 йому присвоєно вчене звання професора кафедри виміральної техніки.

Олег Миколайович є автором (співавтором) понад 350 наукових праць, у тому числі 25 винаходів, 20 державних (національних) стандартів і класифікаторів України, 40 навчальних і довідкових посібників, монографій з питань стандартизації, метрології, контролю якості продукції, екологічного управління, моніторингу довкілля. Більше 90 його робіт надруковано у провідних наукових виданнях майже 30 зарубіжних країн.

Біографію О. М. Величка включено до останніх двох видань «Хто є хто у науці і техніці» («Who's Who in Science and Engineering», Marquis) та п'яти видань «Хто є хто у світі» («Who's Who in the World», Marquis), опублікованих у США.

За свою багаторічну плідну працю ювіляр нагороджений нагрудним знаком Держстандарту України «За заслуги в стандартизації, метрології, сертифікації та акредитації», Почесним знаком Міждержавної ради з питань стандартизації, метрології та сертифікації «За заслуги», Почесною грамотою Кабінету Міністрів України, удостоєний почесних звань «Заслуженого діяча науки і техніки України», «Заслуженого метролога COOMET».



*Колектив ДП «Укрметртестстандарт», редакція і редколегія журналу «Метрологія та прилади» щиро вітають Олега Миколайовича Величка з 55-річчям!*

*Бажають йому міцного здоров'я, щастя, злагоди й насаги для нових трудових звершень!*

## 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 із сертифікатом ДП «УкрНДНЦ», що засвідчує підвищення кваліфікації фахівців.

## План набору слухачів на II півріччя 2013 року

Ч/ч	Курс	Період навчання
	1. Підвищення кваліфікації фахівців повірочних та калібрувальних лабораторій з повірки та калібрування засобів вимірювальної техніки:	
1.1	геометричних величин	09.12 — 20.12
1.1.1	колієвимірювальних шаблонів	у міру комплектування, 1 тиждень
1.1.2	спеціалізованих засобів вимірювань геометричних величин на залізничному транспорті	у міру комплектування, 1 тиждень
1.2	механічних величин	у міру комплектування, 1 тиждень
1.2.1	маси	у міру комплектування, 1 тиждень
1.3.	маси, об'єму, місткості	01.07 — 12.07
1.3.1	маси, об'єму, місткості та витрати	01.07 — 12.07
1.3.2	об'єму, місткості	01.07 — 05.07
1.4	температури, тиску, витрати	11.11 — 22.11
1.4.1	температури, тиску	11.11 — 22.11
1.5	електричних величин	30.09. — 11.10
1.5.1	електричних величин на залізничному транспорті	у міру комплектування, 1 тиждень
1.6	радіотехнічних величин	30.09 — 11.10
1.6.1	радіотехнічних величин на залізничному транспорті	у міру комплектування, 1 тиждень
	2. Підвищення кваліфікації фахівців за курсами:	
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві	14.10 — 25.10
2.1.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві (для метрологів з досвідом роботи)	23.09 — 27.09
2.2	Метрологічна експертиза технічної документації	14.10 — 25.10
2.3	Забезпечення єдності вимірювань при проведенні контролю колісних транспортних засобів	у міру комплектування, 1 тиждень
2.3.1	Забезпечення єдності вимірювання димності відпрацьованих газів двигунів автомобілів згідно з ДСТУ 4276:2004	14.10 — 18.10; 28.10 — 01.11
2.4	Розробка та атестація методик виконання вимірювань. Оцінка невизначеності вимірювань	14.10 — 18.10; 28.10 — 01.11; 04.11 — 08.11
2.5	Забезпечення єдності вимірювань в калібрувальних та вимірювальних лабораторіях	14.10 — 18.10
2.6	Забезпечення єдності вимірювань в закладах охорони здоров'я	у міру комплектування, 1 тиждень
2.9	Забезпечення відповідності калібрувальних та вимірювальних лабораторій критеріям атестації в ДМС, підготовка до атестації	14.10–18.10
2.10	Розробка і впровадження систем управління якістю	28.10 — 01.11
2.11	Забезпечення функціонування систем управління якістю та проведення внутрішнього аудиту	28.10 — 01.11
2.13	Проведення вимірювань та випробувань електротехнічними лабораторіями	25.11 — 29.11; 02.12 — 06.12
2.14	Державний ринковий нагляд	у міру комплектування, 1 тиждень
2.15	Вимоги до калібрувальних та випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Внутрішній аудит в лабораторіях	04.11 — 08.11
2.16	Забезпечення єдності вимірювання та обліку витрат енергоносіїв	25.11 — 29.11
2.17	Забезпечення єдності вимірювань ВК ВІС та АСК ТП	01.07 — 12.07; 14.10 — 25.10
2.18	Внутрішній аудит в лабораторіях за ДСТУ ISO/IEC 17025:2006	04.11 — 08.11
2.19	Тепловізійні вимірювання. Тепловізійні методи контролю і діагностика	25.11 — 29.11; 02.12 — 06.12
	3. Підвищення кваліфікації фахівців на базі підприємства-замовника:	
3.1	За заявкою підприємства	за узгодженням
	4. Проведення тематичних семінарів:	
4.1	За заявкою підприємства	за узгодженням

Заявки на навчання надсилати на адресу Харківської філії ДП «УкрНДНЦ» або факсом. **Комплектування додаткових груп проводиться на замовлення підприємств.** За вимогою підприємств надсилаємо інформаційні листи з тематикою окремих курсів навчання.

Харківська філія ДП «УкрНДНЦ» співпрацює з Органом з сертифікації персоналу калібрувальних та вимірювальних лабораторій. Випускники Харківської філії ДП «УкрНДНЦ» мають можливість додатково отримати сертифікати компетентності фахівців, які визнають під час акредитації лабораторій.