

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



та прилади

№ 3(53), 2015

Науково-виробничий журнал

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

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

Засновники:

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

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

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Гінзбург М. Д., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Домницький Р. А.
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Косач Н. І., д. т. н., с. н. с.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Неежмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., 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. Т., к. т. н., доц.
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

Редакційна група:

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

Журнал **рекомендовано до друку**
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №6 від 03.07.2015)

Видавник ВКФ «Фавор»

Адреса редакції:

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

Підписано до друку 04.07.2015.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 500 прим.
Замовлення № 15.

© «Метрологія та прилади», 2015

Всесвітній День Метрології 2015 метрологи всього світу
відзначили, традиційно пов'язуючи його з глобальними
проблемами людства.

У поточному році темою свята стало «Вимірювання та
світло». У попередні роки такими темами були «Вимірювання
та глобальна енергетична проблема», «Вимірювання
у повсякденному житті», «Ми вимірюємо для вашої безпеки»,
«Хімічні вимірювання для нашого життя, нашого майбутнього»,
«Вимірювання у науці й техніці... міст до інновацій»,
«Вимірювання у торгівлі» тощо.

Святкуючи щороку в такому зв'язку, метрологи звертають
увагу фахівців, можновладців, простих громадян різних країн
на ту важливу роль, яку відіграє метрологія в науці й техніці,
у всіх галузях промисловості та сільського господарства,
в повсякденному житті людей. Разом з тим вони демонструють,
як найкращі досягнення у зазначених напрямках стимулюють
прогрес у метрології, стають основою новітніх вимірювальних
технологій.

Зв'язок метрології з розумним життям склався історич-
но. Можна не сумніватися, що він підтримуватиметься
і в майбутньому.

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

Вітальні послання директорів Міжнародних бюро з мір і вагів Мартіна Мілтона та законодавчої метрології Стівена Паторея з нагоди Всесвітнього дня метрології 2015
Вимірювання та світло 3

Левбарг О.

Засідання Генеральної асамблеї Eurachem 4

МІЖНАРОДНІ ЗВІРЕННЯ ЕТАЛОНІВ

Величко О., Карпенко С., Гачок В.

Міжнародні звірення в рамках КООМЕТ національних еталонів одиниці електричної потужності на промисловій частоті 6

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ

Воробіов Л., Декуша Л., Грищенко Т., Ковтун С., Шмаров Є.

Уточнений розрахунок чутливості

термоелектричних перетворювачів теплового потоку 13

Шабашкевич Б., Добровольський Ю., Юр'єв В.

Метрологічний комплекс для повірки і градування оптоелектронних приладів у видимому діапазоні спектра 18

ВИМІРЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ

Чеберячко С., Радчук Д., Яворська О.

Визначення розмірів вибірки для проведення лабораторних випробувань фільтрувальних півмасок 24

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Руженцев І., Мамонтов А.

Порівняльний аналіз точності запропонованого й зарезонансного методів вимірювання дисбалансу роторів 29

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Івах Р.

Вибір оптимальних параметрів ємнісного первинного перетворювача діелектричного вологоміра 33

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ

Костиця А., Лівнов В.

Підвищення точності визначення координат ультразвукової системи локального позиціонування 37

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Кузьменко Ю., Зайцева О.

Аналіз невизначеності вимірювань витрати води у витратомірних установках 45

ОБЛІК ЕНЕРГОНОСІЇВ

Середюк О., Лютенко Т.

Експериментальні дослідження вузлів обліку природного газу різних принципів дії 51

НАНОМЕТРОЛОГІЯ

Ковальчук В., Сербов М., Панченко О.

Вимірювальна система визначення геометричних параметрів нанокластерної підсистеми речовини 57

ХІМІЧНА МЕТРОЛОГІЯ

Калинюк М., Капітанчук Л., Калинюк О.

Визначення вмісту азоту в алюмінієвих сплавах методом відновлювального плавлення у потоці гелію 63

ОЛІМПІАДИ ТА КОНКУРСИ

Столярчук П., Гоц Н.

Всеукраїнська студентська олімпіада 71

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ

План набору слухачів на 2015 рік 72

ІНФОРМАЦІЯ

..... 50, 70

INTERNATIONAL COOPERATION

Messages from the Directors of the BIPM Martin Milton and of the BIML Stephen Patoray dedicated to the World Metrology Day 2015
Measurements and Light

Levbarg O.

Mitting of General Assembly Eurachem

INTERNATIONAL COMPARAISONS OF MEASUREMENT STANDARDS

Velychko O., Karpenko S., Gachok V.

International comparison COOMET of National Standard of electric power unit at industrial frequency

MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Vorobiov L., Dekusha L., Gryshchenko T., Kovtun S., Shmarov I.

Improved calculation of thermoelectric heat flow transducers sensitivity

Shabashkevich B., Dobrovolsky Yu., Yuryev V.

Metrological Complex for Verification and Calibration Optoelectronic Devices in the Visible Spectrum

MEASUREMENT AND TESTS

Chebryachko S., Radchuk D., Yavorska O.

Determination of the Sampling Size for the Filtering Half Masks Laboratory Testing

METHODS AND PROCEDURES

I. Ryzhentsev, A. Mamontov

Comparative Analysis of Accuracy of Proposed and Postresonance Methods of Measuring Rotor Unbalance

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

Ivakh R.

Selecting optimal parameters of capacitive sensor of dielectric moisture meters

ACCURACY AND RELIABILITY

Kostyrya A., Livnov V.

Improving the Positioning Accuracy of Ultrasonic Local Positioning System

ERRORS AND UNCERTAINTY

Kuzmenko Iu., Zaitseva O.

Analysis of the Uncertainty of Measurement of Water Flow in the Flowmeter Stations

ACCOUNTING OF ENERGY CARRIERS

Serediuk O., Liutenko T.

Experimental Research Metering of Natural Gas of Different Principles of Action

NANOMETROLOGY

Kovalchuk V., Serbov N., Panchenko A.

The measuring system for determination of geometrical parameters of nanocluster's subsystem substance

CHEMICAL METROLOGY

Kalyniuk M., Kapitanchuk L., Kalyniuk A.

Determination of nitrogen content in aluminium alloys by restoration melting in flow of helium

OLYMPIADS AND COMPETITIONS

Stoliarchuk P., Gots N.

All-Ukraine Student Olympiad

TRAINING EXPERTS

State Enterprise for Year 2015

INFORMATION



ВІТАЛЬНІ ПОСЛАННЯ ДИРЕКТОРІВ МІЖНАРОДНИХ БЮРО З МІР І ВАГІВ МАРТІНА МІЛТОНА ТА ЗАКОНОДАВЧОЇ МЕТРОЛОГІЇ СТІВЕНА ПАТОРЕЯ З НАГОДИ ВСЕСВІТНЬОГО ДНЯ МЕТРОЛОГІЇ 2015 ВИМІРЮВАННЯ ТА СВІТЛО



Цього року Всесвітній день метрології пов'язаний із Міжнародним роком світла та світлових технологій, проголошеним Генеральною асамблеєю ООН і організованим ЮНЕСКО. На заходах 2015 р. відзначатиметься центральна роль світла для життя як джерела енергії, основи фотонних технологій, а також як джерела подиву і захоплення.



Метрологія відіграє центральну роль у забезпеченні застосування світлових технологій, наприклад:

- оскільки розроблено нові форми ефективного освітлення, необхідні нові вимірювання для кількісної оцінки їх ефективності та впливу, який вони чинять на зовнішній вид об'єктів;
- рішення стосовно інвестування сонячних фотоелектричних технологій ґрунтуються на точних даних щодо їх ефективності та терміну експлуатації;
- прямі вимірювання сонця, зроблені з супутників, мають важливе значення для підтримки нашого розуміння сонячного випромінювання та його внеску до зміни клімату.

У свою чергу, світло є основою багатьох найважливіших нових елементів передових вимірювальних технологій. Протягом багатьох десятиліть найбільш точні вимірювання довжини залежали від високостабільних лазерів. Для багатьох високочутливих хімічних вимірювань використовують лазери з перестроюванням частоти, які можуть розпізнавати окремі переходи в молекулах-мішенях. Можливості стабільних лазерів на сьогодні охоплюють забезпечення роботи найбільш точних «оптичних годинників», які залежать від світла, випромінюваного окремими атомами, що були уповільнені й захоплені лазерними променями.

Я сподіваюся, що святкування Всесвітнього дня метрології 20 травня 2015 р. покладе початок установленню нових зв'язків між метрологічною спільнотою і тими, хто працює над розробленням та забезпеченням світлових технологій. Це є можливістю показати, що так само, як життя залежить від світла, безпечне, ефективне та дієве забезпечення світлом залежить від вимірювання.



Починаючи підготовку до Всесвітнього дня метрології — 2015 і розглядаючи цьогорічну тему — Вимірювання та світло, — я думаю про те, що ця поточна тема дуже тісно пов'язана з попередніми темами Всесвітніх днів метрології:

- Важливість світла у повсякденному житті (тема 2013 р.);
- Переваги освітлення робочих місць та вуличного освітлення для охорони нашого здоров'я та життєді-

яльності (теми 2006 та 2012 рр. відповідно);

- Зі збільшенням економічного зростання у багатьох куточках нашої планети потреба у більшій кількості світла, а отже, і електроенергії, безсумнівно створює глобальну енергетичну проблему (тема 2014 р.).

Ми живемо у світі переважно візуального сприйняття. Щодня ми бачимо схід сонця, що встановлює основоположні вимоги до самого життя. Щодня значний відсоток населення світу може просто натиснути вимикач і ввімкнути електричне світло.

Однак у нещодавній статті в газеті «Вашингтон пост» підкреслено значну проблему: «Темпи зростання рівня світової електрифікації повільніші, ніж темпи зростання кількості населення». У доповіді МЕА та Світового банку стверджується: «Що стосується загального доступу, то за звичайного перебігу діяльності до 2030 р. 12 відсотків населення залишаться без електропостачання...».

Це не зміниться без істотного збільшення витрат або знайдення нового напрямку для вирішення проблеми. Для врегулювання цього питання ООН також одночасно намагається вирішити проблему зміни клімату і запобігти глобальному підвищенню температури більш ніж на 2 °C. Щоби досягти обох цілей, країнам світу необхідно було б підвищити своє раціональне використання енергії та збільшити кількість чистої енергії, яку вони виробляють і використовують. Це вимагатиме:

- більшої кількості вимірювань для розуміння та підвищення ефективності електроприладів;
- збільшення кількості виробленої та спожитої чистої енергії;
- додаткових міжнародних стандартів для застосування конкретно у цій галузі.

Світло може поводити себе або як хвиля, або як частинка, а іноді як те й інше. Це справді чудово. Крім того, як метрологи, ми думаємо про світло як про щось таке, що вимірюється, але ми також використовуємо його для проведення вимірювань, що знову ж таки справді чудово.

Швидкість світла у вакуумі, яка зазвичай позначається c , — універсальна фізична стала, яка має важливе значення в багатьох галузях фізики. Її визначене значення точно дорівнює 299 792 458 м/с, зважаючи на те, що метр у системі SI визначається через цю сталу. Відстань, швидкість, температуру, склад та забруднювальні речовини у нашій їжі та навколишньому середовищі, загальні вимірювання для законодавчої метрології — все це можна вимірювати, використовуючи різні форми світла.

Саме з такими початковими думками я продовжую розглядати з великим подивом явище, яким ми насолоджуємося щодня, — світло. Спільнота законодавчої метрології з радістю приєднується до ЮНЕСКО у святкуванні Міжнародного року світла, і я бажаю Вам щастя, яке неможливо вимірювати, і дуже яскравого майбутнього.



ЗАСІДАННЯ ГЕНЕРАЛЬНОЇ АСАМБЛЕЇ EURACHEM



Eurachem

A focus for analytical chemistry in Europe



Фото POLLAB

О. Левбарг, начальник лабораторії,
ДП «Укрметрестестстандарт», м. Київ

Засідання Генеральної Асамблеї Європейської асоціації з метрології в хіміко-аналітичних вимірюваннях (Eurachem) та робочих груп відбувалися з 26 по 29.05.15 у Варшаві, Польща. У них взяли участь представники 22 країн, у тому числі й України, які розглянули питання стосовно стану робіт над документами Eurachem, освіти та навчання, можливих тем наступних документів, взаємодії з іншими організаціями, які працюють у сфері метрології хіміко-аналітичних вимірювань та акредитації лабораторій (EA, ILAC, EUROLAB-MetChem, EURAMET, CITAC, IUPAC, ISO/REMCO) тощо.

Відзначено, що у 2014 році видано нову редакцію «Настанови для лабораторій з валідації методів аналізування пов'язаних із цим питань». У 2015 році опубліковано новий інформаційний листок «Правильний вибір програми перевірки кваліфікації для моєї лабораторії». Завершено роботу над новою «Настановою з установлення та застосування цільової непевності (невизначеності) у хімічному вимірюванні». Триває розроблення нових редакцій «Настанови з якості в аналітичній хімії. Підготовка до акредитації», «Настанови з простежуваності хіміко-аналітичних вимірювань» та «Настанови із забезпечення якості під час науково-дослідницьких та нетипових аналітичних вимірювань».

Питання щодо доцільності розроблення нової редакції «Настанови з вибору та застосування стандартних зразків» залишається відкритим з огляду на пуб-

лікацію нових документів ISO/REMCO — Комітету з питань стандартних зразків Міжнародної організації зі стандартизації, зокрема, ISO Guide 33:2015 «Стандартні зразки. Належна практика застосування стандартних зразків» та скасування у зв'язку з цим аналогічного документа ILAC G9:2005.

Остаточний варіант «Настанови з установлення та застосування цільової непевності (невизначеності) у хімічному вимірюванні» розглянуто на засіданні робочої групи з непевності вимірювань та простежуваності. Відповідно до висловлених зауважень уточнено термінологію та деякі загальні положення.

Робоча група Eurachem з освіти та навчання розробляє документи, які можна застосовувати у процесі підготовки фахівців з аналітичної хімії, метрології, сертифікації, випробувань, акредитації лабораторій тощо. Наразі вона працює над новим виданням «Настанови з якості в аналітичній хімії. Підготовка до акредитації». Завершується робота над інформаційним листком з термінології аналітичного вимірювання, основою якого є настанова Eurachem «Термінологія аналітичного вимірювання. Вступ до VIM 3». Готується та постійно оновлюється перелік публікацій (книжок, нормативних документів, настанов, статей) з основних питань метрології у хімії: термінології, простежуваності, непевності, статистичних методів, валідації методик, міжлабораторних звірень, забезпечення та контролю якості, акредитації. Цей перелік доступний на веб-сайті Eurachem.

Обговорено проблемні питання встановлення еквівалентності аналітичних методів та поняття ефективності випробування.

Для встановлення еквівалентності аналітичних методів виконують вимірювання на одному або на декількох об'єктах (видах зразків), залежно від сфери застосування методу (методики). До отриманих даних можна застосувати різні статистичні методи, і великого значення мають належний вибір статистичних моделей та правильна інтерпретація результатів обчислення.

Поняття «ефективність випробування» («test power») визначають як імовірність правильного відхилення помилкової нульової гіпотези. Залежить вона від схеми експерименту, зокрема, обсягу вибірки та кількості повторних вимірювань. Таке поняття ще не розглядалося в документах Eurachem.

Представники організацій, які працюють у зазначеній вище сфері, надали інформацію щодо їхньої поточної діяльності та зв'язків з Eurachem. Повідомлено, зокрема, що:

- * готується видання нової версії основоположного документа з оцінювання непевності (невизначеності) вимірювань (GUM) — JCGM 100 та окремого документа JCGM 110, який міститиме приклади оцінювання непевності. Від Eurachem подано пропозиції до проектів цих документів, які розгляне об'єднана міжнародна робоча група, що їх готувала;

- * опубліковано нові документи ISO щодо стандартних зразків, розроблені технічним комітетом ISO/REMCO: ISO Guide 30:2015 «Терміни та визначення, пов'язані зі стандартними зразками»; ISO Guide 33:2015 «Застосування атестованих стандартних зразків»; ISO/TR 79:2015 «Стандартні зразки. Приклади стандартних зразків для якісних властивостей»; ISO Guide 80:2014 «Настанова щодо внутрішньолабораторного приготування стандартних зразків для контролю якості»;

- * технічні комітети ISO/REMCO та ISO/CASCO працюють над перетворенням настанови ISO Guide 34 «Загальні вимоги до компетентності виробників

стандартних зразків» на стандарт з оцінки відповідності ISO 17034;

- * розпочато роботу з перегляду стандарту ISO/IEC 17025 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій».

Представники національних організацій Eurachem розповіли стосовно результатів діяльності протягом року, що минув після попередньої Генеральної Асамблеї. Основні зусилля спрямовувалися на проведення семінарів та конференцій з питань метрології в аналітичній хімії, поширення і роз'яснення документів Eurachem, співпрацю з метрологічними інститутами, лабораторіями, вищим навчальними закладами. У багатьох країнах представники Eurachem плідно співпрацюють з органами з акредитації. Зокрема, в Україні тривала робота з перекладу документів Eurachem та споріднених організацій. У 2014 — 2015 роках видано переклади настанов Eurachem «Термінологія аналітичного вимірювання. Вступ до VIM 3», «Непевність виміру, пов'язана з відбиранням проби. Настава з методів та підходів», Технічного звіту Міжнародного союзу теоретичної та прикладної хімії (IUPAC) «Метрологічна простежуваність результатів вимірень у хімії: поняття та реалізація». Окрім того, підготовлено та оприлюднено на веб-сайті Eurachem переклади українською мовою двох інформаційних листків: «Як перевірка кваліфікації може допомогти моїй лабораторії?» та «Застосування інформації про непевність вимірів під час оцінювання відповідності». Роботу фахівців ДП «Укрметртестстандарт» з перекладання документів позитивно оцінено делегатами Генеральної Асамблеї.

Відбулося голосування щодо нових членів виконавчого комітету Eurachem. До виконкому обрано представників Бельгії, Італії, Кіпру, Польщі та Португалії.

Наступне засідання Генеральної Асамблеї Eurachem, а також пов'язаний з нею семінар із забезпечення якості в аналітичній хімії відбудуться у травні 2016 року в м. Гент, Бельгія.

Інформацію щодо діяльності та документи Eurachem можна знайти на сайті Eurachem www.eurachem.org. Зокрема, переклади українською мовою настанови «Термінологія аналітичного вимірювання. Вступ до VIM 3» та зазначених вище інформаційних листків — на сайтах

https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/TAM_2011_UA2dISBN.pdf;

https://www.eurachem.org/images/stories/leaflets/mu/compliance/eurachemcomplianceleaflet_UA.pdf;

https://www.eurachem.org/images/stories/leaflets/pt/labhelp/how_can_PT_help_my_lab_2013_UA.pdf.

Окрім того, переклади настанов Eurachem та Технічного звіту IUPAC розміщено на сайті ДП «Укрметртестстандарт»:

<http://metrology.kiev.ua/mizhnarodna-metrologiya/pereklad-mizhnarodnikh-dokumentiv>.

УДК 53.098.08

МІЖНАРОДНІ ЗВІРЕННЯ В РАМКАХ КООМЕТ НАЦІОНАЛЬНИХ ЕТАЛОНІВ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ПРОМИСЛОВІЙ ЧАСТОТІ

О. Величко, доктор технічних наук, директор Науково-виробничого інституту метрологічного забезпечення вимірювань електромагнітних величин,
С. Карпенко, начальник лабораторії,
В. Гачок, заступник начальника науково-дослідного відділу,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Розглянуто основні результати міжнародних додаткових звірень національних еталонів одиниці електричної потужності на промисловій частоті в рамках проекту КООМЕТ 344/UA/05 (COOMET.EM-S2). Звірення, пілотною лабораторією яких було ДП «Укрметртестстандарт», проведені за участю національних метрологічних інститутів (НМІ) України, Болгарії та Білорусі протягом 2008–2011 років.

In the article the basic results of international supplementary comparison of national standards of unit of electric power on industrial frequency within the framework of project of KOOMET 344/UA/05 (COOMET.EM-S2) are considered. Comparison the pilot laboratory of that was SE «Ukrmetrteststandard» are conducted with participation of national metrology institutes of Ukraine, Bulgaria and Belarus during 2008-2011.

Ключові слова: національні еталони, міжнародні звірення, електрична потужність, частота, НМІ.
Keywords: national standards, international comparison, electric power, frequency, NMI.

Національна еталонна база та система передавання розмірів одиниць вимірювання створюються для задоволення потреб національної економіки. Відповідно до чинного національного законодавства з питань метрології та метрологічної діяльності з метою забезпечення визнання на міжнародному рівні національних еталонів, а також результатів вимірювань, повірки та калібрування такі еталони повинні зводитися з відповідними еталонами інших держав або міжнародними еталонами.

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

Міжнародні додаткові звірення національних еталонів одиниці електричної потужності на промисловій частоті в рамках проекту КООМЕТ 344/UA/05 (COOMET.EM-S2) [7], пілотною лабораторією яких було ДП «Укрметртестстандарт», проведені за участю НМІ України, Болгарії та Білорусі протягом 2008–2011 років. НМІ — учасники цих звірень такі: ДП «Укрметртестстандарт» (UMTS, Україна); ВІМ — Болгарський інститут метрології (Болгарія); БелГІМ — Білоруський державний інститут метрології (BelGIM, Білорусь).

Ці звірення проводилися між НМІ-учасниками, які представляють КООМЕТ — Євро-Азійське співробітництво державних метрологічних установ. Пілотна лабораторія



О. Величко



С. Карпенко



В. Гачок

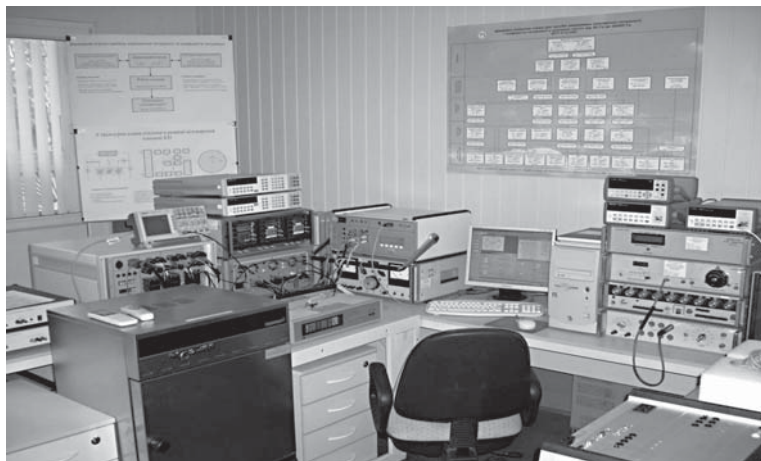


Рис. 1. Державний первинний еталон України одиниць електричної потужності та коефіцієнта потужності

Fig. 1. State Primary Standard of Ukraine of units of electric power and power factor

забезпечила НМІ-учасників звірень еталоном передавання (ЕП), досліджувала його дрейф протягом всього часу проведення звірень, розробила і виконувала графік проведення звірень, збирала й аналізувала отримані дані звірень, підготувала попередній і заключний звіти тощо [8, 9].

У звіреннях від України представлено Державний первинний еталон України одиниць електричної потужності та коефіцієнта потужності (ДЕТУ 08-08-02), який зберігається в ДП «Укрметрестестстандарт». Загальний вид еталона наведено на рис. 1.

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

Для проведення звірень обрано ЕП RM 15-04 (Radian Research) — прецизійний портативний вимірювач електричної активної потужності (рис. 2). Цей ЕП належить ДП «Укрметрестестстандарт», має клас точності



Рис. 2. Еталон передавання звірень за проектом COOMET.EM-S2

Fig. 2. Transfer standard for comparison of project COOMET.EM-S2

0,005 % і входить до складу еталона ДЕТУ 08-08-02.

Основні метрологічні та технічні характеристики ЕП RM 15-04 такі:

- вхідна напруга: (60...600) В (середньоквадратична);
- вхідний струм: (0,2...50) А (середньоквадратичний);
- частота вхідного сигналу напруги і струму: (48...62) Гц;
- стала частотного виходу: 100000000 імпульсів/кВт·с;
- напруга живлення: (80...600) В (середньоквадратична);
- діапазон температур збереження: (0...+60) °С;
- робочий діапазон температур: від 10 до 40 °С;

- робочий діапазон відносної вологості повітря: від 0 до 85 %.

Після отримання ЕП черговим НМІ-учасником здійснювалася стабілізація його роботи протягом 24 годин до початку вимірювань. Сигнали напруги і струму повинні бути під'єднані до ЕП протягом 4 годин до початку вимірювань.

Вимірювання НМІ-учасниками проводилися за таких умов:

- вимірювальна напруга: $120 \text{ В} \pm 0,2 \%$;
- вимірювальний струм: $5 \text{ А} \pm 0,2 \%$;
- коефіцієнти потужності: $1,0 \pm 0,5$ з відхиленням від номінального значення не більше $\pm 0,002 \%$;
- вимірювальні частоти: $(50 \pm 0,05) \text{ Гц}$ і $(53 \pm 0,05) \text{ Гц}$;
- температура: $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$;
- відносна вологість повітря: між 20 і 70 %;
- напруга живлення: $220 \text{ В} \pm 5 \%$;
- частота напруги живлення: $(50 \pm 0,1) \text{ Гц}$.

ДП «Укрметрестестстандарт» (UMTS) як пілотна лабораторія систематично здійснювала вимірювання для визначення часового дрейфу ЕП для коефіцієнтів потужності $1,0 \pm 0,5$ (Lag, Lead) на частотах 50 і 53 Гц. Результати цих досліджень для коефіцієнта потужності $PF = 1,0$ на частотах 50 і 53 Гц представлено на рис. 3 [8]. Такі вимірювання проводилися в обов'язковому порядку перед відправленням ЕП до чергового НМІ-учасника, а також після його повернення, оскільки ЕП має певний часовий дрейф. Зважаючи на отримані пілотною лабораторією результати вимірювань можна констатувати, що зазначений дрейф був незначним і не мав суттєвого впливу на отримані НМІ-учасниками результати досліджень ЕП.

2. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЗВІРЕНЬ ЕТАЛОНІВ

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

- * застосовані метод вимірювань і вимірювальне обладнання;

- * підтвердження простежуваності вимірювань;

- * інформацію щодо дат вимірювань;

- * значення вимірювальної потужності на частоті 50 Гц для встановлених коефіцієнтів потужності;

- * значення вимірювальної потужності на частоті 53 Гц для встановлених коефіцієнтів потужності;

- * загальну невизначеність результату вимірювальної потужності для встановлених коефіцієнтів потужності з відповідними бюджетами невизначеності на частотах 50 і 53 Гц;

- * значення температури повітря навколишнього середовища;

- * значення відносної вологості повітря навколишнього середовища.

Розрахунки невизначеності вимірювань кожним НМІ-учасником здійснювалися відповідно до настанови ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) [10]. Ними розроблені власні бюджети невизначеності вимірювань для вимірювання електричної потужності для необхідних коефіцієнтів потужності. Загальна стандартна невизначеність вимірювань включалася до звіту стосовно дослідження ЕП НМІ-учасника разом із виміряними значеннями потужності для встановлених коефіцієнтів потужності.

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

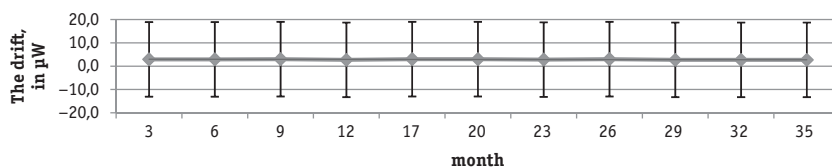
- ▲ експериментальну стандартну невизначеність N незалежних вимірювань (тип А);

- ▲ невизначеності первинного еталона або іншого еталона, які використовувалися за дослідження ЕП;

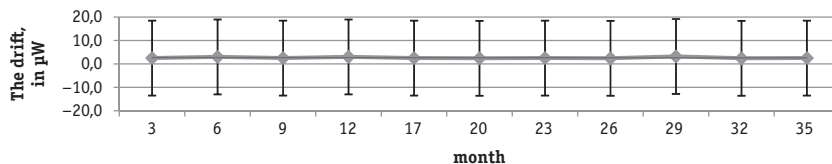
- ▲ невизначеності необхідних для НМІ різноманітних коригувань вимірянних значень потужності.

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

Опорне значення звірень x_{ref} отримане як середнє всіх значень НМІ-учасників звірень COOMET.



a)



b)

Рис. 3. Дрейфи ЕП для коефіцієнта потужності 1,0 на частотах 50 Гц (а) і 53 Гц (б)

Fig. 3. Behavior of the travelling standard for power factor 1,0 on frequencies 50 Hz (a) and 53 Hz (b)

ЕМ-S2 за виразом рекомендації COOMET R/GM/19 [11]

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

з відповідною стандартною невизначеністю

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

де x_i — i -ий результат НМІ-учасника звірень COOMET. ЕМ-S2; $u(x_i)$ — стандартна невизначеність результату i -го НМІ-учасника звірень; N — кількість учасників звірень ($N = 3$).

Розраховані значення опорних значень з їхніми розширеними невизначеностями для встановлених коефіцієнтів потужності на частотах 50 і 53 Гц наведено у таблиці 1.

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

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

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

Задекларовані невизначеності НМІ-учасників повинні задовольняти нерівності:

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

Ступені еквівалентності еталонів НМІ-учасників D_i з їхніми розширеними невизначеностями $u(D_i)$ ($k = 2$) для встановлених коефіцієнтів потужності на частотах 50 і 53 Гц у сенсі опорного значення звірень, а також значення критерію E_n наведено у табл. 2 і на рис. 4—6 [8].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ПОГОДЖЕНОСТІ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗВІРЕНЬ

Розраховані значення χ^2 критерію (табл. 3) для отриманих результатів звірень еталонів

Таблиця 1. Опорні значення з їхніми розширеними невизначеностями для звірень COOMET.EM-S2

Table 1. Reference values and its uncertainties for comparison COOMET.EM-S2

Коефіцієнт потужності	Опорне значення, мкВт/(В·А)	Розширена невизначеність опорного значення, мкВт/(В·А)
1,0 (50 Гц)	-5,7	6,5
1,0 (53 Гц)	2,8	6,5
0,5 Lag (50 Гц)	-66,0	10,9
0,5 Lag (53 Гц)	-62,2	11,1
0,5 Lead (50 Гц)	50,1	10,8
0,5 Lead (53 Гц)	54,4	11,0

НМІ-учасників з урахуванням їх невизначеностей вимірювань $\{x_i, u(x_i)\}$, $i = 1, \dots, N$ за виразом [11]:

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

Значення критерію χ^2 для звірень COOMET.EM-S2 не перевищує критичних значень з рівнем

охоплення 0,95 за нерівністю:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_{ref})^2}{u^2(x_i)} < \chi_{0.95}^2(N-1), \quad (7)$$

тобто отримані значення НМІ-учасників можна визнати погодженими, і це є об'єктивним підтвердженням заявлених НМІ-учасниками невизначеностей вимірювань.

Максимум критерію E_N для НМІ-учасників розраховувався за виразом [11]:

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

Перевірка здійснювалася послідовно для кожного НМІ-учасника. Максимум критерію E_N для заявлених невизначеностей і отриманих ступенів еквівалентності для всіх НМІ-учасників для встановлених коефіцієнтів потужності задовольняє рівняння (7) та (8) (табл. 2).

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

У рамках Угоди CIPM MRA калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС) визначаються

Таблиця 2. Ступені еквівалентності еталонів НМІ-учасників з їхніми розширеними невизначеностями та значення критерію E_n Table 2. Degrees of equivalence of standards of NMI-participants with its uncertainties and criteria values E_n

НМІ-учасник	D_i , мкВт/(В·А)	$u(D_i)$, мкВт/(В·А)	E_n
Коефіцієнт потужності 1,0 (50 Гц)			
BelGIM	33,9	36,6	0,9269
UMTS	8,5	17,4	0,4899
BIM	-3,0	9,8	0,3051
Коефіцієнт потужності 1,0 (53 Гц)			
BelGIM	17,3	28,7	0,6035
UMTS	-0,3	17,2	0,0146
BIM	-1,0	9,9	0,0965
Коефіцієнт потужності 0,5 Lag (50 Гц)			
BelGIM	60,4	59,2	0,1021
UMTS	29,3	45,7	0,6421
BIM	-2,7	16,5	0,1627
Коефіцієнт потужності 0,5 Lag (53 Гц)			
BelGIM	32,8	59,3	0,5527
UMTS	23,8	46,6	0,5096
BIM	-1,2	16,9	0,0679
Коефіцієнт потужності 0,5 Lead (50 Гц)			
BelGIM	-17,0	59,3	0,2863
UMTS	-0,2	46,7	0,0037
BIM	2,7	16,7	0,1634
Коефіцієнт потужності 0,5 Lead (53 Гц)			
BelGIM	-33,2	59,4	0,5596
UMTS	-5,2	47,4	0,1105
BIM	4,1	17,2	0,2365

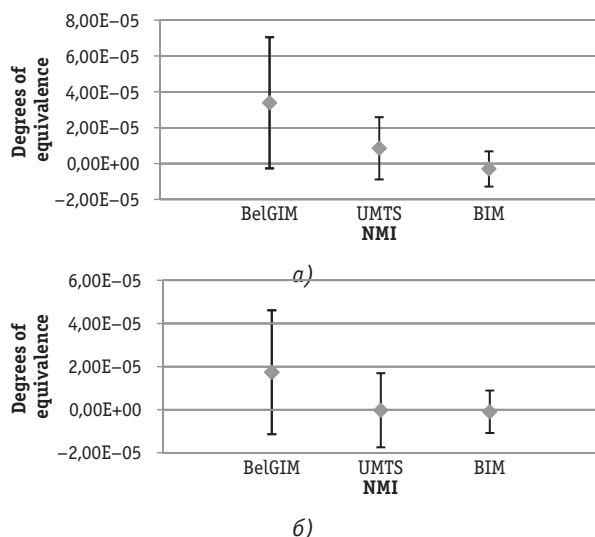


Рис. 4. Ступені еквівалентності для НМІ-учасників для коефіцієнта потужності 1,0 на частотах 50 Гц (а) і 53 Гц (б)

Fig. 4. Degrees of equivalence of NMI-participants for power factor 1.0 on frequencies 50 Hz (a) and 53 Hz (b)

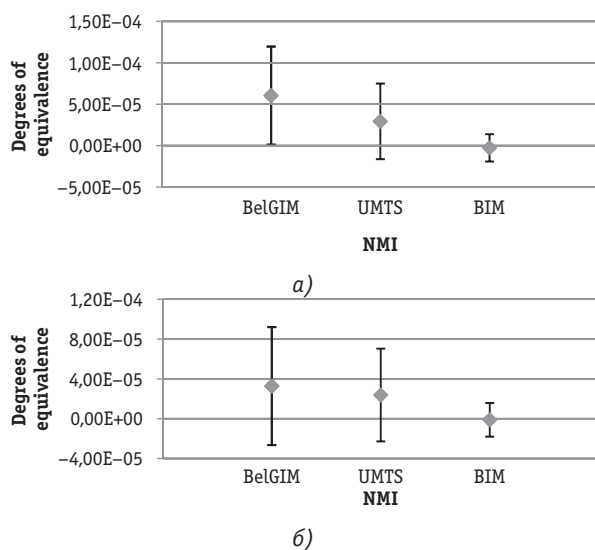


Рис. 5. Ступені еквівалентності для НМІ-учасників для коефіцієнта потужності 0,5 Lag на частотах 50 Гц (а) і 53 Гц (б)

Fig. 5. Degrees of equivalence of NMI-participants for power factor 0.5 Lag on frequencies 50 Hz (a) and 53 Hz (b)

як найвищий рівень вимірювання або калібрування, звичайно пропонований клієнтам НМІ, представлений у значеннях довірчого рівня, рівного 95 %. Вони характеризують якість послуг НМІ з калібрування чи вимірювання, що надаються клієнтам на постійній основі. НМІ видаються відповідні сертифікати калібрування чи вимірювання, які визнаються всіма учасниками Угоди [12–14].

СМС НМІ країн публікуються у виді pdf-файлів

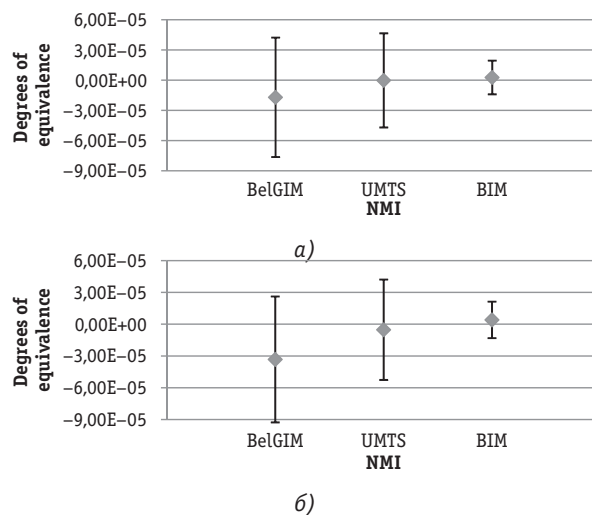


Рис. 6. Ступені еквівалентності для НМІ-учасників для коефіцієнта потужності 0,5 Lead на частотах 50 Гц (а) і 53 Гц (б)

Fig. 6. Degrees of equivalence of NMI-participants for power factor 0.5 Lead on frequencies 50 Hz (a) and 53 Hz (b)

Таблиця 3. Отримані значення для критерію χ^2 для встановлених коефіцієнтів потужності

Table 3. Received values for criterion χ^2 for fixed power factor

Коефіцієнт потужності	χ^2	$\chi^2_{0,95}(n-1)$
1,0 (50 Гц)	1,3341	5,9915
1,0 (53 Гц)	0,4001	
0,5 Lag (50 Гц)	1,5620	
0,5 Lag (53 Гц)	0,5850	
0,5 Lead (50 Гц)	0,1133	
0,5 Lead (53 Гц)	0,4261	

у Додатку С бази даних ключових звірень (KCDB) ВІРМ у виді таблиць. Приклад таблиці СМС НМІ України для одиниці електричної потужності наведено на рис. 7 [7, 14–16].

Отримані результати міжнародних звірень за проектом COOMET.EM-S2 підтверджують опубліковані у Додатку С бази даних KCDB ВІРМ СМС НМІ України (ДП «Укрметртестстандарт») і корелюються з результатами міжнародних звірень за проектом EURAMET.EM-K5.1 Європейської асоціації національних метрологічних інститутів, у яких також брав участь ДП «Укрметртестстандарт» [7, 17].

ВИСНОВКИ

1. За результатами міжнародних додаткових звірень національних еталонів одиниці електричної потужності на промисловій частоті в рамках проекту

Electricity and Magnetism, Ukraine

SE "Ukrmetteststandard" (State Enterprise "All-Ukrainian Research and Production Center of Standardization, Metrology, Certification and Consumers' Rights Protection")

NSC "Institute of Metrology" (National Scientific Centre "Institute of Metrology")

Calibration or Measurement Services			Measurand Level or Range			Measurement Conditions/independent variables		Expanded Uncertainty						Comments	NMI Service Identifier	NMI Service Provider
Quantity	Instrument or artifact	Instrument Type or Method	Minimum value	Maximum value	units	Parameter	Specifications	Value	Units	Coverage Factor	Level of Confidence	Is the expanded uncertainty a relative one?	Uncertainty Matrix			
AC power and energy, three phase (f <= 400 Hz), active power	Power meter, power converter, wattmeter	Direct measurement	1	10392	W	Voltage	10 V to 600 V	30 to 50	μ WVA	2	95%	Yes	<u>Matrix 7.1</u>	Approved on 28 July 2010	28	SE "Ukrmetteststandard"
						Current	0.1 A to 10 A									
						Frequency	40 Hz to 70 Hz									
AC power and energy, single phase (f <= 400 Hz), reactive power	Power meter, power comparator	Direct measurement	1	6000	var	Voltage	10 V to 600 V	80 to 80	μ varVA	2	95%	Yes	<u>Matrix 7.2</u>	Approved on 28 July 2010	29	SE "Ukrmetteststandard"
						Current	0.1 A to 10 A									
						Frequency	40 Hz to 70 Hz									
AC power and energy, three phase (f <= 400 Hz), reactive power	Power meter, power comparator	Direct measurement	1	10392	var	Voltage	10 V to 600 V	60 to 80	μ varVA	2	95%	Yes	<u>Matrix 7.2</u>	Approved on 28 July 2010	30	SE "Ukrmetteststandard"
						Current	0.1 A to 10 A									
						Frequency	40 Hz to 70 Hz									
AC power and energy, single phase (f <= 400 Hz), active energy	Energy meter	Direct measurement	0.025	8E+06	Ws	Voltage	10 V to 500 V	85	μ WhVA/h	2	95%	Yes	-	Approved on 28 July 2010	31	SE "Ukrmetteststandard"
						Current	0.01 A to 120 A									
						Frequency	40 Hz to 70 Hz									
						Power factor	1 to 0.25, inductive or capacitive									

Рис. 7. Приклад таблиці СМС НМІ України для одиниці електричної потужності

Fig. 7. Example of CMC table of NMI of Ukraine for unit of electric power


COOMET.EM-S2, проведених за участю НМІ України, Болгарії та Білорусі, отримано хороші результати. Звіт за проектом COOMET.EM-S2 опубліковано у Додатку В бази даних KCDB BIPM у рамках Угоди CIPM MRA.

2. Отримані результати звірень у рамках проекту COOMET.EM-S2 підтверджують опубліковані у Додатку С бази даних KCDB BIPM СМС НМІ України, що дозволяє ДП «Укрметртестстандарт» наносити

логотип Угоди CIPM MRA на свої сертифікати калібрування чи вимірювання згідно з наданим раніше правом (авторизацією) від директора BIPM.

3. Отримані результати звірень у рамках проекту COOMET.EM-S2 повністю корелюються з результатами міжнародних звірень за проектом EURAMET. EM-K5.1 Європейської асоціації національних метрологічних інститутів, у яких брав участь ДП «Укрметртестстандарт».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Величко О.М. Міжнародні звірення еталонів та їх значення // Укр. метролог. журнал (Velychko O.M. International comparisons of standards and its values // Ukrainian metrology journal). — 1998. — № 4. — С/Р. 48—51.
2. Величко О. Н. Метрологическая прослеживаемость на разных уровнях метрологических работ // Измерит. техника (Velichko O. N. Metrological traceability on the different levels of metrology works // Measuring instruments). — 2009. — № 11. — С/Р. 69—73.
3. Величко О.М. Гармонізація національних нормативних документів щодо простежуваності вимірювань // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O.M. Harmonization of national normative documents in relation to the traceability of measurement // Standardization, certification, quality). — 2008. — № 1. — С/Р. 25—32.
4. Величко О.М. Нормативне забезпечення міжнародних звірень національних еталонів // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O. M. Normative providing of international comparisons of national standards // Standardization, certification, quality). — 2008. — № 4. — С/Р. 32—39.
5. Величко О.М. Оброблення даних міжнародних звірень національних еталонів: основні вимоги та процедури // Український метрологічний журнал (Velychko O.M. Data treatment of international comparisons of national standards: the basic requirements and procedures // Ukrainian metrology journal). — 2009. — № 3. — С/Р. 57—63.
6. CIPM MRA-D-05:2013. Measurement comparisons in the context of the CIPM MRA.
7. Міжнародна база даних ключових звірень Міжнародного бюро з мір та вагів — KCDB (International Database of key comparisons of the International Bureau for Weights and Measures) <http://kcdb.bipm.org/>
8. Velychko O., Karpenko S., Gachok V., Akhmadov A. Final Report on COOMET 344/UA/05 Supplementary Comparison of 50/60 Hz Power (COOMET.EM-S2). January 2013. Kyiv, Ukraine. SE «Ukrmetrteststandard». — 29 p.
9. Velychko O., Karpenko S., Gachok V. The Results of Supplementary Comparison of 50/60 Hz Power COOMET. EM-S2 // 10th International Congress on Electrical Metrology. Congress Digest. — Buenos Aires, Argentina (September 25—27, 2013). — 4 p.
10. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
11. COOMET R/GM/19:2008 Guidelines on COOMET supplementary comparison evaluation.
12. CIPM MRA-D-04:2013. Calibration and Measurement Capabilities in the context of the CIPM MRA.
13. Величко О.Н. Калибровочные и измерительные возможности национальных метрологических институтов: особенности подготовки, экспертизы и публикации // Измерит. Техника (Velychko O. M. Calibration and measuring capabilities of national metrology institutes: features of preparation, examination and publication // Measuring instruments). — 2010. — № 6. — С/Р. 69—73.
14. Величко О. Калібрувальні та вимірювальні можливості НМІ: основні процедури експертизи та оприлюднення // Метрологія та прилади (Velychko O. Calibration and measuring capabilities of national metrology institutes: procedures, examination and publication // Metrology and Instruments). — 2010. — № 2. — С/Р. 3—10.
15. Величко О.М. Метрологічне та нормативне забезпечення вимірювання електромагнітних величин // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O.M. Metrology and normative providing of measuring of electromagnetic values // Standardization, certification, quality). — 2006. — № 6. — С/Р. 34—42.
16. Величко О. Метрологічне та нормативне забезпечення вимірювань електромагнітних величин у ДП «Укрметртестстандарт» // Метрологія та прилади (Velychko O. M. The metrology and normative providing of measuring of electromagnetic values in SE «Ukrmetrteststandard» // Metrology and Instruments). — 2009. — № 5. — С/Р. 5—12.
17. Çaycı H. EURAMET.EM-K5.1 Key Comparison of 50/60 Hz Power. Final Report. March 2011. TÜB_TAK Ulusal Metroloji Enstitüsü. — 70 p. 

Отримано / received: 31.03.2015.

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

УДК 536.6

УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

Л. Воробйов, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник,
Л. Декуша, кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу,
Т. Грищенко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
С. Ковтун, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Є. Шмаров, аспірант, молодший науковий співробітник,
 Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Розглянуто модель одиничного елемента перетворювача теплового потоку, для якої за допомогою методу дроблення ізотермічними й адіабатними площинами отримано нові уточнені формули розрахунку приведеної чутливості перетворювача. Експериментальні дослідження партії перетворювачів підтверджують достовірність запропонованого методу розрахунку. Отримані результати демонструють факт залежності чутливості від товщини захисного шару й дозволяють оцінити необхідне значення цієї товщини.

The article describes a new method for calculating the adjusted sensitivity of thermoelectric heat flow transducers (HFT). Fig. 1 shows a single element of HFT and its model with indicating the fragmentation by isothermal and adiabatic flat surfaces into sections and equivalent thermal resistance connection diagrams for mode of fragmentation. On the basis of equivalent diagrams obtained the formula for calculating the comparative sensitivity for

isothermal (7) and adiabatically-isothermal (8) methods of fragmentation. The resulting comparative sensitivity is defined as the arithmetic mean (9). To validate the obtained relations specially made a number of HFT, based on constantan nickel-plated wire. The calculation results, as well as experimental studies, are presented in Fig. 2. The results of experimentally measured sensitivity well agree to the values obtained in accordance with the proposed methodology. Fig. 3 is a graph of the temperature dependence of the comparative sensitivity for three values of the relative cross section nickel plating. Fig. 4 shows the dependence of the comparative sensitivity from the ratio of HFT height to the height of the thermopile with form-parameter variations for constantan-copper and constantan-nickel thermopile. The results confirm the well-known fact from the practice of sensitivity depending on the thickness of the protective layer of the compound and allow estimating the value of this thickness required for the stabilization characteristics of HFT.

Ключові слова: Термоелектричний перетворювач, тепловий потік, чутливість, батарея термоелементів.
Keywords: Thermoelectric converter, heat flow, sensitivity, thermopile.

Для вимірювання теплового потоку та його щільності найбільшого розвитку і широкого поширення на практиці отримали багатоелементні термоелектричні перетворювачі теплового потоку (ПТП) виду допоміжної стінки, які є різновидом градієнтних перетворювачів [1—3]. Такий перетворювач є пластиною, в якій розміщено батарею термоелементів, залитих електроізоляційним компаундом. Батарея термоелементів виконується у виді стрічкоподібної спіралі із дроту основного термоелектрода, навитої на каркасну електроізоляційну стрічку, причому на основний дріт з однієї зі сторін спіралі нанесено покриття з іншого (парного) термоелектричного матеріалу. Границі переходу від ділянки з чистим дротом до біметалевої ділян-

ки є спаями термоелементів, причому один зі спаїв кожного термоелемента розташований поблизу однієї з поверхонь ПТП, а другий — поблизу протилежної. Отже, за наявності теплового потоку, що проходить через пластину ПТП і, відповідно, паралельно через усі елементи термобатареї, виникає перепад температури між спаями ΔT , внаслідок чого, у кожному із включених послідовно термоелементів з термоелектричним коефіцієнтом α_{TE} , генерується електричний сигнал ΔU . За рівності значень довжини ділянки із чистим дротом і біметалевої ділянки справедливе співвідношення [1, 3]:

$$\Delta U = \alpha_{TE} \cdot \Delta T = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T / \left(1 + \frac{\rho_2 \cdot f_1}{\rho_1 \cdot f_2} \right), \quad (1)$$

де α_i ($i = 1, 2$) — коефіцієнти Зеебека основного

термоелектрода — дроту ($i = 1$) і гальванічно нанесеного матеріалу ($i = 2$); f_i — площа перетину матеріалу; ρ_i — питомий опір матеріалу.

Основною характеристикою ПТП є чутливість S до вимірюваної величини: щільності теплового потоку (q) $S_q = E/q$ і теплового потоку (Q) $S_Q = E/Q = E/(q \cdot A)$. Також за розрахунків характеристик ПТП використовується наведена чутливість $S_V = E/(q \cdot A \cdot h)$, яка не залежить від розмірів ПТП і характеризує чутливість одиниці об'єму теплочутливої зони. У представлених формулах E — вихідний сигнал ПТП, A і h — площа й висота теплочутливої зони.

Традиційно розрахунки чутливості ПТП залежно від параметрів конструкції й властивостей використаних матеріалів, виконують за формулою [1, 3, 4]:

$$S_V = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\lambda_1 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot [2 + \lambda_{21} \cdot f_{21} + \lambda_{31} \cdot (\Phi - 2 \cdot f_{21})]}, \quad (2)$$

де λ_i — коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $f_{i1} = f_i/f_1$, $\lambda_{i1} = \lambda_i/\lambda_1$, $\rho_{i1} = \rho_i/\rho_1$ — наведені площа перетину, коефіцієнт теплопровідності й питомий опір матеріалів, причому індекс 3 відноситься до заливального компаунда, $\Phi = (2f_1 + f_2 + f_3)/f_1 = 2 + f_{21} + f_{31}$ — формпараметр або наведена площа одиничного термоелемента, для якого справедливе співвідношення:

$$\Phi = A/(Z \cdot f_1) = 1/(n \cdot f_1), \quad (3)$$

де Z — загальна кількість термоелементів у ПТП, n — щільність заповнення термоелементами.

Формулу (2) отримано за припущення, що всі ізотермічні поверхні в чутливій зоні є площинами, паралельними поверхням ПТП і перпендикулярними тепловому потоку, що надходить, тобто переструми теплоти між гілками термоелементів і зоною, зайнятою заливальним компаундом, відсутні. Насправді, внаслідок значної різниці коефіцієнтів теплопровідності матеріалів, такі переструми існують, а ізотермічні поверхні відрізняються від паралельних площин. На практиці це призводить до того, що розрахунки за формулою (2) дають лише загальний характер залежності наведеної чутливості від параметрів конструкції й властивостей матеріалів, а характеристики виготовлених перетворювачів можуть помітно відрізнятися від розрахункових.

У пропонованій уточненій методиці розрахунків чутливості фізична модель ПТП розглядається у виді гетерогенного тіла із замкненими включеннями з контрастною теплопровідністю. Виведення формул виконано з урахуванням рекомендацій [5] щодо дроблення елементарних чарунок тіла ізотермічними й адіабатними площинами. Таким методом

у [6] отримано розрахункові формули для теплового опору ПТП.

Елементарною чарункою в ПТП є одиничний термоелемент разом із зонами заливального компаунда, що приходяться на нього, й, у загальному випадку, з теплопровідними шунтами й температуровирівнювальними покриттями, які слугують для зменшення теплового опору ПТП [6]. На рис. 1 показано одиничний елемент ПТП із зазначенням дроблення його ізотермічними й адіабатними площинами на ділянки, а також еквівалентні схеми з'єднання теплових опорів ділянок для двох способів дроблення.

Перший варіант дроблення є ізотермічним, а другий — адіабатно-ізотермічним, оскільки поперечні тепловому потоку елементи із високотеплопровідних металів вирівнюють розподіл температури й створюють ізотермічні поверхні.

Для розрахунків приведенного теплового опору кожної виділеної ділянки $R_{g,j}$ в еквівалентній схемі

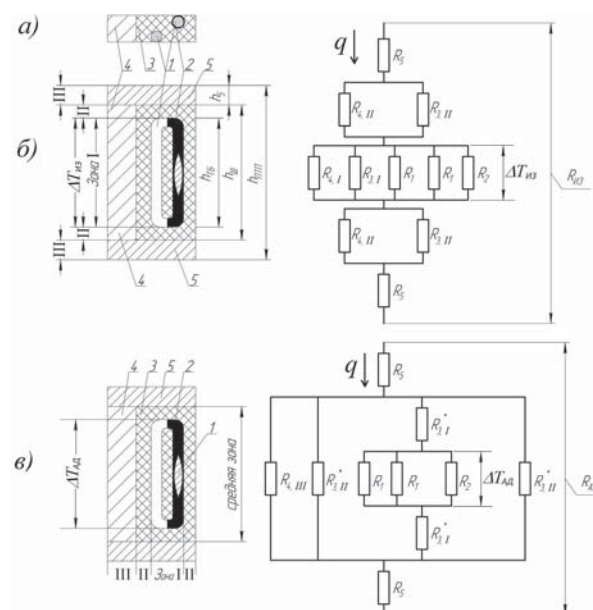


Рис. 1. Одиничний термоелемент ПТП: а) — поперечний переріз; б) — схема ізотермічного дроблення й еквівалентна схема з'єднання теплових опорів ділянок; в) — схема адіабатно-ізотермічного дроблення й еквівалентна схема з'єднання теплових опорів ділянок.

1 — основний термоелектрод; 2 — гальванічне покриття; 3 — заливальний компаунд; 4 — тепловий шунт; 5 — температуровирівнювальне покриття
Fig.1. A single thermocouple of HFT: a) — cross-section; b) — the isothermal fragmentation and the equivalent diagram of the thermal resistances of the sectors; c) adiabatic-isothermal fragmentation and the equivalent diagram of the thermal resistances of the sectors.
1 — the main thermoelectrode; 2 — plating; 3 — casting compound; 4 — thermal shunt; 5 — coating, equalizing the temperature

застосовано формулу:

$$R_{g,j} = \frac{h_{g,j}}{\lambda_i} \cdot \frac{f_{\text{од.ел}}}{f_{g,j}} = \frac{h_{g,j}}{\lambda_{i3} f_{i1}} \cdot \frac{\Phi}{\lambda_3}, \quad (4)$$

де $h_{g,j}$, $f_{g,j}$ — висота й площа перетину j -ої ділянки; $f_{\text{од.ел}}$ — площа перетину одиничного елемента, $\Phi = (2f_1 + f_2 + f_3 + f_4) / f_1 = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41}$ — формпараметр, $\lambda_{i3} = \lambda_i / \lambda_3$ — приведений коефіцієнт теплопровідності за $i = 1, \dots, 5$, причому індекс 3 відноситься до заливального матеріалу, індекс 4 — до матеріалу шунта, індекс 5 — до матеріалу температуровирівнювального покриття.

Висота ділянки $h_{g,j}$ визначається такими параметрами або їх різницею:

$h_{\text{ТБ}}$ — висота термобатареї, $h_{\text{Ш}}$ — висота шунта, h_5 — висота (товщина) температуровирівнювального покриття, $h_{\text{ПТП}}$ — висота ПТП, причому $h_{\text{ПТП}} = h_{\text{Ш}} + h_5$.

Уведемо позначення:

$b = 2 + f_{21}$ — відносна площа перетину термоелектродів одиничного елемента;

$\Lambda_{1,2} = 2\lambda_{13} + \lambda_{23} \cdot f_{21}$ — відносна теплова провідність одиниці довжини термоелектродів;

$\Lambda_{3,4} = f_{31} + \lambda_{43} \cdot f_{41}$ — відносна теплова провідність одиниці довжини пасивних ділянок одиничного елемента (компаунда й шунта).

Застосовуючи для еквівалентних схем рис. 1 закони Кирхгофа й використовуючи введені позначення, отримуємо значення різниці температури між спаями термоелемента за впливу на ПТП щільності теплового потоку q :

- для ізотермічного дроблення:

$$\Delta T_{\text{ІЗ}} = q \cdot \frac{h_{\text{ТБ}} \cdot \Phi}{\lambda_3} \cdot \frac{1}{\Lambda_{1,2} + \Lambda_{3,4}}, \quad (5)$$

- для адіабатно-ізотермічного дроблення:

$$\Delta T_{\text{АД}} = q \cdot \frac{h_{\text{ТБ}} \cdot \Phi}{\lambda_3} \times \frac{b}{\Lambda_{1,2} \cdot (\Lambda_{3,4} + b) - (h_{\text{ТБ}} / h_{\text{Ш}}) \cdot \Lambda_{3,4} \cdot (\Lambda_{1,2} - b)}. \quad (6)$$

Зважаючи на формули (3), (5) і (6), визначаємо приведену чутливість для розглянутих варіантів дроблення:

- для ізотермічного дроблення:

$$S_{\text{ІЗ}} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\lambda_3 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21} / f_{21}) \cdot (\Lambda_{1,2} + \Lambda_{3,4})}, \quad (7)$$

- для адіабатно-ізотермічного дроблення:

$$S_{\text{АД}} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot b}{\left(\lambda_3 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21} / f_{21}) \times \left[\Lambda_{1,2} \cdot (\Lambda_{3,4} + b) - (h_{\text{ТБ}} / h_{\text{Ш}}) \cdot \Lambda_{3,4} \cdot (\Lambda_{1,2} - b) \right] \right)}. \quad (8)$$

Відзначимо, що формула (7), за відсутності шунта й температуровирівнювального покриття ($h_5 = 0$, $f_{41} = 0$), еквівалентна формулі (2).

Уточнене результувальне значення приведеної чутливості ПТП визначається як середнє значення чутливостей для ізотермічного й адіабатно-ізотермічного дроблення:

$$S_{\text{ІЗ,АД}} = 0,5 \cdot (S_{\text{ІЗ}} + S_{\text{АД}}). \quad (9)$$

Тепловий опір термоелектричних ПТП розраховується за формулами:

$$R_{\text{ПТП}} = 0,5 \cdot (R_{\text{ІЗ}} + R_{\text{АД}}), \quad (10)$$

$$R_{\text{ІЗ}} = \frac{2h_5}{\lambda_5} + \frac{h_{\text{Ш}} \cdot \Phi}{\lambda_3 \cdot (\Lambda_{3,4} + b)} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{ТБ}}}{h_{\text{Ш}}} \cdot \frac{\Lambda_{1,2} - b}{\Lambda_{1,2} + \Lambda_{3,4}} \right), \quad (11)$$

$$R_{\text{АД}} = \frac{2h_5}{\lambda_5} + \frac{h_{\text{Ш}} \cdot \Phi}{\lambda_3} \times \frac{\Lambda_{1,2} - (h_{\text{ТБ}} / h_{\text{Ш}}) \cdot (\Lambda_{1,2} - b)}{\Lambda_{1,2} \cdot (\Lambda_{3,4} + b) - (h_{\text{ТБ}} / h_{\text{Ш}}) \cdot \Lambda_{3,4} \cdot (\Lambda_{1,2} - b)} \quad (12)$$

Формули (10) — (12) еквівалентні рішенням, отриманим у [5], однак використовують інші позначення параметрів.

Для перевірки коректності отриманих співвідношень спеціально виготовлено ряд перетворювачів на базі константану (дріт-основа) з нікелевим покриттям. Характеристики конструкції перетворювачів: діаметр ПТП — 60 мм; діаметр дроту-основи $d = 0,1$ мм; щільність укладання термоелементів $n = 3,6$ мм²; формпараметр $\Phi \approx 35$; висота термобатареї $h_{\text{ТБ}} = 1,25$ мм; товщина ПТП $h_{\text{ПТП}} = 1,4$ мм. Відносний перетин нікелевого покриття варіювався від $f_{21} = 0,12$ до $f_{21} = 1,1$. У виготовлених перетворювачах відсутні шунти й температуровирівнювальні покриття, тому $h_5 = 0$; $f_{41} = 0$; $h_{\text{ПТП}} = h_{\text{Ш}}$; $\Lambda_{3,4} = f_{31} = \Phi - b$. За формування ПТП використано компаунд на базі епоксидного полімеру УП-610 із вмістом 250 % наповнювача — порошку корунду. Чутливість перетворювачів і коефіцієнт теплопровідності компаунда визначено на еталонній установці УВТ-1 [7] в діапазоні температури від 323 до 463 К. Результати розрахунків приведеної чутливості за ізотермічного й адіабатно-ізотермічного дроблення, а також уточненого середнього значення відповідно до формул (7) — (9) і експериментальних досліджень представлено на рис. 2 у виді графіків залежностей приведеної чутливості від відносного перетину нікелевого покриття f_{21} . Усі результати відносяться до середньої температури ПТП 323 К. Як випливає з наведених графіків, результати експериментально виміреної приведеної чутливості достатньо добре відповідають значенням, отриманим відповідно до запропонованої розрахункової методики.

Значення коефіцієнтів теплопровідності, термоелектричних коефіцієнтів і питомого опору матеріалів

суттєво залежать від температури, внаслідок чого приведена чутливість також має температурну залежність. На рис. 3 наведено графіки температурних залежностей приведеної чутливості ПТП для трьох значень відносного перетину нікелевого гальванічного покриття, отримані за пропонованою уточненою методикою з урахуванням температурних залежностей властивостей матеріалів. На цьому ж рисунку показано експериментально отримані значення чутливості відповідних перетворювачів. Дані експериментів достатньо добре відповідають результатам розрахунків, а чутливість перетворювача із $f_{21} = 1,1$ практично не залежить від температури, що свідчить стосовно можливості створення ПТП, чутливих до теплового потоку, але інваріантних до зміни температури.

На практиці помічено, що мала товщина захисного шару компаунда, що відокремлює спаї термобатарей від поверхні ПТП, впливає на його чутливість. Це явище може негативно позначати-

ся на точності вимірювань у випадку, коли калібрування й експлуатація перетворювача відбуваються за різних умов теплообміну, наприклад, калібрування — за кондуктивного способу підведення теплоти, а експлуатація — за радіаційно-конвективного. У [8] для стабілізації чутливості ПТП рекомендується виконувати захисний шар товщиною (0,1...0,5) мм. У той же час традиційна формула (2) не демонструє залежності чутливості від товщини захисного шару компаунда. У пропонованій уточненій методиці

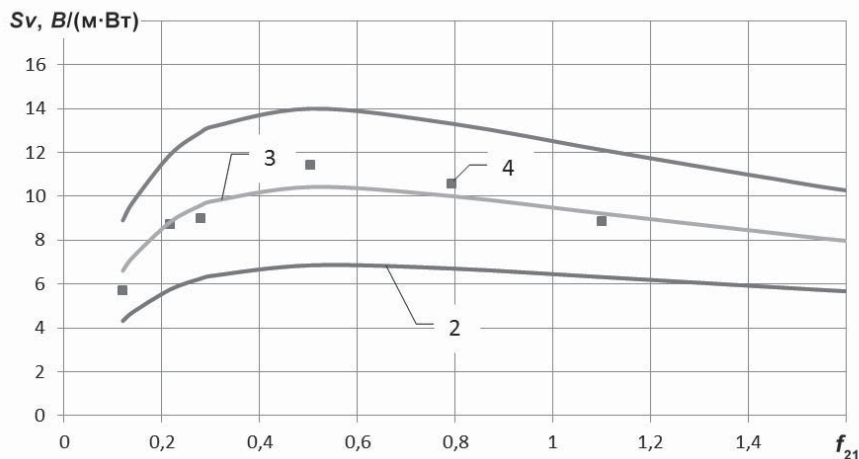


Рис. 2. Залежності приведеної чутливості від відносного перетину нікелевого покриття f_{21} :

1 — для ізоtermічного дроблення $S_{V,ІЗ}$; 2 — для адіабатно-ізоtermічного дроблення $S_{V,АД}$;

3 — результувальне значення $S_{V,РЕЗ}$; 4 — експериментальні дані $S_{V,ЕКСП}$.

Fig. 2. Graphs of the comparative sensitivity depending on the relative cross-sectional area of the nickel plating: 1 — for the isothermal fragmentation; 2 — for adiabatic-isothermal fragmentation;

3 — the resulting value; 4 — experimental data.

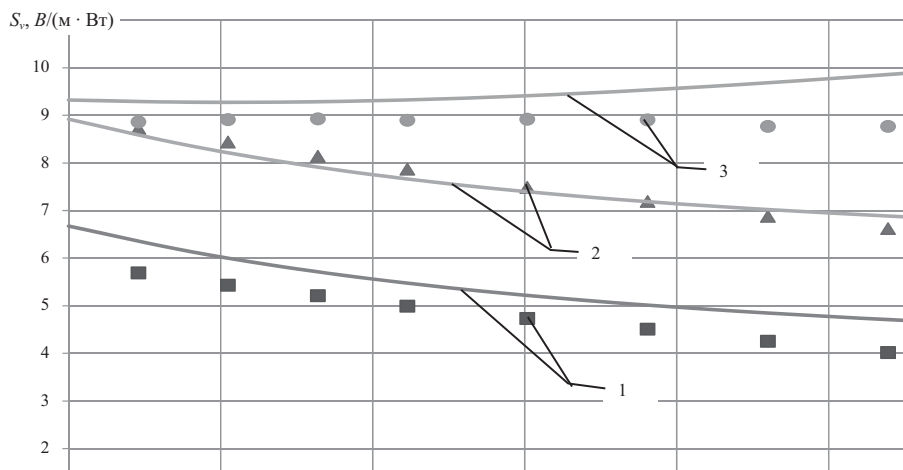


Рис. 3. Розрахункові (суцільні лінії) й експериментальні (точки) температурні залежності приведеної чутливості ПТП для трьох значень відносного перетину нікелевого гальванічного покриття: 1 — $f_{21} = 0,12$; 2 — $f_{21} = 0,217$; 3 — $f_{21} = 1,1$.

Fig. 3. Calculated (solid lines) and experimental (points) the temperature dependence of the comparative sensitivity of HFT for three values of the relative cross-sectional area of nickel plating: 1 — $f_{21} = 0,12$; 2 — $f_{21} = 0,217$; 3 — $f_{21} = 1,1$.

розрахунків таку залежність урахувано присутністю у знаменнику формули (8) множника, рівного відношенню висоти термобатарей й шунта (або ПТП). На рис. 4 представлено графіки залежності приведеної чутливості ПТП без шунтів і температуровирівнювальних пластин від відношення $h_{ПТП}/h_{ТБ}$ за варіації формпараметра Φ для константан-нікелевих і константан-мідних термобатарей.

Графіки свідчать, що в діапазоні значень відношення $h_{ПТП}/h_{ТБ}$ від 1,0 до 1,2 чутливість суттєво залежить

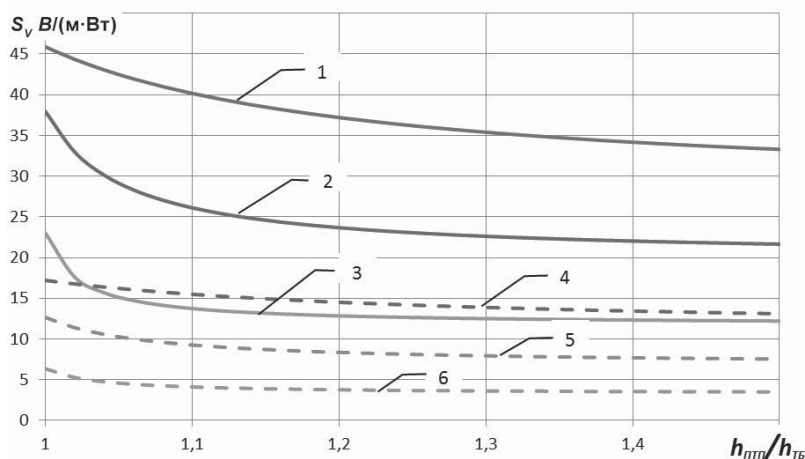


Рис. 4. Залежності приведеної чутливості від відношення $h_{\text{ПТП}}/h_{\text{ТБ}}$ за варіації формпараметра Φ для константан-мідних (суцільна лінія) і константан-нікелевих (пунктир) термопар:

1 — Con-Cu, $\Phi = 10$; 2 — Con-Cu, $\Phi = 50$; 3 — Con-Cu, $\Phi = 200$;
4 — Con-Ni, $\Phi = 10$; 5 — Con-Ni, $\Phi = 50$; 6 — Con-Ni, $\Phi = 200$.

Fig. 4. Graphs of the comparative sensitivity depending on relationship $h_{\text{ПТП}}/h_{\text{ТБ}}$ with variation of parameter Φ for copper-constantan (solid line) and constantan-nickel (dotted line) thermopile:

1 — Con-Cu, $\Phi = 10$; 2 — Con-Cu, $\Phi = 50$; 3 — Con-Cu, $\Phi = 200$;
4 — Con-Ni, $\Phi = 10$; 5 — Con-Ni, $\Phi = 50$; 6 — Con-Ni, $\Phi = 200$.

від товщини захисного шару, а за $h_{\text{ПТП}}/h_{\text{ТБ}} \geq 1,2$ значення приведеної чутливості стабілізується, і подальше збільшення товщини захисного шару мало впливає на неї. Отже, дійсно можна рекомендувати для

найпоширеніших перетворювачів висотою $h_{\text{ПТП}} \approx (1...4)$ мм, виконувати захисні шари із двох сторін ПТП товщиною $(0,1...0,4)$ мм.

ВИСНОВКИ

Методом дроблення одиничного елемента перетворювача теплового потоку ізотермічними й адіабатними площинами отримані нові уточнені формули для розрахунків приведеної чутливості біметалевих гальванічних ПТП виду допоміжної стінки. Експериментальні дослідження партії константан-нікелевих перетворювачів з різними перетинами гальванічного покриття підтверджують вірогідність запропонованих розрахункових формул. Отримані результати теоретично підтверд-

жують відомий із практики факт залежності чутливості від товщини захисного шару компаунда й дозволяють оцінити необхідне значення цієї товщини для стабілізації характеристик перетворювача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Геращенко О.А. Основи теплотерії. К.: Наук. думка (Geraschenko O. Fundamentals of heat flow measurement. Kiev: Naukova dumka), 1971. 192 с/р.
2. Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови: ДСТУ 3756-98. — К.: Держспоживстандарт України (Energy-saving. Thermoelectric transformers of heat flow for general purpose. General specifications: ДСТУ 3756-98. — [Valid from 2000-07-01]. Derghspoghivstandart), 2000. 21 с/р. — (Національний стандарт України).
3. Грищенко Т.Г. Тепловий потік і методи його вимірювання / Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробієв Л.Й. // Метрологія та прилади (Grishchenko T., Dekusha L., Vorobiov L. (2009). A heat flow and methods of measurement. Metrology and Instruments), 2009, № 2. — С/Р. 3—11.
4. Геращенко О.А. Методика конструювання оптимальних перетворювачів теплового потоку / О.А. Геращенко, Т.М. Грищенко, Л.В. Декуша // Проблеми енергозбереження — Наук. думка (Geraschenko O., Grishchenko T., Dekusha L. The technique constructing optimal heat flow transducers. Problems of Energy Saving), 1990, № 3. — С/Р. 36—42.
5. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопровідність сумішей і композиційних матеріалів. — Л.: Енергія (Dulnev G., & Zarichnyak Y. Thermal conductivity of mixtures and composite materials. L: Energy), 1974. — 264 с/р.
6. Грищенко Т.Г. Ефективний тепловий опір перетворювача теплового потоку виду допоміжної стінки / Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Шмаров Є.В., Воробієв Л.Й. // Метрологія та прилади (Grishchenko T., Dekusha L., Shmarov I. Effective thermal resistance of heat flow transducer type auxiliary wall. Metrology and Instruments), 2012, № 6. — С/Р. 20—26.
7. Ковтун С.І. Апаратне забезпечення перевіркової схеми для теплових вимірювань / С.І. Ковтун, Т. М. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.І. Воробієв // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» (Kovtun S., Grishchenko T., Dekusha L., Vorobiov L. Instrumental verification scheme to ensure a heat flow measurement. Measuring Equipment and Metrology). 2008. № 68. С/Р. 126—133.
8. Van der Graaf F. Heat-flux Sensor/ F. van der Graaf // Chapter 8 of Volume 4 Thermal Sensors. VCH Verlagsgesellschaft mbh. P.O.Box 1011611, D-6940 Weinheim, FRG. 1990. 28 p.

Отримано / received: 14.04.2015.

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

УДК 551.510.534:621.383.52

МЕТРОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОВІРКИ І ГРАДУЮВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ У ВИДИМОМУ ДІАПАЗОНІ СПЕКТРА

Б. Шабашкевич, кандидат технічних наук, директор,

Ю. Добровольський, кандидат технічних наук, заступник директора,
ТОВ «Науково-виробнича фірма «Тензор» («НВФ «Тензор»», м. Чернівці,

В. Юр'єв, начальник СКБ ВАТ «ЦКБ Ритм», м. Чернівці

Розроблено комплекс метрологічного обладнання для забезпечення метрологічних досліджень засобів вимірювальної техніки для контролювання світлотехнічних величин (ЗВТСВ), призначених для вимірювання таких світлотехнічних параметрів як сила світла, освітленість та коефіцієнт пульсації джерел світла, який має розширений діапазон вимірювання світлотехнічних одиниць та мінімальні похибки їх вимірювання.

The complex of metrology equipment for metrological studies of measuring instruments light environment parameters for measuring parameters such as the lighting intensity, lighting and ripple of light sources, which has an extended measurement range of lighting units and minimal error of measurement.

Ключові слова: метрологічне обладнання, світлотехнічні одиниці, градуювання, похибка, спектр.
Keywords: metrology equipment, lighting units, calibration, error, spectrum.

Метрологічне забезпечення ЗВТ передбачає наявність на виробництві відповідного комплексу обладнання. У випадку світлотехнічних вимірювань потрібно не лише передати ЗВТ одиницю сили світла, освітленості та яскравості з певною похибкою вимірювання, а і визначити його динамічний діапазон (діапазон вимірювання світлотехнічних одиниць та лінійність ЗВТСВ у цьому діапазоні) та здатність контролювати коефіцієнт пульсації джерел світла згідно з [1].

Наявне метрологічне обладнання для калібрування, атестації та повірки ЗВТСВ, яке використовують у метрологічних центрах та на підприємствах — виробниках, не повною мірою забезпечує вимоги ринку, що постійно зростають [2—6].

У зв'язку з цим *мета статті* — розроблення низки новітнього метрологічного обладнання для вирішення зазначеної проблеми.

Основні вимоги, які сьогодні висувають до ЗВТСВ в Україні, країнах СНД та у світі — це розширення діапазону вимірювання світлотехнічних одиниць за мінімізації відповідних похибок.

Зокрема, згідно з [1] діапазон вимірювання освітленості повинен бути від 10^{-2} до 2×10^5 лк, яскравості $(1-2 \times 10^5)$ Кд/м², коефіцієнта пульсації $(1-100)\%$. Відповідно межі допустимої основної відносної похибки вимірювання освітленості повинні бути $\pm 5\%$, яскравості $\pm 8\%$, коефіцієнта пульсації $\pm 8\%$ [7].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення зазначених завдань у ТОВ «НВФ «Тензор» розроблено низку новітнього метрологічного обладнання, зокрема, комплекс для повірки і градуювання



Б. Шабашкевич



Ю. Добровольський



В. Юр'єв

оптоелектронних приладів у видимому діапазоні спектра, до складу якого входять:

- установка для вимірювання світлових параметрів оптоелектронних приладів ИДНМ4.003.00.00;
- стенд для створення стабільних потоків випромінювання ИДНМ4.004.00.00;
- установка для перевірки оптоелектронних приладів, призначених для вимірювання коефіцієнта пульсації, ИДНМ4.024.00.00.

Установка ИДНМ4.003.00.00 складається з освітлювача, світлоізолюваної робочої камери, робочого еталона — головки вимірювальної фотометричної (ГВФ), перетворювача струм-напруга ППТН-02, вольтметра цифрового В7-34А, рейки для кріплення екранів та робочого еталона, рейтера зі стійкою та кільцем для кріплення робочого еталона на рейці, екрана та екрана-розсіювача, блока живлення освітлювача та амперметра.

Зовнішній вид установки подано на рис. 1, структурну схему установки — на рис. 2.

За знятого екрана з розсіювачем освітлювач створює в площині головки фотометричної (ГФ) вимірюваного електронно-оптичного приладу освітленість від 10 до 200 лк. Зміна освітленості здійснюється за допомогою зміни відстані між джерелом випромінювання та ГФ. Точне значення освітленості визначається за допомогою робочого еталона.

Величину освітленості (E) в площині фоточутливого елемента (ФЧЕ) ГФ обчислюють за формулою:

$$E = U_{\text{ГФ}} / K_{\text{пр}} \cdot S_{\text{инт}}, \quad (1)$$

де E — освітленість в площині ФЧЕ ГВФ, лк; $U_{\text{ГФ}}$ — фотосигнал, зчитаний з вольтметра В7-34А, В; $K_{\text{пр}}$ — коефіцієнт перетворення ППТН-02 згідно з положенням перемикача К, В/А; $S_{\text{инт}}$ — інтегральна чутливість ГВФ згідно з її паспортом, А/лк.

У випадку, якщо інтегральну чутливість ГВФ визначено до світлового потоку (А/лм), освітленість

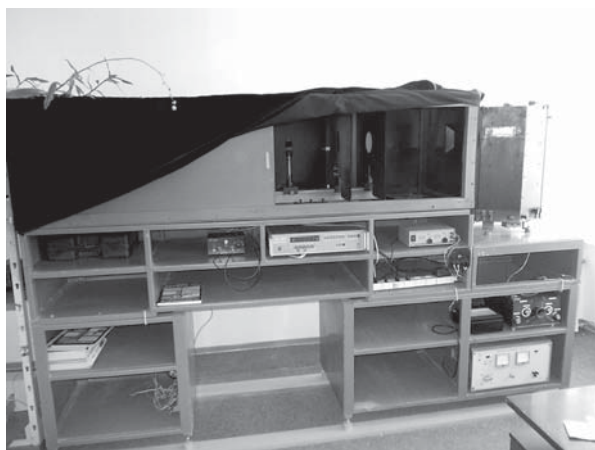


Рис. 1. Зовнішній вид установки ИДНМ4.003.00.00

Fig. 1. Appearance settings IDNM4.003.00.00

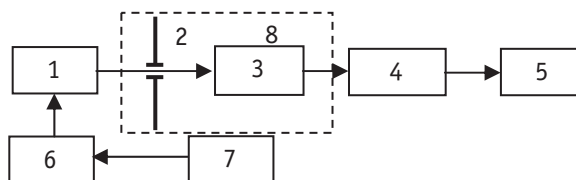


Рис. 2. Структурна схема установки ИДНМ4.003.00.00:

1 — лампа розжарювання, джерело з кольоровою температурою $T_k = (2856 \pm 100) \text{ K}$; 2 — екран (або екран з розсіювачем); 3 — робочий еталон — головка вимірювальна фотометрична; 4 — перетворювач струм-напруга ППТН-02; 5 — вольтметр В7-34А; 6 — ампервольтметр М2015; 7 — блок живлення освітлювача Б5-21; 8 — світлоізолювана робоча камера.

Fig. 2. Block diagram of the installation IDNM4.003.00.00

обчислюють за формулою:

$$E = U_{\text{ГФ}} / K_{\text{пр}} \cdot S_{\text{инт}} \cdot A_{\text{ФЧЕ}}, \quad (2)$$

де $A_{\text{ФЧЕ}}$ — площа фоточутливого елемента ГФ, рівна $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

За калібрування електронно-оптичних приладів за яскравістю використовують екран з розсіювачем, який є вторинним джерелом з визначеною в процесі роботи яскравістю.

Яскравість розсіювача (L) розраховують за формулою:

$$L = E \cdot l^2 / A_{\text{діафр}}, \quad (3)$$

де L — яскравість розсіювача, кд/м²; E — освітленість, визначена за формулою 1 (2), лк; l — відстань між розсіювачем та ФЧЕ, м; $A_{\text{діафр}}$ — площа діафрагми екрана з розсіювачем, $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Для передавання електронно-оптичним приладам одиниці сили світла використовують джерело з відомою силою світла або, в процесі роботи, за допомогою робочого еталона, визначають силу світла джерела випромінювання, що входить до складу освітлювача установки.

Силу світла джерела випромінювання ($I_{\text{дж}}$) розраховують за формулою:

$$I_{\text{дж}} = E \cdot l^2, \quad (4)$$

де $I_{\text{дж}}$ — сила світла джерела випромінювання, кд; E — освітленість, визначена за формулою 1 (2), лк; l — відстань між ФЧЕ та площиною тіла розжарювання джерела випромінювання, м, яка повинна бути визначена з похибкою $\pm 0,005 \text{ м}$.

Основні технічні характеристики установки ИДНМ4.003.00.00 за передавання ЗВТСВ такі:

- діапазон створюваних (установлених) освітленостей — від 10 до 200 лк;
- допустима основна відносна похибка установлення освітленості міститься в межах $\pm 2,0\%$;
- діапазон установлення яскравості — від 30 до 100 кд/м²;

- допустима основна відносна похибка установлення яскравості міститься в межах $\pm 3\%$;
- діапазон вимірювання сили світла джерел випромінювання від 1 до 100 000 кд;
- допустима основна відносна похибка вимірювання сили світла міститься в межах $\pm 3\%$;
- освітлювач установки є джерелом з кольоровою температурою $T_k = (2856 \pm 100) \text{ K}$.

Відносні спектральні характеристики чутливості $S_{\text{отн.}}(\lambda)$ робочих еталонів — ГВФ відновлюють відносну спектральну світлову ефективність монохроматичного випромінювання для денного зору $V(\lambda)$ з відхиленнями:

- ♦ в області довжин хвиль від 0,4 до 0,75 мкм ($|\Delta_{\text{max}}|$), не більшими 3%;
- ♦ в області довжин хвиль від 0,3 до 0,4 мкм (α_{yf}) і від 0,75 до 1,2 мкм ($\alpha_{\text{нк}}$), не більшими 0,5%.

Стенд для створення стабільних потоків випромінювання ИДНМ4.004.00.00 призначений для вимірювання енергетичних характеристик; визначення нелінійності перетворення вхідного оптичного сигналу на вихідний електричний та динамічного діапазону фотоприймачів і електронно-оптичних приладів. Складається він з освітлювача та блока живлення.

Структурну схему освітлювача стенда наведено на рис. 3. Зовнішній вид стенда ИДНМ4.004.00.00 подано на рис. 4.

На лицевій стінці освітлювача розміщено: вихідне вікно 9, яке має різьбове з'єднання М42; ручки механізмів зміни положення послаблювальних елементів 1, 2, 3, 4 і перемикачі, за допомогою яких перекиваються потоки випромінювання — в положенні 3 потік перекритий, в положенні В — відкритий.

Оптична схема — це два канали, в кожному з яких розміщено: джерело випромінювання — лам-

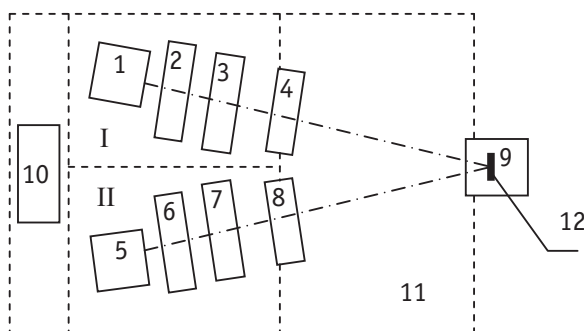


Рис. 3. Структурна схема освітлювача стенда ИДНМ4.004.00.00:

- 1, 5 — лампа розжарювання КГМ12-100;
2, 6 — об'єктив «Юпитер-3»; 3, 7 — турель зі світлофільтрами; 4, 8 — світлонепроникний екран;
9 — вихідне вікно освітлювача; 10 — вентилятор;
11 — корпус освітлювача; 12 — площа установлення фоточутливого елемента

Fig. 3. Block diagram illuminator stand IDNM4.004.00.00

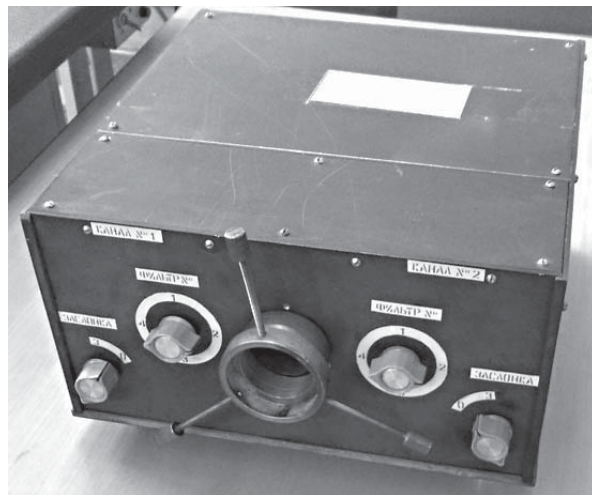


Рис. 4. Зовнішній вид стенда ИДНМ4.004.00.00

Fig. 4. Appearance stand IDNM4.004.00.00

пу розжарювання; оптичну систему — світлосильний фотооб'єктив; ослаблювач оптичного потоку — турель зі світлофільтрами та непрозорий екран. Конструкція освітлювача, за допомогою різьбового з'єднання, забезпечує кріплення вимірюваного фотоприймача на вихідному вікні освітлювача так, що його фоточутливий елемент міститься у площині формування світлових зондів 12 та виключає вплив розсіяного світла і сторонніх джерел випромінювання.

Основні технічні характеристики стенда ИДНМ4.004.00.00 за дослідження ЗВТСВ такі:

- ▲ максимальний рівень створюваної освітленості — не менший 100 000 лк;
- ▲ мінімальний рівень освітленості — не менший 0,001 лк;
- ▲ нестабільність потоку випромінювання — не більший $\pm 1,0\%$;
- ▲ коефіцієнт дискретного ослаблення потоку випромінювання ($K_{\text{осл}}$) в кожному оптичному каналі за положення перемикача: 1 — без ослаблення; 2 — $10 \pm 30\%$; 3 — $100 \pm 30\%$; 4 — $1000 \pm 30\%$.

Загалом, комплекс для перевірки і градування оптоелектронних приладів у видимому діапазоні спектра в складі установки ИДНМ4.003.00.00 та стенда ИДНМ4.004.00.00 дозволяє виконувати вимірювання з похибкою, не більшою $\pm 3\%$:

- ▼ у діапазоні вимірювання освітленості від $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^5$ лк;
- ▼ у діапазоні вимірювання сили світла від 1 до $2 \cdot 10^5$ кд;
- ▼ у діапазоні вимірювання яскравості від 7 до $1,2 \cdot 10^5$ кд/м².

Установку ИДНМ4.024.00.00 розроблено для створення та вимірювання потоків, що пульсують, оптичного випромінювання видимого діапазону

спектра для перевірки фотоприймачів і електронно-оптичних приладів та дослідження особливостей вимірювання коефіцієнта пульсації світла. Її зовнішній вид наведено на рис. 5. Структурну схему освітлювача подано на рис. 6, установки в цілому — на рис. 7.

В установці використано два джерела випромінювання, що пульсує: джерело типу А з модуляцією потоку випромінювання за допомогою механічного модулятора або набір світлодіодів білого світла, живлення яких включено через генератор імпульсів відповідної нормованої тривалості. Обидва джерела можна застосувати під час калібрування фотометрів за коефіцієнтом пульсації світла.

Установка складається із освітлювача, двох блоків живлення, генератора низькочастотного, осцилографа та комп'ютера.

На лицевій стінці освітлювача розміщено: вихідне вікно джерела модульованого випромінювання, яке має різьбове з'єднання М42; ручки механізмів зміни положення послаблювальних елементів 5, 6; перемикачі, за допомогою яких перекриваються потоки випромінювання.

Оптична схема — це два канали: один забезпечує створення модульованого потоку випромінювання за допомогою механічного модулятора 4; другий — немодульованого потоку за допомогою світ-

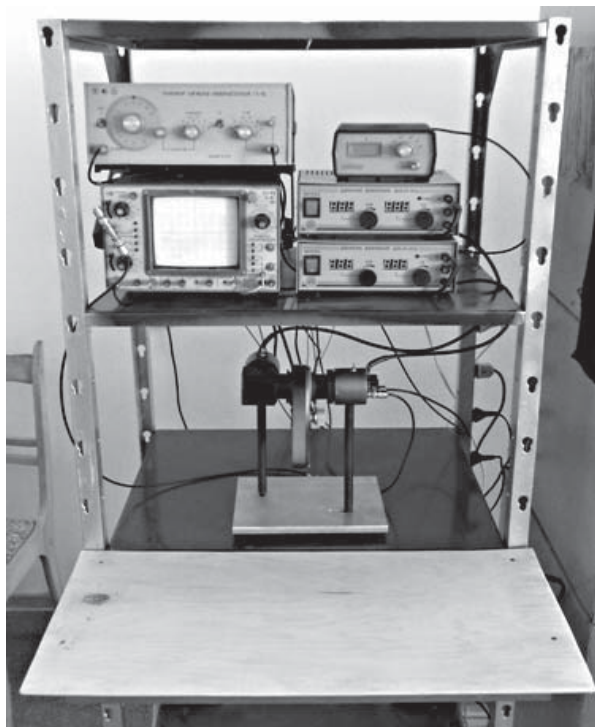


Рис. 5. Зовнішній вид конструкції установки для вимірювання параметрів фотометрів-пульсметрів ІДНМ4.024.00.00

Fig. 5. Exterior construction installation photometers to measure-pulsimeters IDNM4.024.00.00

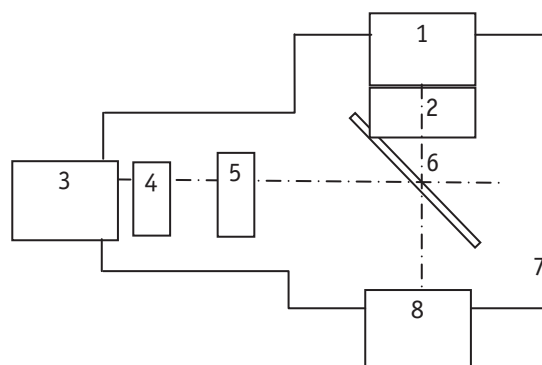


Рис. 6. Структурна схема освітлювача:

- 1 — джерело немодульованого випромінювання;
2 — набір світлофільтрів; 3 — джерело модульованого випромінювання; 4 — механічний модулятор або світлодіоди; 5 — набір світлофільтрів; 6 — напівпрозоре дзеркало (світлоподільний кубик); 7 — прозорий корпус;
8 — непрозорий тубус

Fig. 6. Block diagram lightbox

лодіодного джерела, живлення якого здійснюється за допомогою блока постійного струму.

Конструкція освітлювача, за допомогою різьбового з'єднання, забезпечує кріплення вимірюваного фотоприймача на вихідному вікні освітлювача так, що його фоточутливий елемент міститься у площині формування світлового зонда та виключає вплив розсіяного світла і сторонніх джерел випромінювання.

Процедура вимірювання здійснюється у такий спосіб: за допомогою блока живлення освітлювача встановлюється робочий режим джерела немодульованого випромінювання. Зміна світлового потоку здійснюється за допомогою послаблювальних елементів та зміни струму джерела випромінювання. Максимальна освітленість фоточутливого елемента забезпечується за встановлення турелі з нульовим послабленням (без світлофільтрів у положенні 1) та максимального струму.

Модуляція створюваного потоку випромінювання у першому випадку здійснюється за допомогою механічного модулятора. Частоту модуляції світлового потоку контролюють за допомогою осцилографа 15. Модуляція у другому випадку здійснюється за допомогою освітлювача на основі білих світлодіодів. Створюваний ними світловий потік модулюється за допомогою джерела їх живлення або генератора ГЗ-112.

За допомогою контрольного фотоприймача отримують значення максимальної (E_{\max}), мінімальної (E_{\min}) та середньої (E_{cp}) освітленостей та розраховують коефіцієнт пульсації (K_n):

$$K_n = [(E_{\max} - E_{\min}) / E_{\text{cp}}] \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Замість контрольного ФП установлюють досліджуваний фотометр і, в режимі вимірювань коефіцієнта

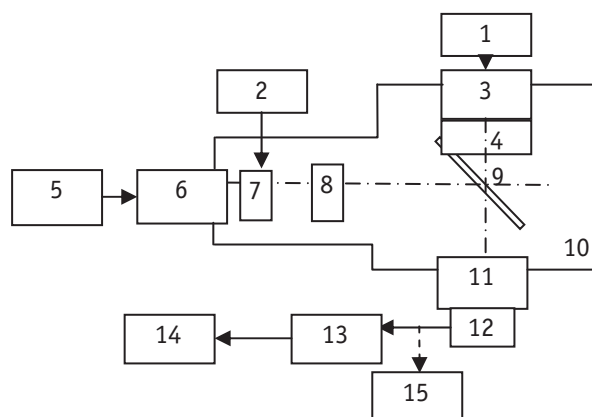


Рис. 7. Структурна схема установки
ИДНМ4.024.00.00:

1 — блок живлення джерела немодульованого випромінювання (Б5-43); 2 — блок живлення модулятора (Б5-43) або генератор ГЗ-112; 3 — джерело немодульованого випромінювання; 4 — набір світлофільтрів; 5 — блок живлення модульованого випромінювання (Б5-43); 6 — джерело модульованого випромінювання; 7 — механічний модулятор або світлодіоди; 8 — набір світло-фільтрів; 9 — напівпрозоре дзеркало (світло-подільний кубик); 10 — непрозорий корпус; 11 — непрозорий тубус; 12 — фотометрична головка пульсметра-люксметра; 13 — електронний блок пульсметра-люксметра; 14 — комп'ютер; 15 — осцилограф С1-83

Fig. 7. Block diagram of the installation IDNM4.024.00.00

пульсацій, вимірюють коефіцієнт та визначають похибку вимірювань.

Технічні характеристики установки такі:

- джерело модульованого (І-й канал) потоку випромінювання забезпечує зміну частоти модуляції випромінювання в межах від 50 до 200 Гц;

- ▶ середнє значення освітленості, створюваної джерелами в площині фоточутливого елемента пульсметра має фіксоване значення в межах (10—1000) лк;

► в установці забезпечується дискретна зміна рівнів освітленостей. Зміна рівнів забезпечує такий ряд коефіцієнтів пульсацій (в межах): (1—2); (5—10); (40—50) та (90—100)%;

► основна відносна похибка визначення фактичного значення коефіцієнта пульсацій (δ_K) не виходить за межі $\pm 10\%$;

► діаметр світлової плями в площині фоточутливого елемента пульсметра — не менший 30 мм;

► нерівномірність світлового поля в діаметрі 25 мм не перевищує 5%:

► нестабільність освітленості — не більша $\pm 2\%$.

Метрологічні параметри установки для створення максимальної освітленості оцінюють у такий спосіб: вимірювання максимального рівня створюваної

освітленості (E_{\max}) виконують на установці, структурну схему якої наведено на рис. 8.

Робочий еталон (або ГВФ) розміщують на вихідному вікні освітлювача та під'єднують до ППТН-02. Перемикачі (обох каналів) з ослаблювальними світлофільтрами встановлюють у положення 1, перемикачі (обох каналів) — у положення 0. Вимірюють за допомогою вольтметра напругу фотосигнала U_c та визначають освітленість за формулою:

$$E_{\max} = U_c / S_{\text{INT}} \cdot K_{\text{пр}}, \quad (6)$$

де E_{\max} — величина освітленості, лк; U_c — напруга фотосигналу, В; $S_{\text{інт}}$ — інтегральна струмова чутливість фотометричної головки згідно з її паспортом, А/лк; $K_{\text{пр}}$ — коефіцієнт перетворення ППТН-02 згідно з його паспортом, В/А.

Вимірювання коефіцієнтів дискретного ослаблення потоку випромінювання виконують на установці, структурну схему якої наведено на рис. 7.

Для цього встановлюють перемикачі: першого каналу (I) — у положення 0, другого (II) — у положення 3.

За чергою встановлюють перемикач першого каналу з послаблювальними світлофільтрами у положення 5 та 6 і, за допомогою вольтметра, виконують вимірювання напруг фотосигналів відповідно U_1' та U_4' .

Величину фотоструму визначають за формулою:

$$I_{l(2)}^I = U_{l(2)}^I / K_{\text{np}}, \quad (7)$$

де $I'_{l(2)}$ — фотострум за встановлення перемикача відповідно у положення 5, 6, А; $K_{\text{пр}}$ — коефіцієнт перетворення ППТН-02 згідно з його паспортом, В/А.

Визначають коефіцієнти ослаблення світлофільтрів ($K_{2(3,4)}^I$) першого каналу за формулою:

$$K_2^I = I_1^I / I_2^I. \quad (8)$$

Далі встановлюють перемикач 5: першого каналу (I) — у положення 3, другого (II) — у положення 0 і, аналогічно з наведеною вище методикою, визначають коефіцієнти ослаблення світлофільтрів (K_2'') другого каналу за формулою 8, попередньо виміривши фотосигнали U_1'' та U_2'' та обчисливши фотоструми.

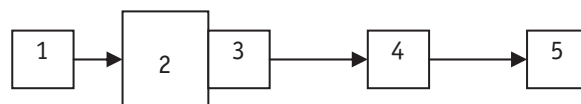


Рис. 8. Структурна схема установки для вимірювання максимального рівня створюваної освітленості:

1 — блок живлення Б5-21; 2 — освітлювач
ИДНМ4.004.00.00; 3 — еталонна фотометрична
голівка ИДНМ4.002.00; 4 — перетворювач
струм-напруга ППНТ-02; 5 — вольтметр цифровий
універсальний В7-34А

Fig. 8. The block diagram of the installation to measure the maximum level of illumination created


Результати повірки вважають задовільними, якщо значення коефіцієнтів ослаблення світлофільтрів $K_2^{I,II} = 10 \pm 20\%$.

ВИСНОВКИ

Розроблено комплекс метрологічного обладнання

для забезпечення метрологічних досліджень ЗВТСВ, призначених для вимірювання таких світлотехнічних параметрів, як сила світла, освітленість, яскравість та коефіцієнт пульсації джерел світла, що має розширений діапазон вимірювання світлотехнічних одиниць та мінімальні похибки їх вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28-2006. — [чинний від 2007-01-01]. К: ИСС «Зодчий»: «ИМЦ» (Natural and artificial lighting : DBN V.2.5-28-2006. — [Incumbent on 2007-01-01]. К: ISS «Architect», «IMTS»), 2006. — 76 с/р. (Державний стандарт України (State Standard of Ukraine)).
2. Добровольский Ю.Г. Прилади НВФ «Тензор» для метрологічних досліджень параметрів світлового середовища / Ю.Г. Добровольский, Б.Г. Шабашкевич // Світлотехніка та електроенергетика (Dobrovolsky Yu.G. Devices of SPC «Tensor» for metrological research parameters light environment / Yu.G. Dobrovolsky, B.G. Shabashkevych // Lighting and electricity). — 2009. — № 3. — С/Р. 25—29.
3. Державна повірочна схема для засобів вимірювань світлових величин: ДСТУ 3394-96. — [чинний від 1996-01-01]. К: Держстандарт України (State verification scheme for means of measuring light values: DSTU 3394-96. — [valid from 01.01.1996]. К.: State Standard of Ukraine), 1996. 5 с/р.
4. Купко А.Д. Основные задачи в области световых измерений / А.Д. Купко // Світлолюкс (Kupko A.D. The main tasks in the field of light measurement / A.D. Kupko // Svitlolyuks). — 2009. — № 4. — С/Р. 40—44.
5. Справочная книга по светотехнике. / под ред. Ю.Б.Айзенберга. — М.: Энергоатомиздат (Handbook of Illumination. / Ed. Yu.B.Ayzenberga. — М.: Energoatomizdat), — 1983. — 469 с/р.
6. Купко А.Д. Совершенствование методики передачи световых единиц / А.Д. Купко // Український метрологічний журнал (Kupko A.D. Improving methods of transmission of light units / A.D. Kupko // Ukraine metrological journal). — № 1. — 2001. — С/Р. 45—47.
7. Боднар Л.М. Дослідження параметрів вимірювачів освітленості з точки зору придатності для атестації робочих місць / Л.М. Боднар, Ю.Г. Добровольський, Б.Г. Шабашкевич, Л.А. Назаренко // Метрологія та прилади (Bodnar L.M. Research of the parameters meters illumination in terms of suitability for the job evaluation / L.M. Bodnar, Yu.G. Dobrovolsky, B.G. Shabashkevych, L.A. Nazarenko // Metrology and instruments). — № 4. — 2009. — С/Р. 19—23. 

Отримано / received: 10.06.2015.

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

УДК 620.165.29:614.894:628.511

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ВИБІРКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ПІВМАСОК

С. Чеберячко, кандидат технічних наук, доцент кафедри аерології та охорони праці,

Д. Радчук, кандидат технічних наук, доцент кафедри,

О. Яворська, кандидат технічних наук, доцент кафедри,

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

Досліджено вплив кількості випробуваних зразків на невизначеність вимірювань за опрацювання результатів випробувань. Встановлено, що визначена в нормативних документах вибірка зразків не забезпечує необхідної точності отриманих результатів. Запропоновано заходи щодо покращення точності за планування та опрацювання результатів, одним з яких є метод математичного моделювання.

The article investigated the influence of the number of samples that are tested on the measurement uncertainty in the processing of test results. It is found that the established in the regulatory documents sampling does not provide the necessary accuracy of the results. Proposed the methods to improve the accuracy in the planning and processing of the results, one of which is a method of mathematical modeling.

Ключові слова: невизначеність, випробувальна лабораторія, моделювання, випробувані зразки, виробничі випробування.

Keywords: uncertainty, testing laboratory, modeling, testing samples, industrial tests.

Проблема професійної захворюваності гірників на пневмоконіоз є дуже гострою. Незважаючи на наявний арсенал засобів знепилення, концентрація пилу у гірничих виробках інколи сягає 300—400 мг/м³. У такому випадку основним захисним пристроєм є протипиловий респіратор. Його використання нормується низкою нормативних актів з охорони праці [1–2], за якими роботодавець повинен забезпечити працівника засобами індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Проте, кількість захворювань на пилову етіологію не зменшується. Тому встановлення основних причин погіршення протипилового захисту працівників і пошук шляхів підвищення ефективності використання ЗІЗОД є актуальними питаннями.

Відомо, що вибір респіратора є важливою ланкою у системі збереження здоров'я працівників на виробництві. Допущені помилки можуть призвести до використання респіратора, який не відповідає умовам експлуатації. Необхідно ретельно оцінювати впливні чинники: ступінь захисту, опір диханню, концентрацію шкідливої речовини, ритм і темп роботи тощо. На більшість зазначених питань дає відповідь якісна перевірка ефективності ЗІЗОД у випробувальних лабораторіях. Однак, все ж таки після перевірок існує ймовірність потрапляння неякісних фільтрувальних півмасок на підприємства. Дослідження свідчать, що вона залежить від двох складових: величини невизначеності вимірювань через помилку оператора та точності методу випробувань. Якщо для зменшення першого чинника достатньо збільшити кількість досліджуваних зразків, то другий — потребує постійного пошуку новітніх технологій і значних матеріальних витрат. Втім аналіз вимог нових європейських



С. Чеберячко



Д. Радчук



О. Яворська

стандартів не дає відповіді, яка кількість зразків забезпечить мінімальну похибку вимірювань. Так, за випробувань фільтрувальних і еластомірних півмасок вимагається відібрати від певної партії ЗІЗОД більше двох десятків зразків для перевірки їхніх захисних і ергономічних властивостей. Поверхнєве вивчення наведених вимог свідчить, що нібито цього достатньо для оцінки одного якогось показника ЗІЗОД. Наприклад, для встановлення коефіцієнта проникнення необхідно перевірити дев'ять респіраторів. Однак, із них — три потрапляють без спеціальної підготовки, три — після попередньої температурної обробки і три — після попереднього механічного впливу. У кожній групі будуть відмінні значення коефіцієнта проникнення, які вже не можна об'єднати для розрахунку невизначеності вимірювань. Отже, стосовно якої високої точності випробувань може йти мова за оцінкою всього трьох зразків. Разом з тим зрозуміле й намагання розробників нормативних стандартів охопити якомога ширший спектр впливу умов на фільтрувальні ЗІЗОД. Ймовірно погіршення якості отриманих результатів у цьому випадку не розглядалося. Навіть одна помилка із трьох спроб може призвести до проходження третини неякісних ЗІЗОД, які підлягають сертифікації або оцінюванню придатності яких проводиться за стандартизованою методикою згідно з гармонізованими стандартами.

Мета публікації — встановлення доцільної кількості випробувальних зразків фільтрувальних півмасок, які забезпечать мінімальну невизначеність випробувань для зменшення вірогідності потрапляння на виробництво неякісних ЗІЗОД.

Завдання підвищення достовірності проведених лабораторних досліджень показників фільтрувальних ЗІЗОД є достатньо актуальним. Його вирішення дозволить зняти низку питань, пов'язаних з оцінкою ризику виникнення захворювань на пневмоконіози, а саме, за розрахунків пилового навантаження працівників. Так, відомого американського вченого М. Нікаса, який запропонував метод розрахунку реального коефіцієнта захисту респіраторів за виробничих умов, звинуватили у значній похибці отриманих ним даних [3], оскільки він не представив достатніх статистичних даних. Існує ряд проблем у забезпеченні точності вимірювань концентрації аерозолів під маскою. Наприклад, вважається, що нефільтроване повітря тече струмочками під маскою за вдихання, тому навіть розміщення зонда може призводити до значної похибки вимірювання [4]. Окрім того, на результати впливають і необхідність знімання півмасок під час експерименту, і спосіб відбору проб зовнішньої та підмаскової концентрації аерозолів, і складності використання ви-

мірювальної апаратури [5]. Щодо кількості випробувань, то в низці опублікованих робіт автори прямо зазначають, що їх збільшення істотно зменшує ймовірність потрапляння неякісного респіратора на виробництво [6, 7]. Такий підхід вимагає значної кількості проведених експериментів і серйозних витрат часу. Тому, для збільшення точності проведених експериментів, рекомендується використовувати методи моделювання. Одним із таких є метод «випадкових ефектів» (ANOVA) [8]. Також запропоновано для розрахунку кількості помилок використовувати метод біноміальних ймовірностей. Його використання можна приймати за визначення номінальної захисної ефективності респіратора, яку можна отримати лише внаслідок попередніх випробувань [9].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За розрахунку кількості необхідних зразків фільтрувальних півмасок для забезпечення потрібної невизначеності випробувань скористаємося відомим підходом, описаним у ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. «Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення».

Відповідно до стандарту похибку результатів вимірювання розраховують, зважаючи на оцінки середньоквадратичного відхилення результату вимірювання (випадкової похибки) та систематичної похибки, яка залежить від засобів вимірювання.

Від величини кількості зразків залежить випадкова похибка [10]. Для її визначення обчислюємо середнє значення коефіцієнта проникнення n -ної кількості виробів за формулою:

$$\overline{K_{\Pi}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\Pi i}, \quad (1)$$

де n — кількість виробів для випробування; $K_{\Pi i}$ — визначена за дослідом величина коефіцієнта проникнення i -го виробу.

Визначаємо середньоквадратичне відхилення S за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - \overline{K_{\Pi}})^2}. \quad (2)$$

Як бачимо, для зменшення показника S необхідно збільшувати кількість зразків для випробувань. При цьому важливою характеристикою є довірчий інтервал ε випадкової похибки, який встановимо за формулою:

$$\varepsilon = tS', \quad (3)$$

де t — коефіцієнт Ст'юдента, який вибираємо відповідно до довірчої ймовірності P і кількості спостережень n .

Таблиця 1. Умови проведення випробувань

Table 1. Test conditions

Тест-аерозоль	Хлорид натрію
Витрата повітря	95 дм ³ /хв
Діаметр частинок	0,6 мкм (середньомасовий)
Концентрація аерозолю до випробувань	(8 ± 4) мг/м ³
Засоби вимірювань концентрації	спектрофотометр
Час експозиції	до 3 хв після початку випробувань
Коефіцієнт проникнення за тест-аерозолем — хлоридом натрію	$K = \frac{C_1}{C_2},$ де C_1 — концентрація аерозолю після фільтра; C_2 — концентрація аерозолю до фільтра

Отже, раціональну кількість зразків для випробування визначимо внаслідок розрахунку мінімальної похибки вимірювань. Для цього виконаємо вимірювання коефіцієнта проникнення за нешкідливим тест-аерозолем — хлоридом натрію на фільтрувальних півмасках типу «Лепесток». Випробування проведемо відповідно до ДСТУ EN 149:2003. Умови випробування наведено у табл. 1.

На першому етапі для дослідження відібрано 30 респіраторів, які розділено на чотири групи. Перша складалася з трьох зразків, друга — з шести, третя — з дев'яти, четверта — з дванадцяти. Для кожної серії визначалося середнє значення коефіцієнта проникнення та його середньоквадратичне відхилення, усі зразки не мали попереднього підготування.

На другому етапі відібрані зразки проходили процедуру попереднього підготування, зазначеного в ДСТУ EN 149:2003: температурний вплив протягом 24 годин і моделювання «режиму носіння» — 10 разів протягом 20 хв. Без урахування технологічних перерв на приготування.

РЕЗУЛЬТАТИ І ПОЯСНЕННЯ

На рис. 1 наведено залежність середньоквадратичного відхилення від кількості досліджуваних зразків.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що збільшення кількості зразків, які підлягали перевірці, закономірно призводить до зменшення величини середньоквадратичного відхилення. Причому його значення практично вже не змінюється за кількості зразків більшої десяти. Разом з тим процедури по-

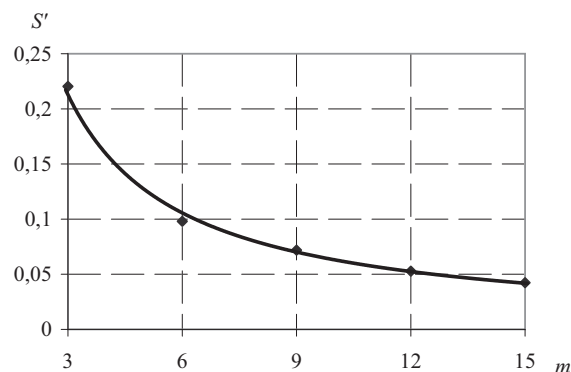


Рис. 1. Залежність величини відносного середньоквадратичного відхилення коефіцієнта проникнення за тест-аерозолем — хлоридом натрію від кількості зразків

(без попереднього підготування)

Fig. 1. The dependence of the relative standard deviation factor for the test aerosol penetration of the sodium chloride on the number of samples (without preparation)

переднього підготування погіршують однорідність отриманих результатів (рис. 2).

Скориставшись розрахунками, наведеними в [11], де зазначається, що для забезпечення високої точності випробувань середньоквадратичне відхилення повинно міститися в діапазоні від 0,05 до 1, встановлюємо, що кількість зразків для випробувань повинна складати не менше 9 одиниць.

Отже, виникає завдання із забезпечення високої точності проведення випробувань, яке вимагає дослідження значної кількості зразків і часу.

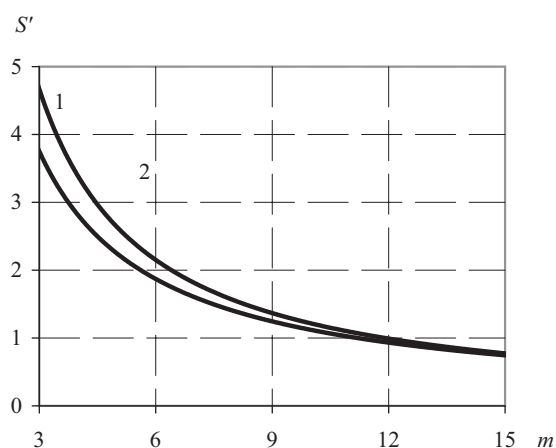


Рис. 2. Залежність величини відносного середньоквадратичного відхилення коефіцієнта проникнення за тест-аерозолем — хлоридом натрію від кількості спостережень: 1 — зразки, які піддавалися температурному впливу; 2 — зразки, які проходили «режим носіння»

Fig. 2. The dependence of the relative standard deviation factor for the test aerosol penetration of the sodium chloride on the number of observations: 1 — samples with temperature conditions; 2 — samples with «wearing conditions»

Наприклад, лише для визначення коефіцієнта захисту необхідно мінімум 36 респіраторів, що значно здорожчує випробування і збільшує його обсяг у два — п'ять разів залежно від виду випробувань та часу проведення.

Одним з виходів із такої ситуації є використання методів моделювання. Для цього потрібно скористатися методом Монте-Карло який дозволяє отримати значення великої кількості ймовірних значень концентрації аерозолу у підмасковому просторі ЗІЗОД.

Послідовність розрахунків цим методом полягає у встановленні параметрів розподілів зовнішньої та підмаскової концентрацій аерозолу, які потім використовували для розрахунку коефіцієнта проникнення

$$K_{\text{пр}} = \frac{C_i}{C_0}, \quad (1)$$

де C_i — концентрація аерозолу у підмасковому просторі; C_0 — його початкова концентрація.

Для визначення розподілу значень коефіцієнта проникнення ЗІЗОД обчислення виконувалися за допомогою спеціальної комп'ютерної програми Cristall Ball, яка автоматично вибирала вид розподілу для кожного конкретного випадку. Розглянемо приклад одиночного набору значень для C_0 , C_1 за витрати повітря 30 дм³/хв. Найбільш вірогідні значення — моди (пікові значення концентрації пилу) кожного із параметрів з визначеною частотою проявлення вводяться до формули (1) і розраховується значення $K_{\text{пр}}$. Цей процес повторювався для великої кількості незалежних змінних (10000 ітерацій). Результат представляється у виді діаграми, яка дозволяє пода-

ти всі можливі значення і вірогідність їх отримання (рис. 3).

Отже, зважаючи на отримані значення, показник ймовірності, появлення якого складає не менше 10 з частотою 1000, тепер можемо уточнити результати перевірки якості респіраторів за наведеною вище методикою розрахунку невизначеності вимірювань.

Відтак, виробники вже заздалегідь повинні мати відгуки з виробництв (оскільки матимуть попередні дані щодо параметрів роботи для випробувальної лабораторії), тому можуть пропонувати лише ті зразки, що забезпечать їх робітників лише якісними ЗІЗОД. Також необхідна постійна співпраця з випробувальними лабораторіями для накопичення статистичних даних з метою зменшення ймовірності потрапляння неякісних ЗІЗОД. Окрім того, бажано внести зміни до державних стандартів, що регламентують перевірку якості ЗІЗОД, які дозволять визначитися з кількістю зразків до випробувань. Рекомендується проводити перевірку з урахуванням лише тих чинників, які присутні на конкретному виробництві.

Розширити процедури контролю зі сторони Держнагляду за випробувальними лабораторіями. Ввести обов'язкові порівняльні міжлабораторні перевірки. Розробити стандарти з виробничої перевірки якості фільтрувальних ЗІЗОД.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що для забезпечення низької невизначеності вимірювань необхідна мінімальна кількість випробувальних зразків респіраторів або фільтрів повинна бути не меншою дев'яти одиниць для кожного типу (підготування) випробування.

Рекомендується перевірку ЗІЗОД розбити на два етапи: перший стосується загальної перевірки якості фільтрувальних респіраторів, які щойно виготовлені на виробництві (його проводять за чинними нормативними актами); другий повинен урахувати специфіку виробничого підприємства, де використовуватимуться ЗІЗОД (перевірка відбувається за одним найбільш важливим показником, але з достатньою кількістю зразків для забезпечення мінімальної похибки). Рекомендується, другий етап виконувати на виробництві на конкретних робочих місцях. Це потребує розроблення додаткових методичних рекомендацій для забезпечення таких досліджень.

Для збільшення достовірності отриманих результатів можна використовувати методи моделювання, які дають можливість отримати велику кількість результатів у заданому діапазоні й частоту їх повалення, що дозволить уточнити лабораторну перевірку ЗІЗОД.

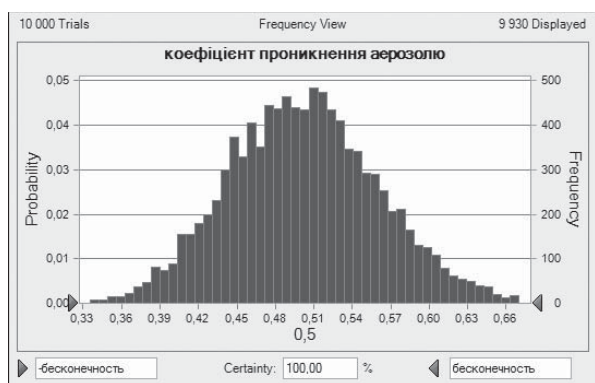



Рис. 3. Діаграма розподілу ймовірностей значень коефіцієнта проникнення аерозолу через респіратор, яка побудована для $GM C_0 = 8 \text{ мг/м}^3$; $GSD C_0 = 4$; $GM C_1 = 4 \text{ мг/м}^3$; $GSD C_1 = 0,01$ за витрати повітря 30 дм³/хв

Fig. 3. The probability distribution values of aerosol penetration through the respirator, which is built for $GM C_0 = 8 \text{ mg / m}^3$; $GSD C_0 = 4$; $GM C_1 = 4 \text{ mg / m}^3$; $GSD C_1 = 0.01$ at air flow 30 dm³/min

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Лепесток (Легкие респираторы) / Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. и др. — М.: Наука (Petrianov, I.V., Koshcheev, V.S., Basmanov, P.I. etc, Lepestok (Legkie respiratory) [Lepestok (Lightweight respirators)], Nauka, Moscow, Russia), 1984. — 218 с/р.
2. Методика выполнения измерений сопротивления постоянному потоку воздуха фильтрующих коробок к противогазам и респираторам, респираторов, фильтров респираторов и фильтрующих материалов: РНД 37.001-2001 / Разраб. НГАУ. — Днепропетровск (Metodika vypolneniya izmereniy soprotivleniya postoiannomu potoku vozduha filtruyushchikh korobok k protivogazam i respiratoram, respiratorov, filtrov respiratorov i filtruyushchikh materialov: RND 37.001-2001 / Razrab. NGAU. — Dnipropetrovsk), 2001. — 12 с/р.
3. Nicas M.A. Probability Model for Assessing Exposure Among Respirator Wearers: Part I — Description of the Model / M. Nicas and R.C. Spear. // American Industrial Hygiene Association Journal. — 1992. — Vol. 53. — № 7 — P. 411—418.
4. Crutchfield C.D. Effect of test exercises and mask donning on measured respirator fit / C.D. Crutchfield, E.O. Fairbank, S.L. Greenstein // Applied Occupational and Environmental Hygiene. — 1999. — Vol. 14. — P. 827—837.
5. Капцев В.А. Респираторы: защитные свойства в производственных условиях / В.А. Капцев. // Гигиена и санитария (Kartsev V.A. (2011), «Respirators: protective properties in working conditions», Gigiyena i sanitariya). — 2011. — № 4. — С/Р. 26—30.
6. Голінько В.І. До питання підвищення якості випробування протипилових респираторів / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, Т.О. Долгова // 36. наук.пр. НГУ (Holin'ko V.I., Cheberiachko S.I., Dolgova T.O. (2014), «About increasing of the testing quality of the particle respirators», Zbirnyk naukovikh prats NGU). — 2014. — Т/V. 1. — № 48. С/Р. 253—261.
7. Clifton D.C. Effect of Test Exercises and Mask Donning on Measured Respirator Fit / D.C. Clifton // Applied Occupational and Environmental Hygiene. — 1999. — № 14(12). — P. 827—837.
8. Wu Ming -Tsang. Assessment of the Effectiveness of Respirator Usage in Coke Oven Workers / Ming-Tsang Wu. // American Industrial Hygiene Association Journal. — 2002. — Vol. 63. — № 1. — P. 72—75.
9. Warren R.M. Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators: Developing Probability Estimates to Evaluate the Adequacy of an APF of 10 / R.M. Warren and Z. Zhuang // American Industrial Hygiene Association Journal. — 1998. — №59(11). — P.P. 796—801.
10. Новиков В.М., Коцюба А.М. Основи метрології та метрологічна діяльність: Частина 2. Навчальний посібник. — Київ: Нора-прінт (Novikov V.M., Kotsiuba A.M., Osnovy metrolohii ta metrolohichna diyalnist': Chastyna 2 [Fundamentals of metrology and metrological activities: Part 2] Tutorial, Nora-print, Kiev, Ukraine), 2001. — 210 с/р.
11. Радчук Д.І. Оцінка достовірності експериментально визначених показників якості протипилових респираторів / Колесник В.Є. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Литвин Н.С. // Науковий вісник НГУ (Kolesnyk V.E., Cheberiachko S.I., Radchuk D.I., Litvin N.S. (2009), «Evaluation of reliability of the experimentally determined parameters of the particle respirators quality», Naukovyi visnyk NGU). — 2009. — № 3. С/Р. 23—27. 

Отримано / received: 02.06.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.І. Голіньком (Україна).

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

УДК 681.12.08:534.09

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО Й ЗАРЕЗОНАНСНОГО МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДИСБАЛАНСУ РОТОРІВ

И. Руженцев, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та виміральної техніки,

А. Мамонтов, старший викладач кафедри охорони праці,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Наведено оцінку метрологічної точності запропонованого способу вимірювання статичної невідновженості жорстких роторів порівняно з зарезонансним способом. Виведено формули для розрахунку складової відносної похибки вимірювання, зумовленої лінійним тертям. Результат аналізу свідчить стосовно того, що за точністю вимірювання авторський спосіб не поступається традиційному зарезонансному способу і може реалізовуватися на операціях балансування роторів різних машин і механізмів.

This article discusses methods of balancing rotors. The scheme of the postresonance method is shown in fig. 1a [1—3]. The scheme of the proposed method is shown in fig. 1b [4—9]. The paper estimates metrological accuracy the proposed method of measuring statical disbalance of rigid rotors compared to postresonance one. Formulae are derived for calculating component of relative measurement error caused by linear friction. For the postresonance method graph shown in fig. 2. For the proposed method graph shown in fig. 3. The result of analysis is indicative of the fact that by measurement accuracy the proposed method has an advantage over postresonance one and can be used in technological operations of rotor balancing of various machines and mechanisms.

Ключові слова: балансування, дисбаланс, жорсткий ротор, зарезонансний, відносна похибка, вільні коливання, лінійне тертя.

Keywords: balancing, unbalance, rigid rotor postresonance, relative error, free oscillations, linear friction.

Незважаючи на значні досягнення в технології машинобудування, як і раніше, залишається актуальним завдання врівноважування роторів різних машин і механізмів (балансування).

Існують кілька методів вимірювання невідновженості роторів і цілий ряд пристроїв, що їх реалізують. Усім їм властиві недоліки, до яких належать вплив тертя на точність вимірювання, а також дорожнеча й складність конструкції балансувального пристрою. Як правило, це знижує ефективність балансування роторів, що, у свою чергу, неминуче призводить до погіршення експлуатаційних характеристик машин і механізмів, до складу яких вони входять. Цим пояснюється актуальність завдання.

Відомі й широко використовувані методи й засоби вимірювання невідновженостей засновані на вимірюванні різних фізичних величин процесу вимушених коливань, що виникають за обертання роторів. Так, найбільш широко впроваджені методи, покладені в основу дорезонансних, резонансних і зарезонансних верстатів [1—3].

За роботи дорезонансного верстата вимірюються динамічні навантаження (сили), що діють на опори ротора за вимушених коливань ротора. Результат вимірювання залежить від швидкості обертання ротора, сил тертя в опорах, твердості основи верстата й зовнішніх завад. Отже, точність вимірювання невідновженості також залежить від точності вимірювання зазначених динамічних навантажень і точності підтримання швидкості обертання в певних межах (у допуску). Окрім того, потребується періодичне калібрування верстата еталонними роторами.



И. Руженцев



А. Мамонтов

На резонансному верстаті необхідно вимірювати амплітуду вимушених коливань за умов резонансу, яка залежить від тертя у вимірювальній системі. Окрім того, потребується сталість частоти обертання, що впливає на точність вимірювання невідношеності. Отже, точність вимірювання невідношеності залежить від точності вимірювання амплітуди коливань, точності характеристик тертя, а також від стабільності частоти обертання.

У процесі роботи зарезонансного верстата вимірюється амплітуда вимушених коливань у податливих (м'яких) опорах, яка також залежить від тертя. Потребується калібрування верстата для кожного типу ротора, а в окремих випадках, для кожного ротора окремо. Точність вимірювання невідношеності залежить від точності вимірювання амплітуди коливань, а також від тертя.

Загальними недоліками цих методів і засобів є істотний вплив тертя на результат вимірювання, а також складність і висока вартість устаткування.

Відомі також спосіб і пристрої для визначення статичної невідношеності роторів [4—9], розробником яких є автор цієї статті (у співавторстві). Спосіб засновано на вимірюванні власних частот вільних коливань ротора, встановленого на маятникову раму, з подальшими розрахунками величини дисбалансу та його кута. Порівняно із традиційними способами вимірювання статичної невідношеності роторів цей спосіб має менші впливи тертя в опорах і зовнішніх механічних дій на вимірювані величини.

Мета статті — доказ і демонстрація можливості досягнення більш високої точності вимірювання запропонованого способу порівняно з традиційним зарезонансним способом, на якому засновано роботу традиційних зарезонансних верстатів.

Із конструктивної точки зору всі пристрої, за допомогою яких реалізовано описані методи, — це механічні коливальні системи. Точність вимірювання статичної невідношеності на кожному з них обмежена низкою чинників, із числа яких домінує тертя в системі. Розглядатимемо модель лінійного тертя та його вплив на точність вимірювання. Необхідно вивести математичні формули залежності відносної похибки вимірювання дисбалансу ротора від коефіцієнта загасання для традиційного зарезонансного й запропонованого способів. Отримавши шукані залежності, представимо їхню графічну інтерпретацію, яка дозволить наочно продемонструвати ефективність запропонованого методу.

МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Спрощену схему зарезонансного балансувального верстата наведено на рис. 1 а. Для визначення статичної невідношеності ротор 1, розкручують до певної швидкості обертання ω й вимірюють динамічне навантаження $F_{\text{ОСН}}$, зумовлене наявністю невідношеності маси 2 і передане основі за допомогою пружних опор 3. Елементами 4 умовно позначена наявність лінійного тертя в системі.

Як відзначено вище, на зарезонансному балансувальному верстаті вимірюється амплітуда вимушених коливань у податливих (м'яких) опорах, яка залежить від тертя. Амплітуду вимушених коливань, що встановилися, можна розрахувати за формулою (1).

$$A = \frac{D_1 \omega^2}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{D_1 \omega^2}{K \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2 M}{k}\right)^2 + \frac{4\xi^2 \omega^2 M}{k}}}, \quad (1)$$

$$\xi = \frac{h}{h_{\text{кр}}} = \frac{h}{2\sqrt{kM}}, \quad (2)$$

де D_1 — дисбаланс ротора; ω — циклічна частота вимушених коливань; ω_0 — циклічна частота вільних загасаючих коливань; k — твердість податливих опор 3; M — маса коливної частини системи; h — коефіцієнт лінійного тертя; $h_{\text{кр}}$ — коефіцієнт критичного тертя [9—12]; ξ — відносний коефіцієнт загасання.

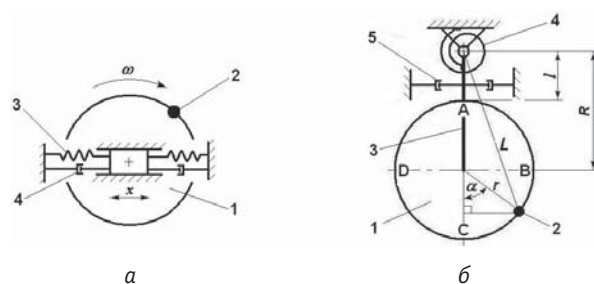


Рис. 1. Спрощені схеми балансувальних верстатів з урахуванням тертя:

а — зарезонансного (вид збоку);
б — запропонованого (вид зверху)

Fig. 1. Simplified schemes of balancing machine-tools in view of friction:

а — post-rezonance machine-tool (side view);
б — offered machine-tool (top view)

Величину дисбалансу можна розрахувати за формулою, яку визначимо із формули (1):

$$D_1 = \frac{Ak}{\omega^2} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2 M}{k}\right)^2 + \frac{4\xi^2 \omega^2 M}{k}} = \frac{AM}{n^2} \sqrt{(1 - n^2)^2 + 4\xi^2 n^2}, \quad (3)$$

$$n = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{k}{M}}} = \omega \sqrt{\frac{M}{k}},$$

де n — відносна частота.

Отже, величина дисбалансу є функцією декількох побічно вимірюваних величин, що входять до рівняння (3). У загальному випадку максимальну відносну похибку величини $y(x_1 \dots x_n)$, яка є функцією декількох змінних, можна розрахувати за допомогою частинних похідних [11]

$$\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\max} \cdot 100\% = \left[\left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \frac{\Delta x_1}{y} \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \cdot \frac{\Delta x_n}{y} \right| \right] \cdot 100\%. \quad (4)$$

Розглянемо одну із складових відносної похибки дисбалансу на зарезонансному верстаті, зумовлену лінійним тертям:

$$\varepsilon_{1\xi} = \left| \frac{\partial D_1(\xi)}{\partial \xi} \cdot \frac{\Delta \xi}{D_1(\xi)} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{4n^2 \xi^2}{\sqrt{(1 - n^2)^2 + 4\xi^2 n^2} \cdot (1 - n^2)} \right| \cdot 100\%. \quad (5)$$

На рис. 2а й 2б показані тривимірні графіки залежності $\varepsilon_1(n; \xi)$, побудовані в різних інтервалах значень аргументів (Mathcad). Графіки відбивають типову резонансну характеристику коливальної системи, за якої вплив тертя різко зростає на резонансній частоті.

На рис. 1 б наведено спрощену схему верстата (пристрою), запропонованого авторами. Ротор 1 з невідбалансованою масою 2 встановлено на маятниковій рамі 3 з можливістю повороту навколо своєї осі й фіксації в чотирьох положеннях А,

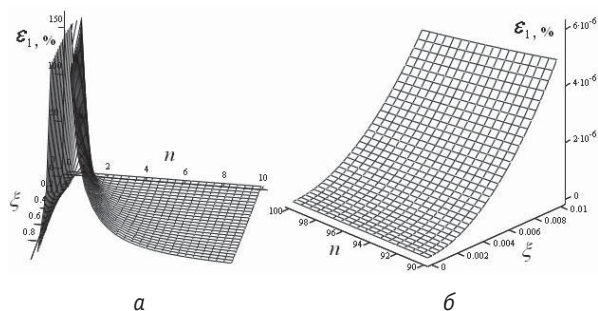


Рис. 2. Графіки залежності $\varepsilon_1(n; \xi)$

Fig. 2. The graphical dependence $\varepsilon_1(n; \xi)$

В, С, D, що відрізняються один від одного поворотом ротора на 90° . Раму 3 підпружинено пружним елементом 4 (торсионом). Наявність лінійного тертя в системі позначено елементами 5. Визначення дисбалансу та його кута виконується розрахунковим шляхом за допомогою частот вільних коливань системи, вимірених у чотирьох положеннях ротора.

$$D_2 = m_{\text{НЕВР}} r = \frac{G}{4R} \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_A^2} - \frac{1}{\omega_C^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega_B^2} - \frac{1}{\omega_D^2}\right)^2}, \quad (6)$$

де $m_{\text{НЕВР}}$ — величина невідбалансованої маси; r — радіус (ексцентриситет); G — коефіцієнт жорсткості пружного елемента 4; $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ — частоти вільних коливань системи, вимірені за відповідних положень ротора 1.

Аналогічно знайдемо складову відносної похибки дисбалансу, зумовлену лінійним тертям, для запропонованого пристрою. Як відомо, частота вільних загасаючих коливань механічної коливальної системи з лінійним тертям [12; 13]

$$\omega_\xi = \sqrt{\omega_0^2 - \xi^2}, \quad (7)$$

де ω_0 — циклічна частота вільних коливань без тертя. З урахуванням цього виразу (6) запишеться у такий спосіб:

$$D_2(\xi) = \frac{G}{4R} \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_A^2 - \xi^2} - \frac{1}{\omega_C^2 - \xi^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega_B^2 - \xi^2} - \frac{1}{\omega_D^2 - \xi^2}\right)^2}. \quad (8)$$

Складову відносної похибки дисбалансу, зумовлену лінійним тертям, для цього випадку матиме такий вид:

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial D_2(\xi)}{\partial \xi} \cdot \frac{\Delta \xi}{D_2(\xi)} \times 100\% = \frac{25G\xi^2}{R} \cdot f_1^{-\frac{1}{2}}(\xi) \cdot [f_2(\xi) \cdot (f_4^2(\xi) - f_5^2(\xi)) + f_3(\xi) \cdot (f_6^2(\xi) - f_7^2(\xi))], \quad (9)$$

$$f_1(\xi) = f_2^2(\xi) + f_3^2(\xi), \quad (10)$$

$$f_2(\xi) = f_4(\xi) + f_5(\xi), \quad (11)$$

$$f_3(\xi) = f_6(\xi) + f_7(\xi), \quad (12)$$

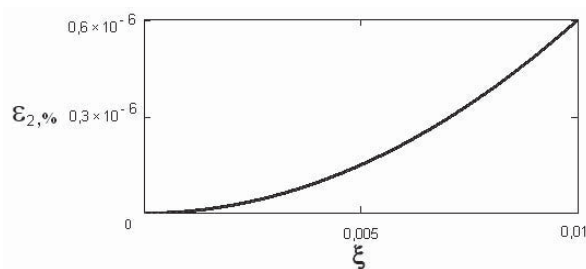
$$f_4(\xi) = \frac{1}{\omega_A^2 - \xi^2}, \quad (13)$$

$$f_5(\xi) = \frac{1}{\omega_C^2 - \xi^2}, \quad (14)$$

$$f_6(\xi) = \frac{1}{\omega_B^2 - \xi^2}, \quad (15)$$

$$f_7(\xi) = \frac{1}{\omega_D^2 - \xi^2}. \quad (16)$$

На рис. 3 подано графік залежності $\varepsilon_2(\xi)$, побудований у середовищі Mathcad.

Рис. 3. Графік залежності $\varepsilon_2(\xi)$ Fig. 3. The graphical dependence $\varepsilon_2(\xi)$

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

У ході дослідження виведено формули для розрахунків складової відносної похибки дисбалансу, зумовленої лінійним тертям, для зарезонансного й запропонованого способів. Також отримано розрахункові дані у виді графіків, що наочно свідчать стосовно ефективності запропонованого способу.

У результаті аналізу ефективності традиційних способів і засобів вимірювання статичної невідношеності роторів стала очевидною необхідність подальших досліджень у цьому напрямку. Для цього

автором цієї статті раніше розроблені й захищені патентами (у співавторстві) спосіб і пристрій для визначення статичної невідношеності роторів. Для практичної реалізації зазначених розробок знадобилася оцінка метрологічної точності запропонованого методу й наочна ілюстрація її результатів. За порівняння графіків 2б і 3 видно, що складова відносної похибки внаслідок лінійного тертя на зарезонансному верстаті за $\xi = 0,01$ й $n = 100$ приблизно у 6, 7 разів більша, ніж на запропонованому пристрої. Це свідчить стосовно більш високої точності запропонованого методу.

Науковою новизною є визначення формул для розрахунків складової відносної похибки дисбалансу, викликаної лінійним тертям, за допомогою частинних похідних для зарезонансного й запропонованого способів.

Практична значимість цієї роботи — підтвердження можливості створення більш точного й простого у виготовленні й обслуговуванні встатковання для визначення статичної невідношеності роторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Теория и конструкция балансировочных машин. Под ред. проф. В.А. Щепетильникова (Theory and design balancing machines. Ed. prof. V. A. Schepetilnikov) — М.: Машгиз, 1963. — 443 с/р.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. (Artobolevsky I.I. Theory of Mechanisms and Machines) — М.: Наука, 1988. — 639 с/р.
3. Неразрушающий контроль: Справочник. Т.7. Под ред. В.В. Клюева (Non-destructive testing: Handbook. T. 7. Ed. V.V. Klyuev) — М.: Машиностроение, 2005. — 829 с/р.
4. Мамонтов А.В. Методы вибродиагностики неуравновешенных роторов для снижения вибрации и шума производственного оборудования // Радиоэлектроника и информатика — Харьков (Mamontov A.V. Methods of vibrodiagnostics of unbalanced rotors to reduce vibration and noise level of industrial equipment// Radioelectronika i informatika — Kharkov), 2002. — № 3. — С/Р. 68—70.
5. Мамонтов А.В. Математическое обоснование способа определения статической неуравновешенности роторов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Проблеми механічного приводу» — Харків. (Mamontov A.V. Mathematical justifications of way of calculating static unbalance of rotors//Bulleting of «KhPI». Series: «Problem of mechanical drive» — Kharkiv). — 2014. — № 31. — С/Р. 99—104.
6. А. С. №1825996 G01M1/10 (Copyright certificate USSR).
7. Патент України (Patent of Ukraine) №38863 G01M1/00.
8. Патент України (Patent of Ukraine) №39118 G01M1/00.
9. Патент України (Patent of Ukraine) №70504 G01M1/10.
10. Суровцев Ю.А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры (Surovtsev Y.A. Depreciation electronic equipment) — М.: Сов. Радио, 1974. — 175 с/р.
11. Сергеев А.Г. Метрология: Учебник (Sergeev A.G. Metrology: Textbook) — М.: Логос, 2005. — 272 с/р.
12. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть II. Динамика (Yablonsky A.A. Course of theoretical mechanics. Part II. Dynamics) — М.: Высшая школа, 1984. — 423 с/р.
13. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний (Panovko Y.G. Introduction into the theory of mechanical oscillations) — М.: Наука, 1991. — 255 с/р. ■

Отримано / received: 24.03.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.С. Венцелем (Україна).
Prof. Ye.S. Ventsel, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 621.317

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНОГО ВОЛОГОМІРА

Р. Івах, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Інституту комп'ютерних технологій, автоматики і метрології, Національний університет «Львівська політехніка»

Рекомендовано для більшої відтворюваності вологості та меншого впливу висоти заповнення міжелектродного простору сипким матеріалом використовувати ємнісний первинний перетворювач циліндричної форми, внутрішнім електродом якого є конус.

Обчислено, що для портативних вимірювачів вологості сипких матеріалів доцільно вибирати висоту зовнішнього циліндра та висоту внутрішнього конуса в межах (0,1—0,3) м, радіус зовнішнього циліндра рівним 0,08 м, а радіус основи конуса приблизно на 0,005 м меншим від радіуса циліндра.

In an article for greater reproducibility and lower humidity influence height interelectrode space filling of loose materials recommended primary capacitive sensor cylindrical, internal electrode which is a cone.

An important advantage of the proposed design capacitive sensor is to increase the density self-consolidation loose material in the interelectrode space compared to other designs primary converters because the volume of the upper layers of the test material is greater than the lower, the same upper material «put pressure» on the bottom, leading to better seal and loose material under constant and uniform contact with the electrode material.

In addition, for portable moisture meter loose materials height and the height of the outer cylinder internal cone advisable to choose a range (0,1—0,3) m radius of the outer cylinder choice 0.08 m, and the base of the cone radius of approximately 0,005 m below the radius. At the recommended ratios between the parameters of the converter provided minimal relative change in capacitance by changing the height of filling and most reproducible humidity loose material.

Ключові слова: ємність, вологість, ємнісний первинний перетворювач, діелектрична проникність, діелькометричний вологомір, конструкція ємнісного первинного перетворювача.

Keywords: capacity, humidity, capacitive primary converter, permittivity, dielectric moisture meters, construction of capacitive primary transformer.

Ємнісні первинні перетворювачі (ЄПП) використовують для вимірювання різноманітних неелектричних величин, зокрема, вологості сипких матеріалів (СМ). Саме за допомогою ЄПП можна зrealізувати діелькометричний метод вимірювання вологості, який ґрунтується на визначенні діелектричної проникності, яка, в свою чергу, суттєво залежить від вологості СМ [1]. Переваги цього методу вимірювання детально описано в [1—3].

Основною вимогою, яка висувається до первинних перетворювачів вологомірів СМ, є вимога відтворюваності чинників, що впливають на результати вимірювання. У зв'язку з цим в деяких первинних перетворювачах передбачають додаткові пристрої, призначені для створення однакових умов підготування або введення проби досліджуваного СМ до міжелектродного простору, оскільки правильний відбір проби — найважливіша умова об'єктивної оцінки посівних якостей насіння. Недбалість або помилка за її відбору позбавляє сенсу всі подальші аналізи, якщо вони проведені навіть з надзвичайною точністю.

Окрім того, до конструкції первинного перетворювача висуваються й інші вимоги, наприклад: невелика вага (особливо у портативних вологомірах), високий опір ізоляції, який повинен бути в кілька разів вищим за максимальний опір матеріалу між електродами. Остання вимога зумовлює необхідність ретельного очищення



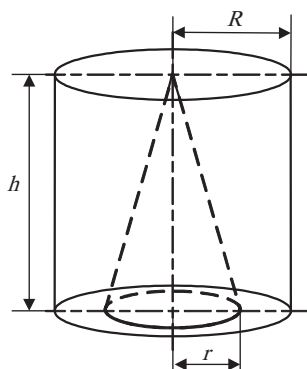


Рис. 1. Досліджувана конструкція ЄПП
Fig. 1. The study design capacitive sensor

і спостереження за станом ізоляції в процесі експлуатації, особливо за можливості забруднення або зношення ізоляції досліджуваним матеріалом.

Описані у [4–6] дослідження засвідчили, що для більшої відтворюваності вологості, зменшення впливу висоти заповнення міжелектродного простору СМ, кращого самоущільнення досліджуваного матеріалу і відповідно постійного та рівномірного контакту матеріалу з електродами рекомендується використовувати ЄПП циліндричної форми, внутрішнім електродом якого є конус (рис. 1).

Отже, доцільно дослідити, проаналізувати та вибрати оптимальні співвідношення розмірів первинного перетворювача з метою отримання деяких рекомендацій, які можуть бути корисними під час проектування ЄПП. Саме це і є метою роботи.

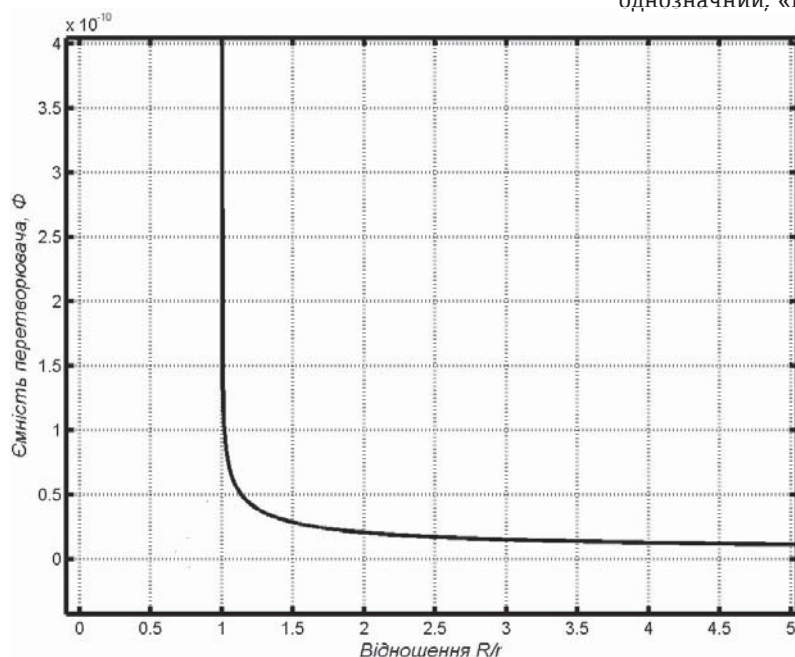


Рис. 2. Залежність ємності перетворювача від відношення радіусів
Fig. 2. Dependence of capacitance sensor on the ratio radiuses

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Як видно із [4–6] за зміни висоти заповнення міжелектродного простору СМ на 1 %, найменшої відносної зміни ємності досягають за найменшого об'єму заповнення, який є тоді, коли радіус основи конуса дорівнює радіусу зовнішнього циліндра ($r = R$) за незмінної висоти h . Окрім того, за такого співвідношення радіусів отримують найбільше значення ємності (тобто, за $R/r = 1$) (рис. 2).

Внутрішній радіус конуса r не може дорівнювати зовнішньому радіусу циліндра R , оскільки тоді зовнішній циліндр та внутрішній конус представлятимуть один електрод перетворювача. Зважаючи на статистичні розміри зерна досліджуваних СМ (наприклад, пшениці), рекомендують приймати

$$R = r + 0,005, \quad (1)$$

тобто різниця між радіусами зовнішнього циліндра і конуса повинна становити щонайменше 5 мм.

Надалі методика досліджень полягала у такому: за незмінної висоти зовнішнього циліндра та конуса h , змінювали радіус зовнішнього циліндра R у межах від 0,02 до 0,2 м, дотримуючись співвідношення (1). При цьому визначали відносну зміну ємності первинного перетворювача за зміни висоти заповнення міжелектродного простору досліджуваним матеріалом на 1 % та чутливість первинного перетворювача відносно діелектричної проникності.

Результати дослідження представлено в таблиці.

У таблиці комірки, позначені X , означають, що для відповідних параметрів первинного перетворювача шукана залежність мала несплавний, неоднозначний, «пилкоподібний» характер.

Дані, представлені у таблиці, подано графічно на рис. 3.

Аналізуючи результати таблиці та рис. 3, можна зробити такі висновки, що, незалежно від висоти (починаючи від 0,1 м) циліндра, радіус зовнішнього циліндра необхідно вибирати рівним 0,08 м, при цьому відносна зміна ємності за зміни висоти заповнення на 1 % буде мінімальною. Зі збільшенням висоти циліндра збільшується і чутливість перетворювача відносно до зміни діелектричної проникності СМ, а відповідно до зміни вологості.

Недоцільно вибирати висоту циліндра достатньо великою, (0,4–0,5) м і більше, оскільки

Визначення оптимального розміру радіуса зовнішнього циліндра

Determining the optimal size radius of the external cylinder

$R, \text{ м}$	$h = 0.1 \text{ м}$		$h = 0.2 \text{ м}$		$h = 0.3 \text{ м}$		$h = 0.4 \text{ м}$	
	$\delta C, \%$	$\frac{\Delta C}{\Delta \varepsilon}, \frac{n\Phi}{\text{од.}\varepsilon}$	$\delta C, \%$	$\frac{\Delta C}{\Delta \varepsilon}, \frac{n\Phi}{\text{од.}\varepsilon}$	$\delta C, \%$	$\frac{\Delta C}{\Delta \varepsilon}, \frac{n\Phi}{\text{од.}\varepsilon}$	$\delta C, \%$	$\frac{\Delta C}{\Delta \varepsilon}, \frac{n\Phi}{\text{од.}\varepsilon}$
0.02	0,15	6,93	0,059	13,85	0,034	20,77	0,022	
0.04	0,11	7,94	0,043				0,020	
0.05	0,10		0,042	21,93	0,030	332,87	0,016	
0.07	0,094	8,14	0,039	25,16	0,028	37,71	0,015	
0.08	0,092		0,037		0,022	39,67	0,014	
0.09	0,0925	13,85	0,039	27,69	0,028	41,23	0,015	
0.12	0,097	15,38	0,042	30,44	0,03	45,61	0,018	
0.14			0,045	32,02	X	X	X	X
0.15	0,106	16,67			X	X	X	X
0.16			0,049	33,42	X	X	X	X
0.18	0,118	17,80	0,051	34,68	X	X	X	X
0.2	X	X	X	X	X	X	X	X

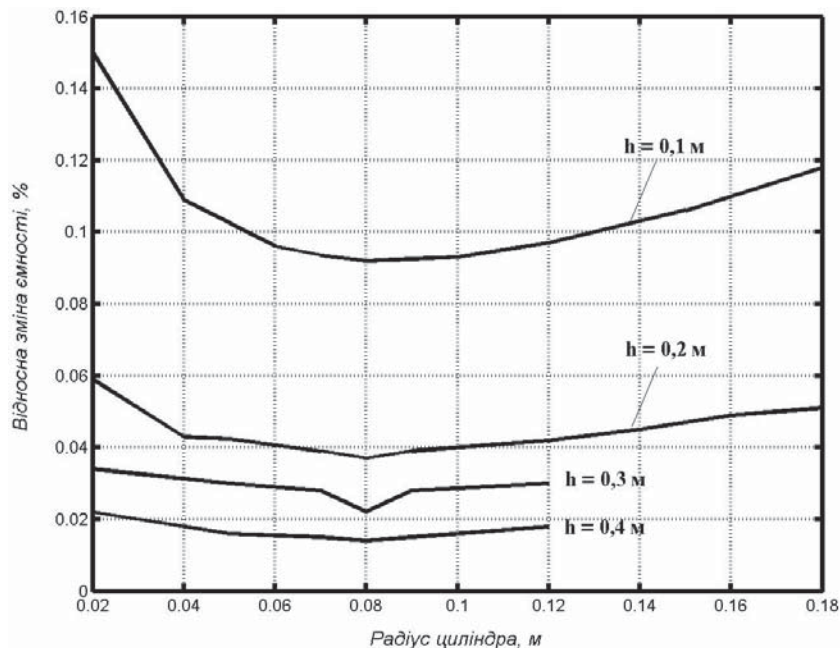


Рис. 3. Залежність відносної зміни ємності перетворювача від радіуса циліндра за різного значення висоти циліндра

Fig. 3. Dependence change capacitance sensor on the radius of the cylinder at different values of the height of the cylinder

для портативного приладу великі розміри перетворювача є незручними. Також не варто висоту циліндра вибирати достатньо малою (0,1 м і менше), оскільки на результат вимірювання суттєво впливатиме розмір зернини.

ВИСНОВКИ

Первинний перетворювач є першим елементом у колі вимірювального перетворення, від точності, чутливості, швидкодії, стійкості до зовнішніх впли-

вів, стабільності якого у вирішальний спосіб залежить повнота та достовірність отримуваної інформації стосовно стану досліджуваних об'єктів і процесів.

Діелектричний метод вимірювання вологості сипких матеріалів, який є найперспективнішим для використання за експрес аналізу вологості матеріалу, можна зреалізувати за допомогою ємнісних первинних перетворювачів певної визначеної конструкції.

Для більшої відтворюваності вологості та меншого впливу висоти заповнення СМ рекомендується використовувати ЄПП циліндричної форми, внутрішнім електродом якого є конус.

Суттєвою перевагою запропонованої конструкції ЄПП

є підвищення щільності самоукладення СМ в міжелектродному просторі порівняно з іншими конструкціями первинних перетворювачів, оскільки об'єм верхніх шарів досліджуваного матеріалу є більшим, ніж нижніх, тим самим верхні шари матеріалу «тиснуть» на нижні, що призводить до кращого ущільнення сипкого матеріалу і відповідно постійного та рівномірного контакту матеріалу з електродами.

Окрім цього, для портативних вимірювачів вологості сипких матеріалів доцільно вибирати

висоту зовнішнього циліндра та висоту внутрішнього конуса в межах (0,1 — 0,3) м, радіус зовнішнього циліндра рівним 0,08 м, а радіус основи конуса приблизно на 0,005 м меншим від радіуса циліндра.

За рекомендованих співвідношень між параметрами перетворювача забезпечується мінімальна відносна зміна ємності за зміни висоти заповнення та найбільша відтворюваність вологості сипкого матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Берлинер М.А. Измерения влажности / Берлинер М.А. — Москва: Энергия (Berliner M.A. Humidity measurement / Berliner MA — Moscow: Energy), 1973. — 400 с/р.
2. Форейт Й. Ёмкостные датчики неэлектрических величин / Й. Форейт; [пер. с чешского В.И. Дмитриева]. — Москва-Ленинград: Энергия (Foreyt J. Capacitance sensors of non-electric values (translation from czech). Moscow-Leningrad), 1966.
3. Роман Івах. Систематизація методів вимірювання вологості сипких матеріалів / Роман Івах, Михайло Дорожовець, Іван Питель // Вимірювальна техніка і метрологія (Ivakh R., Dorozhovets M., Pytel I. Systematization of moisture measurement methods of the granular materials. Measurement equipment and metrology). — 2003. — № 62. — С/Р. 97 — 101.
4. Івах Р.М., Питель І.Д. Математична модель похибки вимірювання параметрів діелектричного сипкого середовища ємнісними первинними перетворювачами / Комп'ютерні науки та інформаційні технології (Ivakh R., Pytel I. Mathematical model of measurement error parameters of bulk dielectric medium primary capacitive transducer / Computer Science and Information Technology). — 2009. — № 650. — С/Р. 104—108.
5. Івах Р. Математична модель ємнісного первинного перетворювача з внутрішнім електродом складної конструкції // Комп'ютерні науки та інформаційні технології (Ivakh R. Mathematical model of capacitive primary converter with an internal electrode complex design // Computer Science and Information Technology). — 2010. — № 663. — С/Р. 95—99.
6. Івах Р.М. Ёмнісні первинні перетворювачі діелектричної проникності сипких матеріалів: автореферат дисертації кандидата технічних наук: 05.11.05 / Р.М. Івах; Національний університет «Львівська політехніка». — Л. (Ivakh R. Capacitive primary converters dielectric constant of loose materials: Thesis for obtaining sciences degree candidate of technical sciences: 05.11.05 / R. Ivakh; National University «Lviv Polytechnic». — Lviv), 2008. — 19 с/р.
7. Половинка Д.В. Двочастотний прилад контролю вологості сипких сільськогосподарських культур: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / Д.В. Половинка. Харків (Polovynka D. Dual-frequency device control humidity loose crops: Author. Thesis for obtaining sciences degree candidate of technical sciences. 05.11.13. Kharkiv), 2005. — 18 с/р.
8. Байцар Р.І. Ёмнісні сенсори / Байцар Р.І., Варшава С.С., Радченко Ю.Ю. — Львів: Вид-во ЛВЦНТЕІ (Baytsar R., Warsawa S. Radchenko Yu. Capacitive sensors. Lviv: Izd LvCSTEI), 2002. — 63 с/р.
9. Кричевский Е.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Кричевский Е.С., Волченко А.Г., Галушкин С.С. — Москва: Энергоатомиздат (Krychevskyy E.S., Bolchenko A.H., Halushkin S.S. Moisture control of the solid loose materials. Moscow: Energoatomizdat). 1987. ❏

Отримано / received: 08.04.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І.П. Микитиним (Україна).

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

УДК 621.396.96

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

А. Костира, доктор технічних наук, доцент кафедри основ радіотехніки,

В. Лівнов, аспірант кафедри,

Харківський національний університет радіоелектроніки

Визначено джерела похибок ультразвукової високоточної системи локального позиціонування, що дають найбільший внесок до точності позиціонування. Розроблено методи зниження їх похибок.

The analysis and identification of errors sources of ultrasonic local positioning system (ULPS) that make the greatest contribution

to positioning accuracy were held. A parallel with the method of calculation errors in the similar systems (satellite navigation systems) was drawing. The ULPS model scheme was created in computer-aided design package electronics Proteus (Fig. 1). Methods of reducing the impact of power grid interference and noise on the accuracy of the ULPS were designed. The estimation of ULPS errors after modifications carried out was evaluated.

Ключові слова: ультразвукова система, позиціонування, похибки, супутникова навігація, моделювання, мережів наведення, шуми.

Keywords: ultrasonic system, positioning, errors, satellite navigation, simulation, power grid interference, noise.

Ультразвукова система локального позиціонування (УСЛП) застосовується для високоточного визначення координат рухомих об'єктів у локальній області позиціонування з обмеженими розмірами. Її застосування виправдане в приміщеннях, де зв'язок із супутниковими радіонавігаційними системами (СРНС) недоступний або вони не забезпечують необхідної точності. Система надає додаткові можливості для просторового орієнтування людьми з порушеннями зору. Це науково-технічне завдання є актуальним, і його вирішенням займаються наукові колективи багатьох країн світу, наприклад, [1, 2].

Описання УСЛП, стосовно якого йтиметься у статті, наводилося в [3, 4]. У [4] виконувалося моделювання УСЛП у системі автоматизованого проектування Mathcad з метою визначення значень основних похибок системи. За результатами моделювання розраховано абсолютну похибку вимірювання координат, яка склала 0,75 см.

Мета статті — виявлення джерел, що дають найбільший внесок до величини цієї похибки, а також визначення шляхів їх зменшення.

АНАЛІЗУВАННЯ ПОХИБОК МІСЦЕВИЗНАЧЕННЯ У НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Проблема визначення координат об'єктів не є новою й уже вирішена в системах, подібних УСЛП, наприклад, у СРНС за синхронізації часу приймача споживача із часом системи [5]. Між СРНС і УСЛП можна провести такі аналогії: навігаційному приймачу в УСЛП відповідає ультразвукова (УЗ) мітка, супутникам — УЗ випромінювачі, а каналу зв'язку — звуковий канал. Відмінністю є використання в УСЛП ультразвуку замість радіохвиль і порівняно невелика відстань між УЗ випромінювачами



А. Костира



В. Лівнов

й приймачем, що дозволило збільшити точність системи в режимі реального часу до часток сантиметра.

У СРНС виконати точну синхронізацію часу між супутниками й приймачем достатньо проблематично, й тому для того, щоби приймач визначив свою позицію, він повинен отримувати сигнали часу від чотирьох різних супутників (СП 1,..., СП 4) для обчислення транзитного часу сигналів ($\Delta t_1, \dots, \Delta t_4$).

На точність визначення місця розташування, висоти, швидкості, часу, інших параметрів споживачем СРНС впливає безліч чинників. Вони пов'язані з особливостями первинних і вторинних навігаційних вимірювань, з характеристиками використовуваних сигналів, середовища поширення тощо. Розглянемо основні джерела похибок цих вимірювань стосовно до псевдодалекомірного методу навігаційно-часових визначень.

Складові далекомірної похибки, залежно від причини походження, можна розділити на три групи: похибки $\delta D_{\text{НСі}}$, зумовлені апаратними затримками на i -му навігаційному супутнику; похибки $\delta D_{\text{ТПі}}$, внесені на трасі поширення сигналу i -го навігаційного супутника; похибки $\delta D_{\text{СП}}$, внесені споживчим приймачем.

Отже, вираз для псевдодалекості можна представити у такому виді:

$D_{\text{ВІМі}} = D_i + \Delta_{\text{ДАЛі}} = D_i + D' + \delta D_{\text{НСі}} + \delta D_{\text{ТПі}} + \delta D_{\text{СП}},$ (1)
де D_i — дійсна дальність, $\delta_{\text{ДАЛі}}$ — сумарна далекомірна похибка, D' — помилка визначення псевдодалекості.

Перша група похибок зумовлена, в основному, недосконалістю частотно-часового й ефемеридного забезпечення навігаційних супутників. Похибки частотно-часового забезпечення супутників виникають внаслідок кінцевої точності процедур звірення і зберігання бортової шкали часу. Ефемеридні похибки навігаційно-часових визначень зумовлені неточністю визначення параметрів орбіт навігаційних супутників та їхніми непрогнозованими зсувами, приблизно (0,6...10) м для СРНС GPS.

Аналогом похибок частотно-часового забезпечення в УСЛП є похибки синхронізації часу між базовою станцією й УЗ мітками. Але з урахуванням того, що синхронізація виконується за радіоканалом, а визначення дальності — за допомогою звукового каналу, максимальна похибка синхронізації (яка в цій системі не перевищує значення (1...2) мкс) не дає істотного внеску до результувальної похибки, і тому нею можна знехтувати.

Еквівалентом ефемеридної похибки в УСЛП є неточність установлення УЗ випромінювачів в області позиціонування. Ця похибка є систематич-

ною й не змінюється в процесі роботи системи.

З урахуванням зазначеного вище, складову $\delta D_{\text{НСі}}$ для УСЛП можна представити як $\delta D_{\text{Уі}}$ — похибку установлення УЗ випромінювача.

Друга група похибок у СРНС зумовлена особливостями поширення радіохвиль (ПРХ) в атмосфері Землі (тропосферні й іоносферні похибки) і багатопроміневістю ПРХ.

В атмосфері виділяють декілька шарів, що відрізняються своїми властивостями. Тропосфера й іоносфера помітно впливають на якість навігаційних вимірювань у СРНС, що виявляється, в основному, у додаткових затримках сигналу, які виникають через рефракцію сигналів супутника за проходження атмосфери Землі.

Багатопроміневість ПРХ зумовлена тим, що на антену апаратури споживача СРНС надходить не лише прямий сигнал від супутника, але й сигнали, пере-відбиті від земної або морської поверхонь і прилеглих об'єктів, наприклад, будинків. Рівень відбитого сигналу може бути порівняним із прямим сигналом. Це призводить до істотних спотворень корисного сигналу й до похибок у схемах спостереження за параметрами цього сигналу (затримкою, частотою й фазою).

Похибки середовища поширення присутні й в УСЛП. Вони зумовлені мінливістю швидкості поширення звуку через зміну температури навколишнього середовища й переміщення повітряних мас (вітру). Проблема багатопроміневості також присутня у звуковому каналі, але вона не має істотного впливу на точність системи внаслідок того, що в УСЛП часове положення прийнятого зонд-сигналу визначається за його переднім фронтом і відбиті сигнали ігноруються системою. Ураховуючи це, похибкам $\delta D_{\text{ТРі}}$, внесеним на трасі поширення сигналу i -го навігаційного супутника, в УСЛП можна поставити у відповідність $\delta D_{\text{ШЗ}}$ — похибки, зумовлені мінливістю швидкості звуку.

До далекомірних похибок $\delta D_{\text{СП}}$, зумовлених апаратурою споживача, можна віднести похибки спостереження за моментом надходження (часового положення) сигналу супутника, при цьому основний внесок дають шумові й динамічні похибки схем спостереження за затримкою кривої, що обгинає, й фазою сигналів супутників. Ця похибка розраховується за такою формулою:

$$\delta D_{\text{СП}} = \tau_e \sqrt{B_i / (P / N_0) + B_i B_r / (P / N_0)^2},$$

де τ_e — тривалість елементарного символу псевдовипадкової послідовності далекомірного коду; B_i — одnobічна ширина смуги пропускання замкненої спостережної системи; B_r — одnobічна ширина

смуги пропускання тракту проміжної частоти; P/N_0 — відношення потужності сигналу до спектральної щільності шуму на вході приймача.

Останній вираз також застосовний для розрахунків шумової похибки УСЛП, де величина τ_c — тривалість напівперіоду несучої частоти зонд-сигналу.

Отже, для УСЛП вираз (1) приймає вид:

$$D_{\text{ВІМІ}} = D_i + \delta D_{Y_i} + \delta D_{\text{ШЗі}} + \delta D_{\text{СП}}$$

Далі досліджуватиметься складова $\delta D_{\text{СП}}$ (далекомірною похибка, зумовлена в УСЛП похибкою УЗ мітки), а також розроблятимуться методи її мінімізації.

МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМИ УСЛП

Моделювання схеми УСЛП проводиться в пакеті автоматизованого проектування електроніки Proteus [6], що дозволяє адекватно відбити фізику роботи системи, проаналізувати особливості функціонування її основних вузлів, а також визначити основні джерела похибки вимірювань.

На рис. 1 представлено модель основних вузлів системи, симуляція яких виконується в пакеті Proteus. Модель складається з таких блоків:

1. Генератора зонд-сигналу. У реальному обладнанні ним є базова станція й УЗ випромінювачі.
2. Атенюатора і суматора як моделі звукового каналу.
3. Генератора шуму. Шум присутній як у звуковому каналі, так і вноситься електронними ланцюгами самої системи.
4. Вузькополосного фільтра. Ним є УЗ приймач, установлений в УЗ мітці УСЛП.

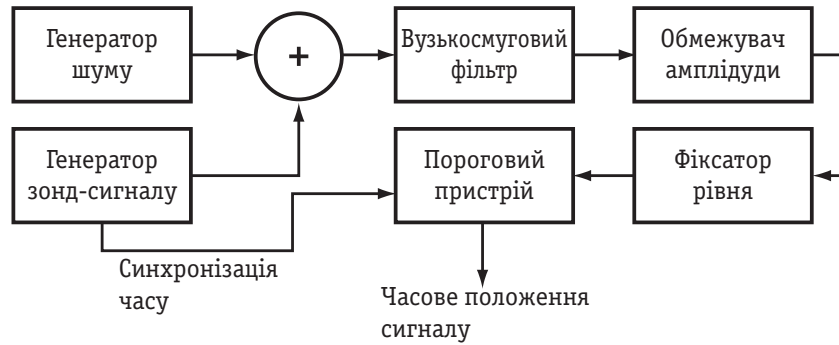
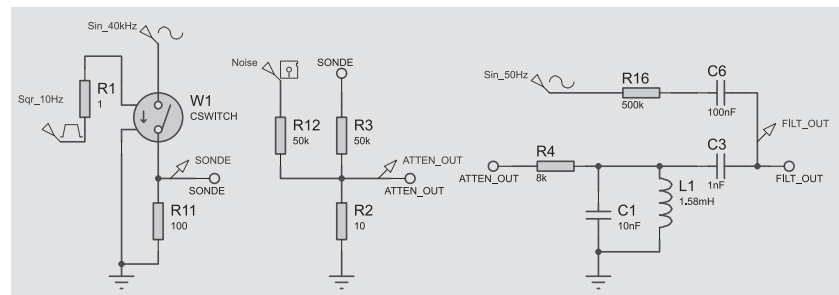
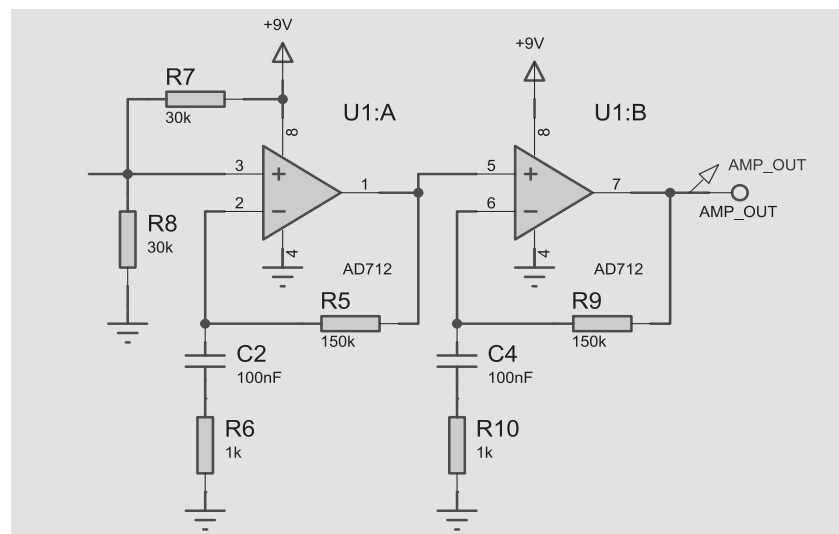


Рис. 1. Функціональна схема моделі УСЛП

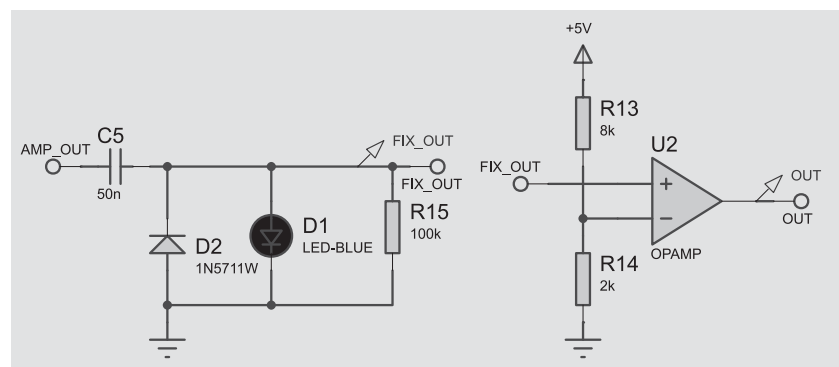
Fig. 1 Functional diagram of ULPS model



а)



б)



в)

Рис. 2. Принципова схема моделі

Fig. 2 Schematic diagram of the model

5. Підсилювача сигналу, який одночасно є обмежувачем рівня внаслідок обмеженості динамічного діапазону підсилювача.

6. Фіксатора рівня, що здійснює підйом рівня сигналу на виході підсилювача над нульовим значенням для збільшення чутливості системи.

7. Порогового пристрою, який визначає часове положення прийнятого зонд-сигналу й спрацьовує за переднім фронтом імпульсу.

Принципову схему перших 4-х блоків системи наведено на рис. 2а.

Розглянемо докладніше роботу кожного із блоків моделі.

Блок зонд-сигналу складається із двох генераторів імпульсів (Sin_40 kHz, Sqr_10 Hz) і ключа, керованого струмом (W1). Генератор Sin_40 kHz виробляє синусоїдальний сигнал з частотою 40 кГц і амплітудою 1 В. Генератор Sqr_10 Hz виробляє прямокутні імпульси з частотою проходження 10 Гц, тривалістю 1 мс і амплітудою 1 В. За допомогою керованого ключа W1 відбувається модуляція сигналу першого генератора сигналом другого, й на виході блока формується зонд-сигнал, поданий на рис. 3. Особливістю сигналу є те, що він стартує з 2-ої мс. Такий часовий зсув необхідний для того, щоб після запуску закінчилися всі перехідні процеси в модельованій схемі.

Далі зонд-сигнал надходить на вхід моделі звукового каналу. Ця модель є одночасно атенуатором і суматором сигналів, на один із входів якого (вхід SONDE) подається зонд-сигнал, а на другий — білий шум з генератора Noise. Генератор Noise відтворює з файлу послідовність псевдовипадкових чисел з рівномірним амплітудним розподілом у діапазоні від -1 до 1 В. Для дослідження моделі створено 10 файлів з реалізаціями білого шуму.

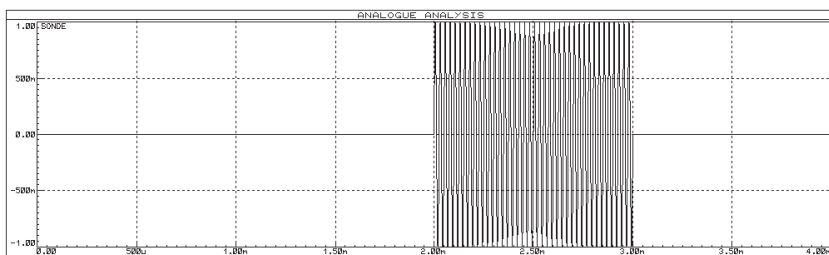


Рис. 3. Графік зонд-сигналу на виході блока

Fig. 3. Chart of the probe signal at the output of block

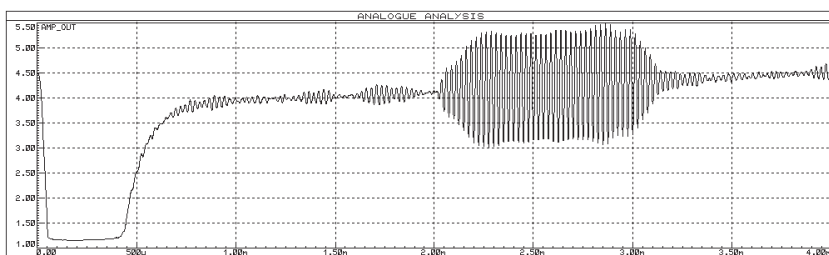


Рис. 4. Графік сигналу на виході підсилювача

Fig. 4. Chart of the signal at the output of the amplifier

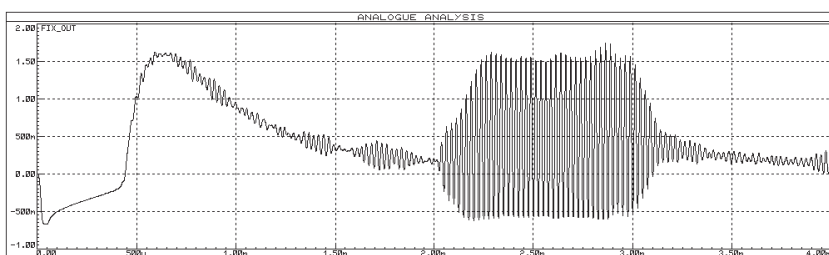


Рис. 5. Графік сигналу на виході фіксатора рівня

Fig. 5. Chart of the signal level at the output of level latch

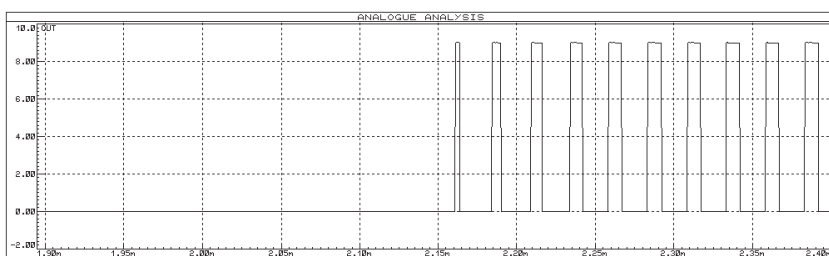


Рис. 6. Графік сигналу на виході порогового пристрою

Fig. 6. Chart of the output signal of the threshold device

Атенуатор R12, R3, R2 послаблює зонд-сигнал і шум у 5000 разів, що еквівалентно реальному загасанню сигналу в звуковому каналі. Сигнали сумуються на резисторі R2. Результувальна суміш має амплітуду до 200 мкВ, яка генерується на виході УЗ приймача за видалення його від УЗ випромінювача на відстань до 10 м.

Далі суміш сигнал + шум надходить на вхід вузькополосного фільтра (модель УЗ приймача). Блок складається з виборчого RLC-ланцюга R4, C1, L1, настроєного на частоту 40 кГц зі смугою пропускання 2 кГц, і розділювального конденсатора C3.

Реальний УЗ приймач достатньо чутливий до електромагнітних (ЕМ) наведень освітлювальної мережі. Отже, модель УЗ приймача має високий вихідний імпеданс для низьких частот, що й дозволяє врахувати вплив цих наведень. Останні моделюються за допомогою генератора Sin_50 Hz, що виробляє відповідний синусоїдальний сигнал, і ланцюжка R16, C6.

Далі сигнал подається на вхід широкосмугового підсилювача, схему якого представлено на рис. 26. Блок зібрано на двох операційних підсилювачах, коефіцієнт підсилення кожного каскаду на частоті 40 кГц становить 100. Операційні підсилювачі U1:A і U1:B включено за стандартною схемою з негативним зворотним зв'язком на елементах R5, C2, R6 і R9, C4, R10. На ділянці R7, R8 формується напруга робочої точки, рівна половині живильної.

Сигнал на виході підсилювача представлено на рис. 4. На графіку чітко видно перехідні процеси, які завершуються протягом 1 мс, а також вплив наведень від електроосвітлювальної мережі, які зумовлюють підйом графіка у правій частині.

За підсилювачем йде блок фіксатора рівня, який піднімає сигнал над рівнем 0 В [7], що необхідно для підвищення чутливості системи. Схему 2-х останніх блоків (фіксатора рівня й порогового пристрою) представлено на рис. 2в.

Сам фіксатор зібрано на елементах C5, D2, R15. Світлодіод D1, окрім індикаторної функції, виконує функцію обмеження вихідної напруги на рівні 2 В. Сигнал на виході фіксатора наведено на рис. 5.

Останнім блоком моделі є пороговий пристрій. Він складається з ідеального операційного підсилювача U2 і формувача опорної напруги 1 В на елементах R13, R14. Сигнал на виході порогового пристрою наведено на рис. 6. Передній фронт першого імпульсу визначає часове положення прийнятого зонд-сигналу.

ВПЛИВ МЕРЕЖНИХ

НАВЕДЕНЬ

НА ТОЧНІСТЬ РОБОТИ УСЛП

Далі виконується дослідження впливу ЕМ наведень освітлювальної мережі на абсолютну й систематичну похибки визначення часового положення сигналу, а також доопрацювання схеми з метою зменшення впливу цих похибок.

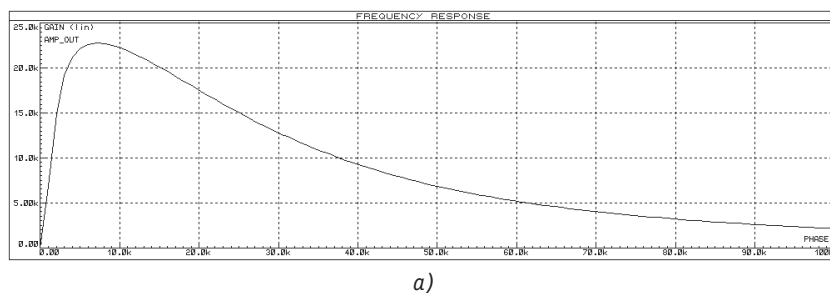
Таблиця. Залежність часового положення прийнятого сигналу від початкової фази мережного наведення

Table 1. The dependence of the time position of the received signal from the initial phase of power grid interference.

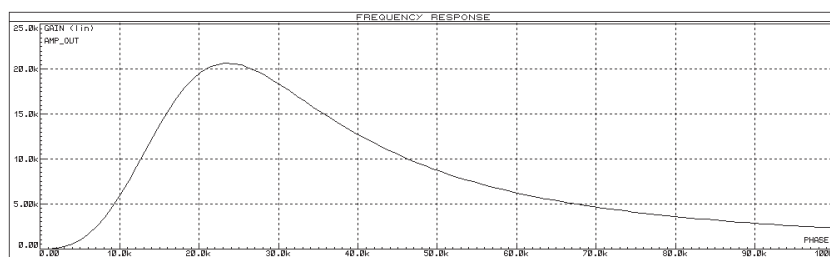
Початкова фаза, град	Часове положення, мс	Затримка, мс
0	2,184	0,184
45	2,185	0,185
90	2,184	0,184
135	2,160	0,160
180	2,160	0,160
225	2,161	0,161
270	2,185	0,185

Уважаємо наведення електроосвітлювальної мережі сигналом з випадковою початковою фазою, рівномірно розподіленою на інтервалі від 0 до 2π . Часове положення прийнятого зонд-сигналу вимірюється за різних початкових фаз генератора мережних наведень (Sin_50 Hz, блок вузькополосного фільтра), і на основі отриманих даних розраховуються величини основних похибок. При цьому значення відношення сигнал/шум залишається фіксованим.

У таблиці наведено значення часового положення зонд-сигналу за різних початкових фаз генератора Sin_50 Hz, а також значення затримки прийнятого сигналу щодо випроміненого.



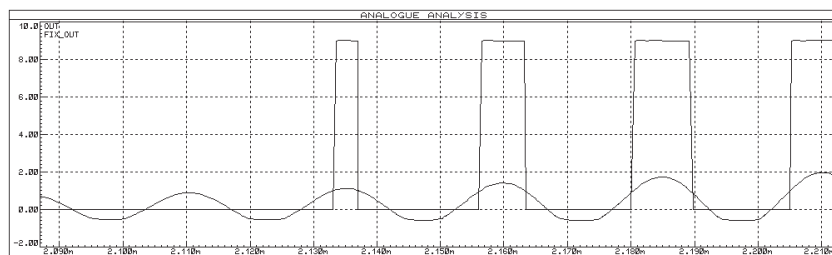
а)



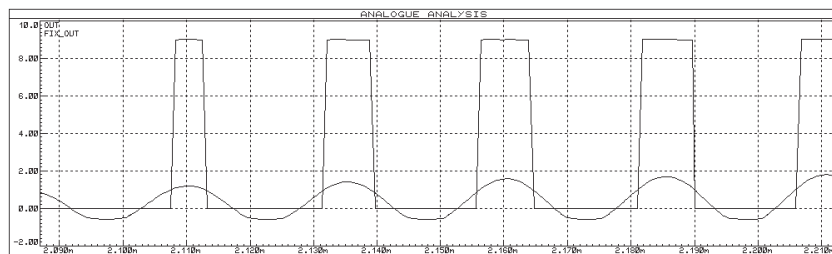
б)

Рис. 7. Частотна характеристика підсилювача до і після модифікації

Fig. 7. The frequency response of the amplifier before and after the modification



а)



б)

Рис. 8. Сигнали на вході й виході порогового пристрою (шумові реалізації №1 і №2 відповідно)

Fig. 8. Signals at input and output of the threshold device (noise realization №1 and №2, respectively)

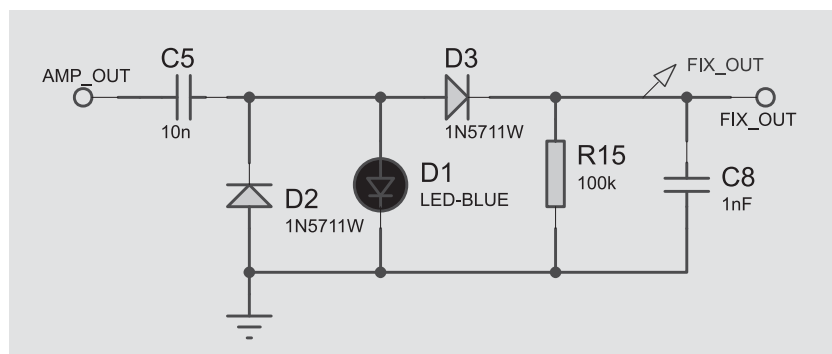


Рис. 9. Принципова схема модифікованого фіксатора рівня

Fig. 9. Schematic diagram of a modified level latch

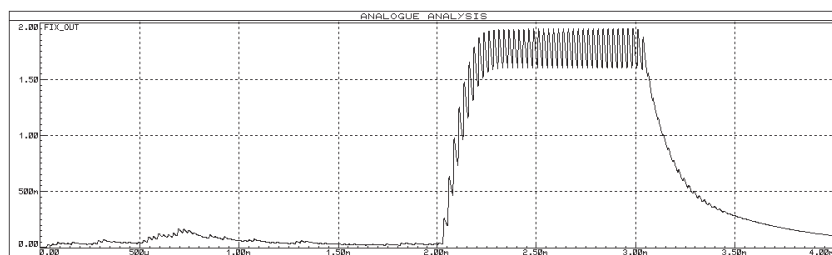


Рис. 10. Графік сигналу на виході модифікованого фіксатора рівня

Fig. 10. Chart of the output signal level of the modified level latch

Абсолютна похибка вимірювань визначається як:

$$\Delta t_{abs} = t_{\gamma, n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

де $n = 7$ — кількість вимірень, t_i — вимірене значення часового положення, \bar{t} — середнє значення вимірень.

Систематична похибка для 7 вимірювань розраховується у такий спосіб:

$$\Delta t_s = \frac{\sum_{i=0}^7 t d_i}{7}, \quad (3)$$

де $t d_i$ — i -е вимірювання затримки прийнятого зонд-сигналу.

Підставивши значення із таблиці у (2) і (3), отримаємо такі значення похибок оцінки часового положення:

абсолютна: $\Delta t_{abs} = 12,5$ мкс,

систематична: $\Delta t_s = 174$ мкс.

Для зниження впливу мережних наведень скоригуємо амплітудно-частотну характеристику широкосмугового підсилювача. Як видно з рис. 7а, його частотна характеристика має значний підйом у низько-частотній області, де розташована частота мережного наведення. Це зумовлено нелінійністю характеристики самого операційного підсилювача.

Для збільшення завалу в низькочастотній області характеристики знижимо ємність конденсаторів зворотного зв'язку C2 і C4. Також зменшимо ємність розділювального конденсатора C5 на вході фіксатора рівня. Нову частотну характеристику підсилювача представлено на рис. 7б.

Повторно розрахуємо абсолютну й систематичну похибки після модифікації схеми:

абсолютна: 0,5 мкс,

систематична: 133 мкс.

Помітно значне ослаблення впливу мережних наведень на точність роботи системи, що підтверджує ефективність

виконаних доопрацювань схеми.

ВПЛИВ ШУМІВ НА ТОЧНІСТЬ РОБОТИ УСЛП

Далі проводяться розрахунки абсолютної й систематичної похибок, зумовлених канальними шумами, а також шумами УЗ приймача.

Для обчислення похибки оцінки часового положення визначаємо часове положення прийнятого

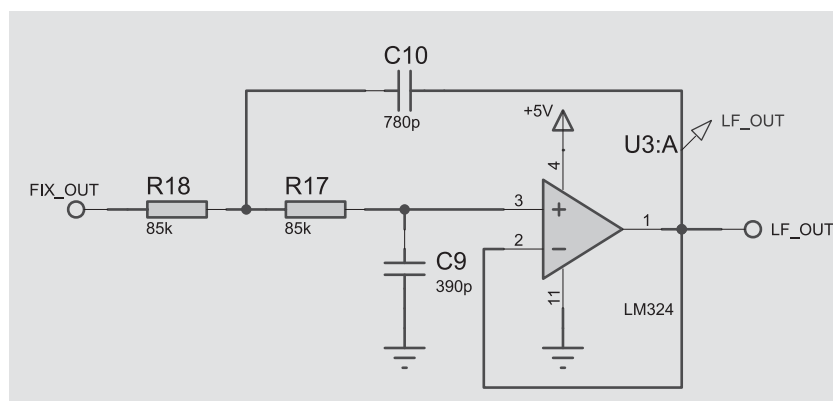


Рис. 11. Принципова схема ФНЧ
Fig. 11. Schematic diagram of the LPF

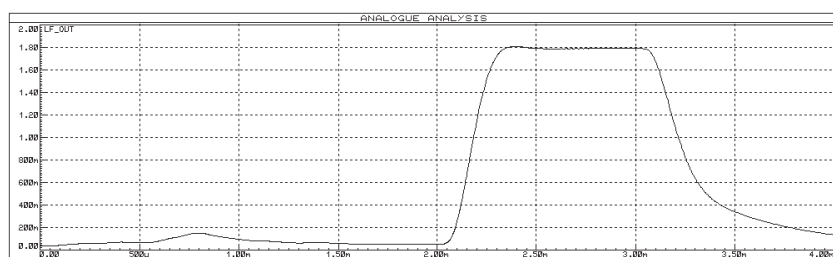


Рис. 12. Графік сигналу на виході ФНЧ
Fig. 12. Chart of the signal at the output of the LPF

зонд-сигналу для 10 шумових реалізацій. Вплив мережних наведень урахуємо, однак їх фазовий розподіл є незмінним. За отриманими даними розраховуємо величини похибок.

Абсолютну похибку вимірювань розраховуємо за (2), а вираз для систематичної похибки приймає вид:

$$\Delta t_s = \frac{\sum_{i=0}^{10} t d_i}{10}.$$

Підставивши необхідні значення, отримаємо такі величини:

абсолютна похибка: 13 мкс,
систематична похибка: 113 мкс.

На рис. 8а подано графіки сигналів на вході й виході порогового пристрою для шумової реалізації №1, а на рис. 8б — для шумової реалізації №2.

Як видно на рис. 8б, внаслідок впливу шуму пороговий пристрій спрацьовує раніше, ніж на рис. 8а, рівно на період зонд-сигналу. Щоби зменшити часові стрибки на виході порогового пристрою, необхідно згладити сигнал на його вході. Це досягається встановленням фільтра низької частоти (ФНЧ) на виході фіксатора рівня.

Для поліпшення якості фільтрації й зменшення порядку ФНЧ проведено модифікацію самого фіксатора рівня, оновлену схему якого подано на рис. 9.

До схеми додано випрямний діод D3 і згладжувальний конденсатор C8. У цьому випадку сигнал на виході фільтра приймає вид, представлений на рис. 10.

Для подальшого згладжування сигналу додамо до моделі ФНЧ Баттерворта 1-го порядку, схему якого наведено на рис. 11 [8]. У цьому випадку пороговий пристрій підключається не до виходу фіксатора рівня, а до виходу ФНЧ.

Фільтр має частоту зрізу 5 кГц, що зумовлює деяке затягування фронту прийнятого зонд-сигналу, однак при цьому суттєво знижується рівень пульсацій, що дозволяє зменшити вплив шумів на точність роботи УСЛП. Вихідний сигнал ФНЧ подано на рис. 12.

На заключному етапі моделювання повторно визначаємо залежність часового положення прийнятого зонд-сигналу від шумової реалізації, а також розраховуємо похибки роботи системи після виконаних доопрацювань:

абсолютна похибка: 8,1 мкс,
систематична похибка: 191 мкс.

ВИСНОВКИ

Математична модель УСЛП, створена в пакеті автоматизованого проектування електроніки Proteus, дозволяє відбити фізику роботи системи, а також визначити причини основних похибок місцевизначення. Такими причинами є вплив каналних шумів, а також наведення від електроосвітлювальної мережі.


Шляхом коригування частотної характеристики підсилювача УЗ мітки вдалося знизити абсолютну похибку оцінки часового положення прийнятого зонд-сигналу за впливу ЕМ наведень електроосвітлювальної мережі з 12,5 до 0,5 мкс. Похибку, зумовлену каналними й внутрішніми шумами системи, вдалося знизити з 13 мкс до 8,1 мкс шляхом підключення ФНЧ до виходу порогового пристрою. У результаті виконаних доопрацювань абсолютну похибку оцінки часового положення, зумовлену цими джерелами, вдалося знизити до 8,6 мкс, отже, похибка оцінки відстані з урахуванням швидкості звуку в повітрі (331 м/с) становить 2,8 мм.

Систематична похибка за першої модифікації зменшилася зі 174 до 134 мкс, а за другої — збільшилася зі 113 до 191 мкс (внаслідок затягування фронту сигналу у ФНЧ). Однак, ця похибка не має істотного впливу на точність позиціонування,

оскільки її можна усунути програмними методами.

У подальшому планується дослідження каналних похибок (таких, як мінливість швидкості звуку, переміщення повітряних мас) і розроблення методів їхнього урахування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Леденец BrainPort позволяет слепым видеть языком [Электронный ресурс] / ©2001—2012 MEMBRANA — Режим доступа: (Candy BrainPort allows the blind to see the tongue [electronic resource] / ©2001-2012 MEMBRANA — Access: WWW / URL: <http://www.membrana.ru/particle/1131>.
2. GPS для слепых: Заменяет ли гаджеты собаку-поводыря? [Электронный ресурс] / ©2000—2015 МТПК «Мир» — Режим доступа: (GPS for the blind: replaced gadgets guide dog? [Electronic resource] / ©2000—2015 «Mir» — Access mode: WWW / URL: <http://mir24.tv/news/society/11596451>.
3. Пат. 71860 Україна, МПК (2012.01) G01S 11/00. Спосіб ультразвукового локального позиціонування рухомих об'єктів / Лівнов В.О., Коваль Ю.О., заявник та власник Харківський нац. університет радіоелектр. — № u2012 01318, подано 08.02.2012, опубл. 25.05.2012 бюл. №14. (Pat. 71860 Ukraine, IPC (2012.01) G01S 11/00. The method of ultrasonic local positioning moving objects / V.A. Livnov, Y.A. Koval, the applicant and the owner Kharkov National University of Radioelectronics. — № u2012 01318, filed 08.02.2012, publ. 25.05.2012 bul. №14.)
4. Костыря А.А., Ливнов, В.А. Математическое моделирование работы ультразвуковой высокоточной системы локального позиционирования / А.А. Костыря, В.А. Ливнов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. (Kostyrya A.A., Livnov V.A. Mathematical modeling of ultrasonic precision local positioning system / A.A. Kostyrya, V.A. Livnov // Radiotekhnika: Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection) 2014. Вип./Vol. 177, с/р. 28—36.
5. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина — М.: ИПРЖР (The global satellite navigation system GLONASS / Ed. V.N. Kharisov, A.I. Perov, V.A. Boldin — М.: IPRZHR), 1998. — с/р.400.
6. В.С. Блінцов. Основи проектування спеціалізованих мікроконтролерних та вбудованих комп'ютерних систем для засобів суднової і промислової автоматизації: навчальний посібник. Частина 1. / В.С. Блінцов, Д.О. Жук, М.В. Джангиров, І.Ю. Жук, С.П. Голіков, С.Г. Чорний — К.: Кондор-Видавництво, (V.S. Blintsov. Fundamentals of specialized microcontroller and embedded computer systems for ship facilities and industrial automation: a tutorial. Part 1 / V.S. Blintsov, D.O. Beetle, N.V. Dzhanyhrov, I.U. Zhuk, S.P. Golikov, S.G. Chorny — К.: Kondor — Publisher), 2014. — с/р. 348.
7. Ицхоки Я. С., Овчинников Н. И. Импульсные и цифровые устройства. — М.: Советское радио, (Itskhoki Y.S. Ovchinnikov N.I. Pulse and digital devices. — Moscow: Soviet Radio) 1972, с/р. 243.
8. Активные RC-фильтры на операционных усилителях / пер.: В.В. Масленников, В.А. Меркулова; ред. Г.Н. Алексаков. — М.: Энергия, (Active RC-filter on operational amplifiers/ Translation.: V.V. Maslennikov, V.A. Merkulov; Ed. G.N. Aleksakov. — М.: Energy), 1974. — с/р. 64. 

Отримано / received: 22.05.2015.

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

УДК 53.089.62

АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТИ ВОДИ У ВИТРАТОМІРНИХ УСТАНОВКАХ

Ю. Кузьменко, заступник генерального директора,

О. Зайцева, заступник начальника відділу,

ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Розглянуто питання підвищення точності витратомірних установок. Синтезовано рівняння вимірювання витрати та складено бюджет невизначеності вимірювань. Наведено джерела невизначеності вимірювань, зумовлені неточністю калібрування засобів вимірювань та конструктивними параметрами установки. Розроблено математичну модель розширеної невизначеності. Виявлено джерела невизначеності, які суттєво впливають на розширену невизначеність еталона. Наведено залежність невизначеності еталона від витрати та температури води.

The question of accuracy increase of the flowmeter test stations is considered. Equalization of measuring of flowrate, which shows that a flowrate in the measuring area of station can be calculated on results the direct measuring of water mass and temperature, time,

temperature and relative humidity of surrounding air, atmospheric pressure, is synthesized. The sources of measurement uncertainty, caused of calibration of measurement instruments which are parts of the flowmeter station, and by its structural parameters, are exposed, uncertainty budget is prepared. The offered theoretical researches are applied at development of State primary standard of units of volume, mass, volume and mass flowrate of hot water. The values of uncertainty sources are experimentally estimated. Researches of standard allowed to expose the uncertainty sources, essentially influencing on the expended uncertainty of standard. Dependence of uncertainty of standard on a flowrate and temperature of water showed. The proposed model of the extended uncertainty of measuring allows defining requirements to accuracy of measurement instruments, which constitute standard, and to the structural parts of standard based on prescribed extended uncertainty of standard.

Ключові слова: витратомірні установки, рівняння вимірювань, невизначеність вимірювань, державний первинний еталон.

Keywords: flowmeter stations, measurement equation, uncertainty of measurements, state primary standard.

Основним завданням створення еталонної бази України у сфері вимірювань витрати холодної та гарячої води, інших рідин є забезпечення єдності вимірювань, підвищення точності та достовірності вимірювання під час здійснення обліку споживання ресурсу у житлово-комунальному господарстві, паливно-енергетичному комплексі, а також для забезпечення технологічних процесів у харчовій і хімічній промисловості та в цілому ряді інших галузей народного господарства України.

Для забезпечення вирішення цих завдань в Україні широко застосовуються понад 100 типів витратомірів і лічильників води, інших рідин та понад 370 повірочних витратомірних установок (установок) для їх повірки. Аналіз наявної методології відтворення одиниці витрати води за допомогою еталонів, запозичених з інших повірочних схем, засвідчив, що вона не забезпечує необхідної точності й достовірності. Це підтвердили і результати проведення державної метрологічної атестації повірочних установок, виконані ДП «Укрметртестстандарт» [1].

Завдання полягає у створенні установок підвищеної точності з широким діапазоном вимірювання витрати води. Для аналізу її точності необхідно синтезувати рівняння вимірювання витрати за допомогою цієї установки.



Ю. Кузьменко



О. Зайцева

Об'ємна витрата води, що протікає через вимірювальну ділянку установки, визначається за формулою [2]:

$$Q_V = \frac{V_m}{T} = \frac{1}{T} c_V \times \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_{дв}}, \quad (1)$$

де Q_V – об'ємна витрата води; V_m – об'єм води, вимірений за допомогою вагів; T – час вимірювань; c_V – коригувальний коефіцієнт; m_n – показання вагів на початку вимірювання; m_k – показання вагів у кінці вимірювання; $\rho_{дв}$ – густина дистильованої води за температури під час вимірювань; ρ_{p20}, ρ_{d20} – густини реальної та дистильованої води за температури 20 °C відповідно.

Густина дистильованої води визначається згідно з [3]. Поправковий множник ρ_{p20} / ρ_{d20} уведено до рівняння для врахування густини реальної води у зв'язку з тим, що у стандартних довідкових даних наведено густину дистильованої води. Густина реальної води за 20 °C ρ_{p20} вимірюється за допомогою робочих еталонів 1-го разряду – пікнометрів за [4].

Коригувальний коефіцієнт розраховується за формулою [5]:

$$c_V = (1 - \rho_a / \rho_r) / (1 - \rho_a / \rho_{дв}), \quad (2)$$

де ρ_a – густина навколишнього повітря за умов вимірювання; ρ_r – густина матеріалу стандартних об'єктів, за допомогою яких калібруються ваги.

Значення густини стандартних об'єктів, за допомогою яких калібруються ваги, згідно з [5] приймається рівним 8000 кг/м³. Густина повітря залежить від температури та відносної вологості повітря, атмосферного тиску згідно з [6].

Отже, одиниця витрати води матеріалізується у виді потоку води, що протікає через вимірювальну ділянку за певний інтервал часу. Вимірене значення витрати води розраховується за формулою (1) за результатами прямих вимірювань таких величин: маси і температури води, інтервалу часу, температури та відносної вологості навколишнього повітря, атмосферного тиску.

СКЛАДАННЯ БЮДЖЕТУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Аналіз невизначеності вимірювань має значення як під час проектування, так і за реалізації високоточного вимірювального обладнання, і є основою для присвоєння цьому обладнанню нормованих точнісних характеристик.

Джерелами невизначеності вимірювань витрати в установці є, насамперед, невизначеності калібрування засобів вимірювань, що входять до її складу. Крім того, є ряд джерел невизначеності, пов'язаних з конструктивними параметрами установки.

Вода, що пройшла через вимірювальну ділянку установки, надходить до ємності для зважування і за час вимірювань випаровується. Тобто під час зважування води в кінці вимірювання маса води в ємності для зважування буде меншою від маси води, що пройшла через вимірювальну ділянку. В результаті об'єм, розрахований за виміреною масою, буде меншим від об'єму, що пройшов через вимірювальну ділянку на величину [7]:

$$V_o = o \cdot T / (\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_{дв} \quad (3)$$

де o – інтенсивність випаровування води за час вимірювання.

Функція дивертера, що входить до складу установки, полягає у зміні напрямку потоку води під час вимірювання маси води в ємності для зважування. Якщо дивертер працює ідеально, тобто переключення напрямку потоку на ємність для зважування на початку вимірювання та зворотне переключення потоку з ємності для зважування в кінці вимірювання відбуваються миттєво, зміна витрати в часі є прямокутним профілем, весь об'єм води стікає до ємності для зважування.

У реальності в момент надходження сигналу щодо початку вимірювання за спрацювання дивертера збільшення витрати від 0 до номінального значення відбувається за інтервал часу між моментами T_1 і T_2 , як це показано на рис. 1а.

Аналогічно за спрацювання дивертера в кінці вимірювання зменшення витрати від номінального значення до 0 відбувається за інтервал часу між моментами T_3 і T_4 . Якщо час вимірювання обрати між моментами T_1 і T_4 , до ємності для зважування надійде менше води, ніж за ідеального профілю витрати. Якщо час вимірювання обрати між T_2 і T_3 , до ємності для зважування надійде більше води, ніж за ідеального профілю витрати.

Ідеальними пунктами початку і кінця вимірювання можуть бути моменти $T_{ін}$ та $T_{ік}$, які містяться в тих точках, де маємо рівність площ $A_1 = A_2$ й $A_3 = A_4$. У цьому випадку похибка від недоливу або переливу води не з'являється.

У реальних дивертерах, завдяки регулюванню положення фотодатчиків, створюються реальні моменти запуску $T_{рп}$ і $T_{рк}$, які обмежують час вимірювання. При цьому виникає похибка часу вимірювання:

$$\Delta T = (T_{ра} - T_{ида}) + (T_{илб} - T_{рб}). \quad (4)$$

Знайти цю різницю часу аналітично неможливо, оскільки невідомі залежності $Q_{вкл}(T)$ та $Q_{вик}(T)$.

Однак, якщо припустити, що функції $Q_{вкл}(T)$ та $Q_{вик}(T)$ лінійні, як це показано на рис. 1б, можна оцінити об'єм води, який не враховується

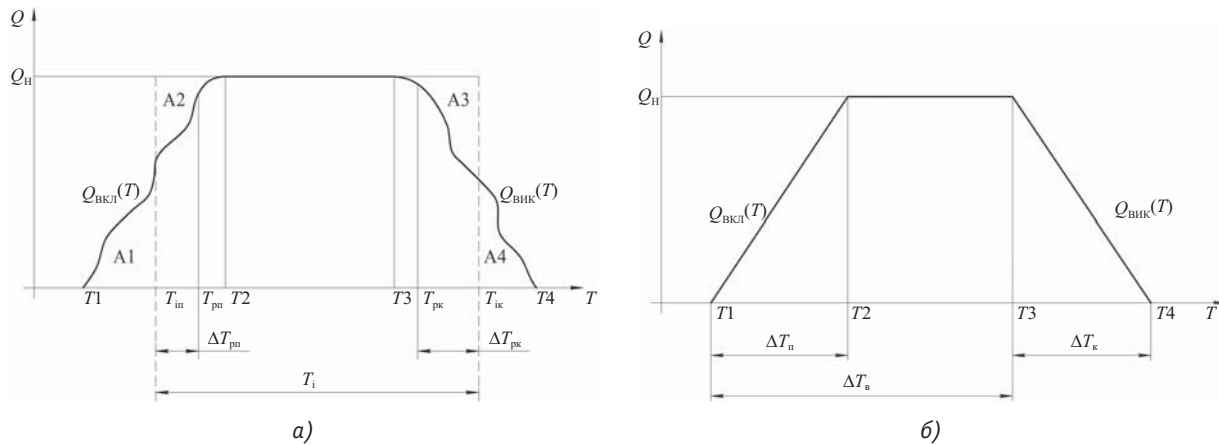


Рис. 1. Діаграми роботи дивертера

а) робота за реальних умов; б) робота за припущення лінійної зміни витрати

Fig. 1. Diagrams of diverter work

а) work is in the real terms; б) work at assumption of linear change of flowrate

за зважування:

$$V_{difT_{div}} = \int_{T_1} Q_1 dT - \int_{T_2} Q_2 dT = \frac{1}{2} Q_n \cdot (\Delta T_n - \Delta T_k) = \frac{c_V}{2 \cdot T} \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_{дн}} \cdot difT_{div}, \quad (5)$$

де $V_{difT_{div}}$ — об'єм води через різницю часу перенаправлення потоку води за допомогою дивертера; $difT_{div}$ — різниця часу перенаправлення потоку води за допомогою дивертера у прямому та зворотному напрямках.

На рис. 2 схематично показано ще одне джерело невизначеності. Вода під час проходження за трубопроводом від витратоміра, що калібрується, 1 до виходу з трубопроводу 2 остигає. Тому виникає різниця температур $t1-t2$.

Внаслідок різних коефіцієнтів температурного розширення матеріалу трубопроводу та води зміни об'ємів ділянки трубопроводу і води будуть різними, і до ємності для зважування надійде об'єм води, що відрізняється від об'єму води, що пройшов через

вимірювальну ділянку, на величину:

$$V_{\Delta t_2} = V_{mp} (3 \cdot \alpha - \beta) \cdot \Delta t_2, \quad (6)$$

де $V_{\Delta t_2}$ — зміна об'єму води, що потрапляє до ємності для зважування, через різні коефіцієнти температурного розширення матеріалу трубопроводу і води; V_{mp} — номінальний об'єм трубопроводу на ділянці від витратоміра, що калібрується, до виходу з трубопроводу; α — коефіцієнт лінійного розширення матеріалу трубопроводу; β — коефіцієнт об'ємного розширення води; Δt_2 — різниця температур води у вимірювальній ділянці і на виході з трубопроводу.

Об'єм води визначається через масу води та її густину. Густина, у свою чергу, розраховується згідно з [3] для атмосферного тиску. Однак вода у вимірювальній ділянці установки міститься під певним надлишковим тиском. При цьому з'являється методична похибка від різниці реального та розрахункового значень тиску. Зміна об'єму води внаслідок різниці тиску у вимірювальній ділянці й атмосферного тиску визначається за формулою:

$$V_{\Delta p} = c_V \cdot \frac{m_k - m_n}{(\rho_{p20} / \rho_{d20}) \rho_B^2} \cdot \frac{\partial \rho_B}{\partial p} \cdot \Delta p \quad (7)$$

де $V_{\Delta p}$ — зміна об'єму води внаслідок різниці тиску у вимірювальній ділянці й в ємності для зважування; $\partial \rho_B / \partial p$ — перша похідна густини води за тиском; Δp — різниця атмосферного тиску і реального тиску у вимірювальній ділянці.

Окрім наведених вище, джерелами невизначеності вимірювань є невизначеність вимірювання густини реальної води за температури 20 °C та похибка розрахункових значень густини за [3].

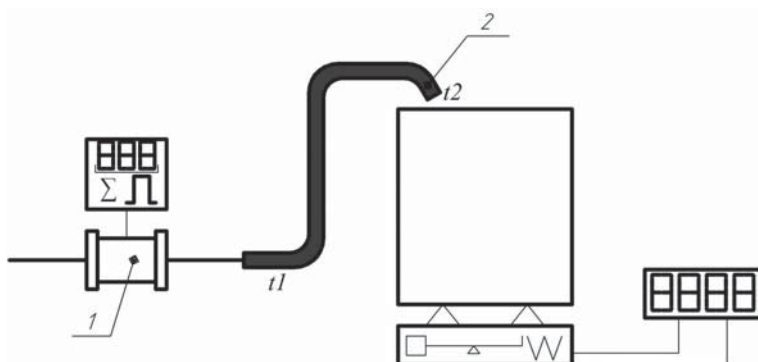


Рис. 2. Остигання води на ділянці від витратоміра, що калібрується, до виходу з трубопроводу

Fig. 2. Cooling-down of water on an area from the calibrated flowmeter to the exit from a pipeline

Отже, математична модель розширеної невизначеності вимірювань витрати в установці має вид:

$$U = 2 \cdot \left[\begin{aligned} & u_c^2(m_n) + u_c^2(m_k) + \left(\frac{m_k - m_n}{\rho_{\text{дв}}} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \left(\frac{m_k - m_n}{\rho_{\text{дв}}} \right)^2 \cdot u_c^2(\rho_{\text{дв}}) + \\ & + \left(\frac{m_k - m_n}{T} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \left(\frac{m_k - m_n}{T} \right)^2 \cdot u_c^2(\text{diff}T_{\text{div}}) + \left(\frac{m_k - m_n}{\rho_{\text{дв}}} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)^2 \cdot u_c^2(p) + \\ & + \left(\frac{c_V \rho_{\text{дв}}}{T \rho_{\text{дв}} \rho_{\text{дв}}} \right)^2 + \left(\frac{m_k - m_n}{c_V} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial p} \right)^2 \cdot u_c^2(p) + \left(\frac{m_k - m_n}{c_V} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial T} \right)^2 \cdot u_c^2(T_i) + \\ & + \left(\frac{m_k - m_n}{c_V} \cdot \frac{\partial c_V}{\partial B a} \right)^2 \cdot u_c^2(B a) + \left(\frac{m_k - m_n}{\rho_{\text{дв}}} \right)^2 \cdot u_c^2(\rho_{\text{дв}}) + \\ & + \left(\frac{m_k - m_n}{T \rho_{\text{дв}} \rho_{\text{дв}} \rho_{\text{дв}}} \right)^2 \cdot u_c^2(\rho_{\text{дв}}) \\ & + \left(\frac{\rho_{\text{дв}}}{\rho_{\text{дв}} \rho_{\text{дв}}} \right)^2 \cdot u_c^2(o) + \left(\frac{3\alpha - \beta}{T} \cdot V_{\text{sw}} \right)^2 \cdot u_c^2(\Delta t_s) \end{aligned} \right]^{0.5} \quad (8)$$

Запропонована модель дозволяє вирішити дві задачі: маючи задану невизначеність вимірювань на установці, визначити вимоги до точнісних характеристик засобів вимірювання, що входять до її складу, та до конструктивних параметрів установки. У разі, коли підвищення точності складових частин недоцільне з технічних або економічних причин, за-

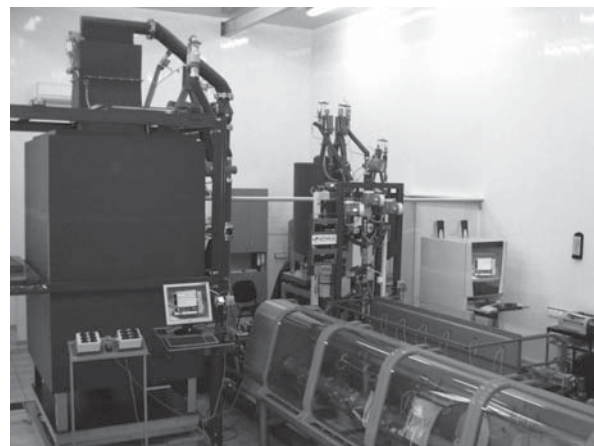


Рис. 3. Загальний вид державного первинного еталона

Fig. 3. General view of state primary standard

пропонована модель дозволяє розрахувати поправку до результатів вимірювань. Це дає змогу зменшити невизначеність вимірювань.

Наведений вище аналіз застосовано за досліджень точнісних характеристик Державного пер-

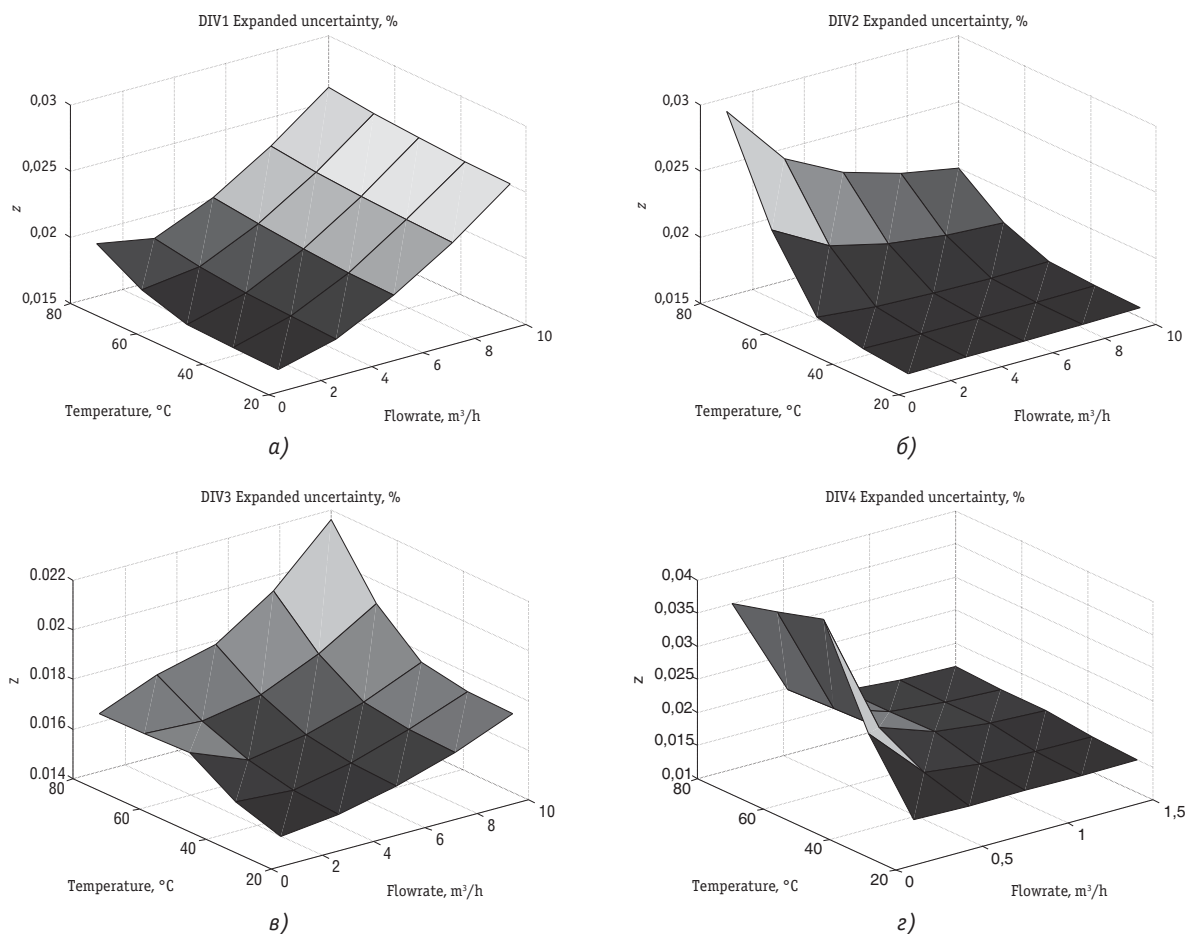


Рис. 4. Розширена невизначеність вимірювань витрати:

а) за $Q = (20 - 160) \text{ м}^3/\text{год}$, б) за $Q = (9 - 25) \text{ м}^3/\text{год}$, в) за $Q = (1 - 10) \text{ м}^3/\text{год}$, г) за $Q = (0,2 - 1,5) \text{ м}^3/\text{год}$

Fig. 4. Extended uncertainty of flowrate measurements:

а) at $Q = (20 - 160) \text{ м}^3/\text{h}$, б) at $Q = (9 - 25) \text{ м}^3/\text{h}$, в) at $Q = (1 - 10) \text{ м}^3/\text{h}$, д) at $Q = (0,2 - 1,5) \text{ м}^3/\text{h}$

винного еталона одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, який створено в ДП «Укрметртестстандарт» [8].

Еталон складається з таких комплексів засобів вимірювальної техніки та допоміжного обладнання:

- гравіметричного комплексу для відтворення та вимірювання одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, що протікає за трубопроводом;
- комплексу для передавання розміру одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, що протікає за трубопроводом, методом звірень за допомогою компаратора.

Загальний вид еталона наведено на рис. 3.

У процесі атестації еталона досліджено всі джерела невизначеності. Калібрування засобів вимірювань, які входять до складу еталона, проводилося згідно з [9–12].

Результати досліджень інтенсивності випаровування представлені у [16].

Проведений аналіз засвідчив, що складовими, які суттєво впливають на розширену невизначеність вимірювань на еталоні, є такі:

- невизначеність калібрування вагів, перетворювачів температури, вимірювача інтервалу часу;
- випаровування води під час вимірювання;
- різниця часу переключення дивертера в прямому та зворотному напрямках;
- різниця температури води у вимірювальній ділянці та на виході з трубопроводу;
- різниця тиску у вимірювальній ділянці та в ємності для зважування.

Розширені невизначеності вимірювань на еталоні у різних діапазонах витрати та температури наведено на рис. 4.

Еталон забезпечує відтворення, зберігання та передавання одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води, що протікає за трубопроводом, з відносним середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань, що не перевищує $3 \cdot 10^{-4}$ за 10 незалежних спостережень.

Невиключена систематична похибка не перевищує $5 \cdot 10^{-4}$. Похибка передавання одиниць не перевищує $1 \cdot 10^{-4}$. Невизначеність вимірювань типу A $u_A = 3 \cdot 10^{-4}$, типу B $u_B = 2,5 \cdot 10^{-4}$, сумарна стандартна невизначеність $u_C = 4 \cdot 10^{-4}$, розширена невизначеність $U = 8 \cdot 10^{-4}$ (за коефіцієнта охоплення $K = 2$, довірча ймовірність $P = 0,95$).

Створений державний первинний еталон став основою Державної повірочної схеми для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води [14].

ВИСНОВКИ

- * Синтезовано рівняння вимірювання витрати води у витратомірній установці;
- * виявлено джерела невизначеності вимірювань та складено бюджет невизначеності;
- * створено математичну модель розширеної невизначеності, що дозволяє за заданою розширеною невизначеністю установки визначити вимоги до точнісних характеристик засобів вимірювань, що входять до складу установки, та до її конструктивних параметрів;
- * створено Державний первинний еталон одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води;
- * розроблено та впроваджено національний стандарт на Державну повірочну схему для засобів вимірювань об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Кузьменко Ю., Зайцева О., Гаврилкін М. Забезпечення єдності вимірювань у сфері обліку холодної та гарячої води // Метрологія та прилади (Kuzmenko Iu., Zaitseva O., Gavrylkin M. Assurance of traceability in field of cold and hot water measurements // Metrology and instruments). — 2009. — № 4 (18). — С. (P.) 39—42.
2. ISO 4185-1980 Measurement of liquid flow in closed conduits — Weighing method (Вимірювання витрати рідини в закритих каналах — Метод зважування).
3. ГСССД 2-77. Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 оС (GSSSD 2-77. Water. Density at atmospheric pressure and temperature from 0 to 100 °C).
4. ДСТУ ГОСТ 8.024 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання густини (ГОСТ 8.024-2002, IDT) (DSTU GOST 8.024 Metrology. State verification schedule for means of measuring density (GOST 8.024-2002, IDT)).
5. ДСТУ OIML D28:2008 Умовне значення результату зважування у повітрі (DSTU OIML D28:2008 Conventional value of the result of weighing in air) (OIML D 28:2004, IDT)).
6. ДСТУ OIML R111-1:2008 Гіри класів E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 та M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробувань ((DSTU OIML R111-1:2008 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements) (OIML R111-1:2004, IDT)).
7. Зайцева Е.А., Кузьменко Ю.В., Карташев В.И. Экспериментальные исследования эталона объема, массы, объемного и массового расхода горячей воды // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008) (14—16 жовтня 2008 р.), том 2. — Харків: ННЦ «Інститут метрології», (Zaitseva E.A., Kuzmenko Iu.V., Kartashev V.I. Experimental researches of standard of volume, mass, volume and mass flowrate of hot water // Metrology and measuring technique (Metrology-2008) (14—16 October 2008), volume 2. — Kharkov: NSC «Institute of metrology» 2008. — 350 с.(p.) — с.(p.) 129—131.
8. Кузьменко Ю.В. Государственный первичный эталон Украины единиц объёма, массы, объёмного и массового расхода горячей воды / Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности: Матер. 3-й научн.-практ. конф., 29—31 мая [2012 г.] — Санкт-Петербург/ Составит.: Е. Просяникова. — Санкт-Петербург (Kuzmenko Iu.V. State primary standard of Ukraine of units of volume, mass, volume and mass flowrate of hot water/ An energy-savings in the systems of heat- and gas-supplying. Increase of power efficiency: Mater. of 3th scient.-pract. conf.,

- 29-31 May [2012] — Sankt-Peterburg/ Comp.: E. Prosiannikova. — Sankt-Petersburg: 2012. — 367 с.(р.): ил.(ill.) — рус.(rus.) — с.(р.) 140—144.
9. EURAMET/cg-18/v.02. Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments (Настанова з калібрування неавтоматичних зважувальних приладів)/ Електронний ресурс. Режим доступу http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/previous_versions/EURAMET-cg-18-02_Non-Automatic_Weighing_Instruments.pdf
 10. МКУ 040-24/06-2011 Измерители температуры с цифровой индикацией. Методика калибровки. — Киев: ГП «Укрметрестандарт», (Measuring devices of temperature with a digital indication. Method of calibration. — Kiev: SE «Ukrmetrteststandart», 2011. — 15 с (p).
 11. МКУ 101/26-02-11 Измеритель интервала времени. Методика калибровки. — Киев: ГП «Укрметрестандарт», (Measuring device of time domain. Method of calibration. — Kiev: SE «Ukrmetrteststandart», 2011. — 11 с (p).
 12. МКУ 066-39/04-2011 Измерители атмосферного давления. Методика калибровки. — Киев: ГП «Укрметрестандарт», (Measuring devices of atmospheric pressure. Method of calibration. — Kiev: SE «Ukrmetrteststandart», 2011. — 12 с (p).
 13. Декуша Л.А., Воробьев Л.И., Бондар А.Н., Кузьменко Ю.В., Зайцева Е.А. Экспериментальное определение массы испарившейся воды в рабочем цикле горячей воды в проливной установке / Проблемы обліку теплоти та води в Україні: Матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 черв. [2010 р.]/ Уклад.: В.І. Карташев, О.Б. Ісхакова. — К.: ТОВ «АВЕГА», 2010. — 160 с.: ил. — укр., рос. — Бібліограф. в кінці ст., с. 23—30 (Dekusha L.A., Vorobiov L.I., Bondar A.N., Kuzmenko Yu.V., Zaitseva E.A. Experimental determination of mass of evaporating water is in the working loop of hot water flowmeter station / Problems of account of warmth and water are in Ukraine: Mater. of 7th intern. scient.-pract. conf., 15-16 June [2010] / Comp.: V.I. Kartashev, O.B. Iskhakova. — K.: Co Ltd «AVEGA», 2010. — 160 p.: il. — ukr., rus. — Bibliography at end of art., p. 23—30.
 14. ДСТУ 7476:2013 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму, маси, об'ємної та масової витрати гарячої води (DsTU 7476:2013 Metrology. State verification schedule for means of measuring of volume, mass, volume and mass flowrate of hot water).

Отримано / received: 06.04.2015.

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



Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет (ВНТУ)

Академія метрології України

Новий університет Лісабону

Технічно-гуманітарна академія м. Бельсько-Бяло (Польща)

Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Система»

ДП «Вінницький науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

Учбово-науковий центр «Паллада»

III Міжнародна наукова конференція

ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ (ВКДТС — 2015)

Вінниця, 27—29 жовтня 2015 року

Конференція присвячена пам'яті завідувача кафедри метрології та промислової автоматики ВНТУ, доктора технічних наук, професора Поджаренка В.О.

Напрями роботи конференції:

Теоретичні основи вимірювань, контролю та технічної діагностики. Невизначеність вимірювань.

Первинні вимірювальні перетворювачі та сенсори.

Прилади та методи контролю речовин, матеріалів та виробів.

Метрологічне забезпечення засобів вимірювань, контролю та діагностики.

Випробування та надійність.

Математичне моделювання процесів у засобах вимірювання, контролю та діагностики.

Інформаційно-вимірювальні системи.

Біотехнічні та медичні прилади і системи.

Працюватиме студентська секція.

Робочі мови: українська, російська, англійська.

НАУКОВИЙ КОМІТЕТ

Голова: Грабко В.В., д.т.н., проф., ректор Вінницького національного технічного університету

Заступники голови: Володарський Є.Т., д.т.н., проф. (Україна, Київ, Академія метрології України)

Igor Piotr Kurytnik, prof., dr hab. Inz. (Poland, University of Bielsko-Biala)

Матеріали конференції: Тези доповідей будуть опубліковані на сайті конференції до початку роботи конференції та у виді збірника праць. Матеріали доповідей, виголошені на конференції та рекомендовані до публікації, будуть опубліковані (після коригування відповідно до вимог журналу) в фаховому виданні «Метрологія та прилади», включеного до переліку ДАК України та до наукометричної бази Index Copernicus.

Надсилати матеріали

в електронному виді за адресою:

measurement.vntu@gmail.com;

поштою за адресою: д.т.н., проф. Кучеруку В.Ю., кафедра метрології та промислової автоматики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна

Довідки за телефонами

(відповідальні секретарі):

Гнесь Тетяна Вікторівна 097-350-73-10

Овчинников Костянтин В'ячеславович 096-543-96-02

Запрошення, заявки на участь у конференції,

а також інша інформація:

<https://sites.google.com/site/measurementvntu/>

<http://www.mpa.vntu.edu.ua/>

УДК 681.121:006.91

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВУЗЛІВ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ РІЗНИХ ПРИНЦИПІВ ДІЇ

О. Середюк, доктор технічних наук, професор кафедри «Методи та прилади контролю якості та сертифікації продукції»,

Т. Лютенко, аспірант кафедри,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Наведено результати вимірювань об'ємної витрати природного газу послідовно встановленими витратомірами змінного перепаду тиску й ультразвуковим за їх промислової експлуатації. Здійснено порівняльний аналіз статистичних характеристик результатів вимірювання. Досліджено ймовірнісні характеристики результатів вимірювання і змодельовано види законів розподілу результату вимірювання досліджуваними витратомірами. Проаналізовано кореляційні характеристики отриманих результатів вимірювання і подано висновки щодо напрямків підвищення точності та достовірності вимірювань за обліку природного газу.

Formulated topicality of studying imbalance of natural gas when it is calculated in Ukraine [1, 2]. The results of new investigations in the study of gas losses due to the use of different measuring methods [5, 9]. Explored new aspects of probabilistic

approaches in the study of metrological characteristics of the calculation of natural gas [2, 6–8]. Given the results of measurements of volume consumption of natural gas made with flowmeter of variable pressure drop and ultrasonic flowmeter connected in series for their industrial operation (Fig. 1). The comparative analysis of the statistical characteristics of measurement results was done (Table 1). Investigated probabilistic characteristics measurement results and modeled species distribution laws studied by flow measurement result (Fig. 2). Realized type modeling of the distribution of measurement results and various types of flowmeters set the conditions for their acceptance as normal or uniform (Table 2). Analyzed the correlation characteristics of measurement results (Fig. 3, 4) and obtained conclusions about patterns of changes in gas flow measurement results. Obtained conclusions about ways to increase the accuracy and reliability of measurements of the calculation of natural gas.

Ключові слова: витратомір змінного перепаду тиску, ультразвуковий витратомір, природний газ, щільність розподілу ймовірностей, кореляційні функції.

Keywords: flowmeter of variable pressure drop, ultrasonic flowmeter, natural gas, probability density function, correlation functions.

Аспекти підвищення точності обліку природного газу (ПГ) були і залишаються актуальними науково-прикладними завданнями, оскільки вони стосуються не лише раціонального та економного використання ПГ, але й питань досягнення енергетичної безпеки України. При цьому основну увагу приділяють дослідженню питань визначення втрат природного газу внаслідок наявності дисбалансу в системах транспортування та розподілу природного газу [1] або вивчення практичних аспектів газообліку з метою досягнення балансу газу в газотранспортній системі [2]. Водночас потребують більш детального вивчення конкретні засоби вимірювання, на базі яких реалізовано вузли обліку газу, оскільки у багатьох випадках можлива альтернатива щодо вибору певного типу засобу вимірювання витрати чи об'єму газу, і за цих обставин переважаючим чинником за вибору є не лише нормативні або регламентні документи, але й відповідні метрологічні та технічні характеристики засобів вимірювання.

На сьогодні для обліку природного газу на газовимірювальних і газорегулювальних станціях найбільшого застосування набули засоби вимірювання, які реалізують метод змінного перепаду тиску [3]. Разом з цим все більшого поширення отримують



О. Середюк



Т. Лютенко

вузли обліку газу з використанням турбінних лічильників, укомплектованих відповідними обчислювачами [3]. Водночас практичного застосування набувають вузли обліку на базі ультразвукових лічильників газу [4]. При цьому практично відсутні результати порівняльного аналізу результатів вимірювань різними засобами.

Відомі дослідження [5] щодо розбіжностей у результатах обчислень об'єму газу присвячені визначенню впливу різних алгоритмів підрахунку об'єму газу за реальних умов газопостачання, які відображають динаміку газоспоживання протягом певного інтервалу часу (години, доби) за умови неперервності робочих значень тиску і температури газу. Зокрема, стверджується, що за таких умов вимірювання одного і того ж самого об'єму газу за різними програмами опрацювання вимірюваної інформації з урахуванням різного часу усереднення похибка може перевищувати 14 %. При цьому інформація щодо порівняння миттєвих витрат з урахуванням метрологічних аспектів за вимірювання газу засобами різних принципів дії авторам є невідомою.

Стосовно актуальності дослідження впливу метрологічних аспектів за опрацювання результатів вимірювань витрати й об'єму ПГ свідчать нові наукові дослідження у цій сфері [6—8]. Окрім того, як відомо, різні засоби обліку ПГ можуть забезпечувати отримання різних результатів вимірювань, оскільки, незважаючи на практичну співрозмірність похибок робочих засобів витратовимірювальної техніки, з точки зору метрологічної оцінки результати можуть суттєво відрізнятися між собою. Це зумовлює в багатьох випадках, у першу чергу за комерційного обліку, встановлення дублювальних вузлів вимірювання об'єму та об'ємної витрати ПГ, як, наприклад, на газовимірювальній станції «Гребеники» [9], де на кожній із восьми замірних ниток діаметром 500 мм встановлено послідовно діафрагму й ультразвуковий лічильник *Q Sonic* фірми «Instromet». У статті стверджується, що таке дублювання різних методів вимірювань підвищує надійність проведення вимірювань, однак конкретних числових значень чи кількісних характеристик не надається.

Разом з цим у сфері газообліку все більшою мірою застосовують методи статистичного і кореляційного аналізу, які є невід'ємною частиною метрологічного аналізу результатів досліджень [2, 10]. Тому потребують наукового вивчення, в тому числі експериментальних метрологічних досліджень, питання точності обліку ПГ засобами вимірювальної техніки різних принципів дії.

Мета роботи — експериментальні дослідження метрологічних та ймовірнісних характеристик послідовно встановлених витратомірів ПГ різних принципів дії для пошуку напрямків підвищення достовірності обліку ними ПГ.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Об'єктом дослідження вибрано процес вимірювання витрати ПГ витратомірами ультразвуковими і змінного перепаду тиску. Технічний аспект досліджень реалізовано на базі ультразвукового витратоміра типу ГУВР-011 (похибка вимірювання $\pm 0,5\%$, виробник АТ «Енергооблік», м. Харків) і витратоміра змінного перепаду тиску зі звукувальним пристроєм (діафрагмою), який укомплектовано обчислювачем об'ємної витрати та об'єму газу ОЕ-22ДМ (границя допустимої відносної похибки за обчислення об'єму газу, зведеного до стандартних умов, $\pm 0,5\%$, виробник ТОВ «СЛОТ», м. Івано-Франківськ). Досліджувані засоби змонтовано за їх промислової експлуатації на замірному вузлі одного з промислових підприємств м. Івано-Франківська. Умови досліджень стосувалися їх зимового періоду експлуатації, за яких температура ПГ становила $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, надлишковий тиск газу 0,3 МПа, умовний діаметр вимірювального трубопроводу 300 мм. Під час експериментальних досліджень з інтервалом 15 с одночасно фіксувалися показання двох витратомірів за вимірювання витрати газу за робочих умов, результати яких подано на рис.1.

Видно, що процес вимірювання характеризується деякою неперервністю, причиною якої можуть слугувати миттєві зміни споживання витрати ПГ, а також нестабільність метрологічних характеристик складових вузлів досліджуваних технічних засобів витратовимірювання. Це обґрунтовує можливість

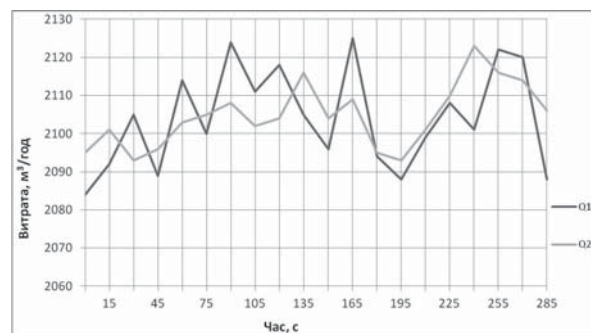


Рис. 1. Графічна ілюстрація результатів вимірювання витрати:

Q1 — ультразвуковий витратомір;

Q2 — витратомір змінного перепаду тиску

Fig. 1. Graphic illustration of flow measurement results:

Q1 — ultrasonic flowmeter;

Q2 — flowmeter of variable pressure drop

Таблиця 1. Статистичні характеристики результатів вимірювання витрати

Table 1. Statistical characteristics of flow measurement results

Види статистичних характеристик	Ультразвуковий витратомір, х	Витратомір змінного перепаду тиску, у	Різниця обчислених характеристик, %
Середнє арифметичне значення витрати, \bar{x} , \bar{y} , м³/год	2104,15	2104,70	0,026
Розмах, L_x , L_y , м³/год	41	30	36,6
Дисперсія, D_x , D_y , (м³/год)²	172,55	69,02	150
Стандартне відхилення, S_x , S_y , м³/год	13,13	8,31	58
Витрата за найбільшої різниці миттєвих значень, м³/год	2101	2123	-1,03 (на 240 с)

опрацювання результатів досліджень з урахуванням теорії ймовірності та математичної статистики. Оцінку статистичних характеристик результатів вимірювання (табл. 1) виконували за такими формулами:

$$\bar{x} = (1/N) \sum_{i=1}^N (x_i), \quad (1)$$

$$\bar{y} = (1/N) \sum_{i=1}^N (y_i), \quad (2)$$

$$L_x = x_{i\max} - x_{i\min}, \quad (3)$$

$$L_y = y_{i\max} - y_{i\min}, \quad (4)$$

$$D_x = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (N-1), \quad (5)$$

$$D_y = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 / (N-1), \quad (6)$$

$$S_x = \sqrt{D_x}, \quad (7)$$

$$S_y = \sqrt{D_y}, \quad (8)$$

де $x_{i\max}$, $x_{i\min}$ — максимальне і мінімальне значення миттєвих витрат ультразвукового витратоміра; $y_{i\max}$, $y_{i\min}$ — максимальне і мінімальне значення миттєвих витрат витратоміра змінного перепаду тиску, N — кількість результатів вимірювання.

За результатами аналізу випливає, що різниця між середніми арифметичними значеннями вимірюваної витрати різними засобами не перевищує 0,026%, що є суттєво (на порядок) меншим від нормованих значень метрологічних характеристик (відносних похибок) цих засобів вимірювань. При цьому найбільше значення різниці миттєвих витрат протягом досліджуваного процесу не перевищує алгебраїчної суми похибок двох витратомірів і становить 1,03%. Разом з тим імовірнісні характеристики ультразвукового витратоміра є суттєво більшими від витратоміра змінного перепаду тиску. Наприклад, розмах є більшим на 27,5%, а дисперсія — вищою майже у три рази. Це свідчить стосовно різних динамічних властивостей засобів вимірювання, тобто інерційності ультразвукового витратоміра є набагато меншою, і він

є порівняно кращим засобом за обліку витрати динамічно нестабільних процесів.

Оскільки одним із шляхів підвищення достовірності вимірювання в метрологічній практиці є правильний вибір довірчих інтервалів, для їх аналізу побудовано графіки щільності розподілу ймовірності результатів вимірювання для кожного із засобів вимірювання (рис. 2).

Із них випливає, що вид графіків недостатньо корелює з їхнім загальноприйнятим видом для нормального закону розподілу і, на перший погляд, є більш близьким до рівномірного. Тому за результатами досліджень здійснено моделювання стосовно виду розподілу з урахуванням довірчої ймовірності й прийнятої кількості класів за опрацювання результатів (табл. 2). Кількість класів K вибирають,

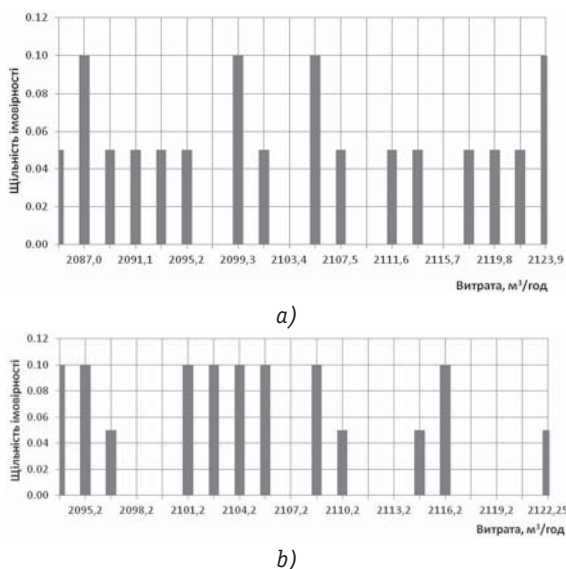


Рис. 2. Щільність розподілу ймовірностей результатів вимірювання ультразвуковим витратоміром (а) і витратоміром змінного перепаду тиску (б)

Fig. 2. The density probability distribution of measurement results by ultrasonic flowmeter (a) and flowmeter of variable pressure drop (b)

Таблиця 2. Моделювання виду закону розподілу результатів вимірювання різними типами витратомірів

Table 2. Modeling of the kind distribution law of measurement results by different types of flowmeters

Кількість класів K	Задана ймовірність, %	Ультразвуковий витратомір				Витратомір змінного перепаду тиску			
		Значення аргумента χ^2	Сума відхилень S	Результат перевірки гіпотези $S < \chi^2$	Вид закону розподілу	Значення аргумента χ^2	Сума відхилень S	Результат перевірки гіпотези $S < \chi^2$	Вид закону розподілу
20	50	18	8	приймається	лише рівномірний	18	16	приймається	лише рівномірний
20	66	21	8	приймається	рівномірний або нормальний	19	16	приймається	рівномірний або нормальний
		18	17			18	18		
20	95	30	8	приймається	рівномірний або нормальний	30	16	приймається	рівномірний або нормальний
		27	17			27	18		
10	50	8,3	3	приймається	лише рівномірний	8,3	10	не приймається	-
						6,3	7,8		
10	66	9,5	3	приймається	рівномірний або нормальний	9,5	9,4	приймається	рівномірний або нормальний
		7,9	7,8			7,9	7,8		
10	95	10	3	приймається	рівномірний або нормальний	16	10	приймається	рівномірний або нормальний
		14	7,8			14	7,8		

зважаючи на ймовірнісні підходи за опрацювання результатів вимірювань, що дає можливість розрахувати ширину ΔK класу за формулою:

$$\Delta K = L / K, \quad (9)$$

де L — розмах результатів вимірювання.

Із табл. 2 є очевидним, що методологія опрацювання результатів вимірювання може певним чином впливати на вид вибраного закону розподілу, а отже і на методологічні підходи за опрацювання результатів вимірювання, які в кінцевому результаті формують границі основної допустимої похибки результатів вимірювання. Так, за довірчої ймовірності 50% і 20 класів результати вимірювання обома засобами можна вважати з рівномірним законом розподілу, а за зростання ймовірності понад 65% і тих же 20 класів результати вимірювання можна оцінювати як за рівномірним, так і за нормальним законами. При цьому коефіцієнт розподілу Ст'юдента для проведеної кількості вимірювань може змінюватися від 1,03 за довірчої ймовірності 0,682 до 2,86 за ймовірності 0,99, що також впливає на метрологічну оцінку результатів вимірювання. А за кількості класів 10 результати моделювання свідчать, що за ймовірності 50% для результатів витратоміра змінного перепаду тиску не приймається жоден із заданих видів закону розподілу. Разом з тим за довірчих ймовірностей 66 і 95% можуть бути прийняті рівномірний або нормальний види закону розподілу. Стосовно

переваги за вибору одного із них необхідно оцінювати конкретне співвідношення між значеннями аргумента χ^2 і сумою відхилень S .

Оскільки результати вимірювання двома витратомірами обтяжені систематичними і випадковими похибками, що можна розглядати як випадкові величини, доцільним є проведення їх кореляційного аналізу. Такий підхід дає можливість оцінити ступінь зв'язку між отриманими результатами.

Оцінку коефіцієнта кореляції можна виконати шляхом розрахунку емпіричного коефіцієнта кореляції r за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (10)$$

Згідно з використаним для досліджень набором експериментальних даних обчислене значення цього коефіцієнта становить 0,57, яке характеризує середній ступінь зв'язку між величинами, оскільки міститься в межах від 0,3 до 0,7 [11]. Отримане числове значення не розкриває суті кореляційного зв'язку, що потребує обчислення автокореляційних функцій $R_x(\tau)$ і $R_y(\tau)$ кожного з вимірювальних процесів й їх взаємної кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$. Для цього використовувалися такі формули:

$$R_x(\tau) = [1 / (N - k)] \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}) \cdot (x_{i+k} - \bar{x}) / D_x, \quad (11)$$

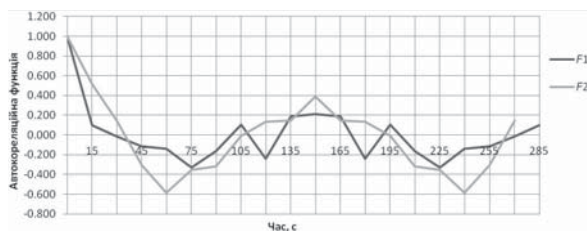


Рис. 3. Графічна ілюстрація автокореляційної функції: F1 — ультразвуковий витратомір; F2 — витратомір змінного перепаду тиску

Fig. 3. Graphic illustration of autocorrelation function: F1 — ultrasonic flowmeter; F2 — flowmeter of variable pressure drop

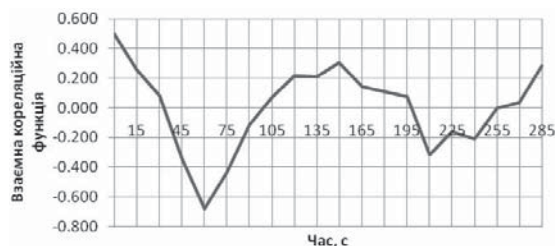


Рис. 4. Графічна ілюстрація взаємної кореляційної функції

Fig. 4. Graphic illustration of mutual correlation function

$$R_y(\tau) = [1 / (N - k)] \sum_{i=1}^{N-k} (y_i - \bar{y}) \cdot (y_{i+k} - \bar{y}) / D_y, \quad (12)$$

$$R_{xy}(\tau) = [1 / (N - k)] \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_{i+k} - \bar{y}) / S_x \cdot S_y. \quad (13)$$

У формулах (11) — (13) часовий параметр $\tau = k \cdot \Delta t$ розраховується через інтервал відліку миттєвих значень $\Delta t = 15$ с і порядковий номер зсуву k від 0 до $N-1$.

Графічна ілюстрація (рис. 3) отриманих нормованих кореляційних залежностей свідчить стосовно стаціонарності кожного із досліджуваних випадкових процесів, що дозволяє застосовувати ймовірнісні підходи за розрахунку похибки результатів вимірювання. Водночас на результати вимірювання витратоміра змінного перепаду тиску накладено періодичний тренд з періодом близько 150 с, відсутній в ультразвуковому витратомірі. Причиною цього тренду можуть бути особливості конструктивного виконання, наприклад, виготовлення імпульсних з'єднувальних ліній, чи резонансні явища або інші фактори, які на перший погляд є неочевидними і мо-

жуть бути виявлені в процесі додаткових досліджень і аналізу.

Нормована взаємна кореляційна функція (рис. 4) практично підтверджує середній ступінь зв'язку між досліджуваними величинами і вказує на наявність кореляції як додатньої (за $\tau = (120 \dots 195)$ с), так і від'ємної (за $\tau = (45 \dots 75)$ с і $(210 \dots 240)$ с) у певні моменти часу. Це свідчить, що на миттєві збільшення або зменшення витрати реагують обидва вимірювальні засоби.

Із отриманих результатів досліджень можна зробити висновок, що обидва типи витратомірів є практично рівнозначними за метрологічними характеристиками, і застосування одного із них як дублювального засобу відносно другого дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювань.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень встановлено практичне збігання результатів визначення середніх значень вимірюваних витрат газу витратомірами ультразвуковими і змінного перепаду тиску, яке кількісно є на порядок меншим від їх похибки. При цьому найбільша різниця миттєвих витрат за вимірювання не перевищує алгебраїчної суми похибок двох витратомірів. Експериментально виявлено, що ультразвукові витратоміри є більш чутливими за вимірювання непостійних витрат.


Обґрунтована необхідність урахування ймовірнісних характеристик результатів вимірювання за функціонування витратомірів природного газу, що відкриває нові практичні аспекти підвищення точності вимірювань за його обліку. При цьому види ймовірнісних моделей є неоднаковими для різних конструкцій і принципів дії витратомірів і в багатьох випадках можуть відрізнятися від загальноприйнятого нормального закону розподілу, що обґрунтовує потребу уточнення виду закону за результатами статистичного опрацювання результатів вимірювань.

Результати досліджень обґрунтовують доцільність установлення дублювальних вузлів обліку природного газу, навіть з рівнозначними метрологічними характеристиками щодо похибки вимірювань, завдяки чому досягається підвищення достовірності обліку природного газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Матіко Ф.Д. Визначення балансу об'єму природного газу в системах його транспортування та розподілу / Ф.Д. Матіко, Є.П. Пістун // Метрологія та прилади (Matiko F.D.

Determination balance volume of natural gas transportation systems and distribution / F.D. Matiko, E.P. Pistun // Metrology and instruments). — 2014. — № 1. — С/Р. 10—16.

2. Андріішин М.П. Баланс газу в газотранспортній системі / М.П. Андріішин // Нафтогазова галузь України (Andriyishyn M.P. The balance of gas in the transmission system / M.P. Andriyishyn // Oil and gas sector in Ukraine). — 2014. — № 1. — С. 21—24.
3. Облік природного газу: довідник / М.П. Андріішин, О.М. Карпаш, О.Є.Середюк [та ін.]; за ред. С.А. Чеховського. — Івано-Франківськ: ПП «Сімик» (Calculation of natural gas: directory / M.P. Andriyishyn, O.M. Karpash, O.E.Seredyuk [and others]; for the editors S.A.Chehovskyy. — Ivano-Frankivsk: PE «Simyk»), 2008. — 180 с/р.
4. Стеценко А.А. Обґрунтування збільшення міжповірочного інтервалу витратоміра-лічильника ультразвукового ГУВР-011 / А.А. Стеценко, С.Д.Недзельський// Метрологія та прилади (Stetsenko A.A. Foundation of justification increase inter-verification interval ultrasonic flow-meter HUVR-011 / A.A. Stetsenko, S.D.Nedzelsky // Metrology and instruments). — 2013. — № 1. — С/Р. 43—44.
5. Волосянко В.Д. Аналіз розбіжностей у результатах обчислень об'єму газу, проведених різними засобами вимірювань / В.Д. Волосянко, М.І. Гончарук, Н.Ф. Матяш // Нафтова і газова промисловість (Volosyanko V.D. Analysis of the differences in the results of calculations of gas volume carried by different means of measurement / V.D. Volosyanko, M.I.Goncharuk, N.F.Matyash // Oil and gas industry). — 2001. — № 6. — С/Р. 47—51.
6. Середюк О.Є. Дослідження похибок і невизначеності вимірювань для ділянок з паралельно встановленими засобами обліку природного газу / О.Є.Середюк // Метрологія та прилади (Seredyuk O.E. Research of errors of measurement uncertainty for parcels of established parallel means for gas / O.E.Seredyuk // Metrology and instruments). — 2011. — № 6. — С/Р. 42—47.
7. Тевяшев А.Д. Метод оцінювання неопределенности результатов измерения рас хода природного газа методом переменного перепада давления / А.Д. Тевяшев, Ю.В. Пономарев, В.Б. Коток, О.А. Сендеров // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2006): V між-нар. наук.-техн. конф., 10—12 жовтня 2006 року. — Харків: наук. праці конф. — У 2 т. — Т. 2. — Харків: ННЦ «Інститут метрології» (Tevyashev A.D. The method of estimating the uncertainty of measurement of natural gas flow by differential pressure / A.D.Tevyashev, U.V.Ponomarev, V.B.Kotok, O.A.Senderov // Metrology and Measuring Equipment (Metrology–2006): V International Scientific Conference, 10—12 October 2006. — Kharkiv: Scientific works of Conf. — At 2 m. — Vol.2. — Kharkiv: NSC «Institute of Metrology»), 2006. — С/Р. 238—241.
8. Клочко Н.Б. Вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу / Н.Б.Клочко, С.А.Чеховський // Метрологія та прилади (Klochko N.B. Improving methods for evaluating the accuracy of turbine gas meters / N.B.Klochko, S.A.Chehovskyy // Metrology and instruments). — 2014. — №1_{II}(45). — С/Р. 101—105.
9. Розгонюк В.В. ГВС «Гребеники» — газовимірювальна станція 2005 року / В.В. Розгонюк, Я.М. Власюк // Нафтова і газова промисловість (Rozhonyuk V.V. GMS «Hrebenyky» — measuring stations 2005 / V.V.Rozhonyuk, Y.M.Vlasyuk // Oil and gas industry). — 2003. — № 3. — С/Р. 50—51.
10. Володарський Є.Т. Статистична обробка даних: навч. посіб. / Є.Т.Володарський, Л.О.Кошева. — К.: НАУ (Volodarsky E.T. Statistical analysis of data: tutorial / E.T.Volodarsky, L.O.Kosheva. — K.: NAU), 2008. — 308 с/р. 

Отримано / received: 09.06.2015.

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

УДК 537.622+621.381

ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАНОКЛАСТЕРНОЇ ПІДСИСТЕМИ РЕЧОВИНИ

В. Ковальчук, доктор фізико-математичних наук, професор, директор коледжу комп'ютерних технологій,

М. Сербов, кандидат географічних наук, перший проректор,

Одеський державний екологічний університет,

О. Панченко, аспірант,

Одеський національний політехнічний університет

Розглянуто застосування методів керування й контролю властивостей твердотільної речовини за допомогою нанокластерної підсистеми. Досліджено механізми формування таких підсистем твердотільної речовини, визначених як кластеризовані матеріали.

The application of methods for direction and control of solid substance properties with nano-clusters subsystem help was considered. The mechanisms for formation the same subsystems of solid substance, determined as clusters materials was investigated.

Ключові слова: наноструктура, кластер, прилад.

Keywords: nanostructure, cluster, device.

Методам керування, діагностики й контролю властивостей речовини присвячено цілу низку оглядів і монографій [1–3], серед яких виділяються температурні й радіаційні. Перші себе вичерпують, другі — неефективні у повсякденній практиці. Процеси ж проведення кластеризації речовин викликають великий інтерес учених, починаючи із другої половини ХХ сторіччя [4]. Однак у всіх цих підходах не торкаються питань, що стосуються використання методів керування й контролю властивостей твердотільної речовини (ТТР) за допомогою нанокластерної підсистеми (НКП).

У цьому контексті, на основі єдиного підходу, який класифікує різноманітне проявлення кластерних фаз (КФ), проведено дослідження механізмів формування НКП ТТР, визначуваного нами як кластеризовані матеріали [5].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

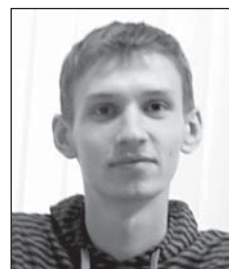
У вимірювальній техніці мають широке застосування ГС, до складу яких входять тонкі плівки, використовувані як ГП. Матеріал і товщину плівок вибирають з урахуванням їхнього складу, геометричних розмірів, фізико-хімічних властивостей, інших особливостей. Як правило, перевагу надають таким плівкам, які мають розмірну з підкладкою зонну структуру, хорошу радіаційну й температурну стійкість. У цьому контексті перспективними є плівки, що мають НКП поверхні ТТ. Технологія виготовлення таких плівок, як складових ГП для приладів електронної техніки, є комплексом складних технологічних процесів, один з етапів якого зводиться до вимірювання товщини, що, у свою чергу, представляє серйозну сучасну проблему.



В. Ковальчук



М. Сербов



О. Панченко

Нами поставлено й вирішено завдання із виготовлення тонких плівок, визначуваних нами як НКП ТТ і використовуваних як складову ГП типу $\text{psil}(\text{Si-Нкп})\text{-рсu}_2\text{S}$. При цьому досліджувалися процеси формування кластеризованих плівок кремнію, синтезованих із парової фази на підкладинку монокристалічної кремнієвої пластини. Як підкладинку використовували монокристали площею $0,28 \text{ см}^2$, товщиною в декілька мкм. Підкладинку наносили на поверхню срібних електродів кристалічного кварцу, що становив основу п'єзокварцового резонатора. Кристалічна структура НКП відповідала «сильно розмитій текстурі» (визначуваної нами як кластерний растр на Si). Досліджені зразки НКП синтезували методом відкритого випаровування порошку Si у вакуумі. Їхню товщину контролювали за допомогою мікроінтерферометра МІІ-4. Електронно-мікроскопічні дослідження здійснювали на мікроскопі ПЕМ-100. Процес формування НКП проводили за допомогою п'єзокварцового датчика з постійною 1670 кГц/мм . Датчик підключали до стандартного приладу КИТП-5 (кварцового вимірника товщини плівки), попередньо проградуйованого на монокристали кремнію. Градувальний графік будували у такий спосіб, щоби використовувати його для малих товщин КП кремнію, що наносили на підкладинку. Оперативний контроль товщини НКП проводили методом кварцового резонатора з елементами методики, описаної у роботах [5–8].

Для визначення геометричних параметрів кластерного складу речовини ми використовували кварцовий вимірник товщини плівок КИТП-5. Принцип його роботи засновано на вимірюванні відходу резонансної частоти кварцового датчика залежно від шару матеріалу, відкладеного на ньому. Система дозволяє з точністю до $0,1 \text{ нм}$ вимірювати товщину нанесених у вакуумі покриттів. Призначення КИТП: а) контроль фізичної товщини плівок у процесах напильовання тонкоплівкових структур. Кварцовий контроль дозволяє мати точну інформацію стосовно товщини плівки в процесі нанесення покриттів у вакуумі. б) Для вимірювання використовували ефект зміни резонансної частоти кварцового кристала за зміни його маси. Маса кристала збільшується за рахунок напильовання матеріалу на його поверхню.

КИТП-5 як прилад, що програмується, може самостійно управляти процесом напильовання (рис. 1). Має клавіатуру й багатофункціональний дисплей для відображення режимів роботи приладу й задання параметрів напильовання. Останнє виконують за заздалегідь уведеною формулою, можна задавати



Рис. 1. Кварцовий вимірник товщини плівки КИТП-5
Fig. 1. Device for determination of the film's thickness

складні плівки, що містять велику кількість шарів. Кожний шар характеризується товщиною й типом напильованого покриття. Кожний тип покриття характеризується щільністю напильованого матеріалу й коефіцієнтом розпилення за камерою. Зважаючи на ці параметри й відносні зміни частоти кварцового датчика, обчислюють напильовання товщини плівки.

Генератор кварцового кристала BF-100 спроектовано для збільшення терміну служби кварцових кристалів промислового стандарту 5 і 6 МГц. Генератор забезпечує роботу кварцового кристала, підсилює й формує сигнал для передавання його до КИТП-5. Генератор BF-100 працює з кабелем до 1 метра від кристала. Кабель, що з'єднує генератор і контролер, може бути до 4-х метрів, а за спеціальною вимогою й більшим. Генератор BF-100 має модифікацію корпусу з вушками для кріплення на плоску поверхню.

Водоохолоджуваний тримач кристала BFAG-140 застосовують у складі систем кварцового контролю товщини покриттів. Датчик спроектовано так, щоб зробити заміну кристалів максимально простою операцією. У BFAG-140 установлюють стандартні кварцові кристали $0,55$ ». Наявність у тримачі системи водного охолодження дозволяє застосовувати кварцовий контроль товщини за температури до 300°C . Основні характеристики: а) діаметр водоохолоджуваних трубок — 5 мм ; б) довжина трубок — до 500 мм ; в) матеріал корпусу — нержавіюча сталь; д) термостійкий коаксіальний кабель.

Тримач кристала встановлюють у вакуумну камеру через гермовід, що має два вводи для трубок діаметром 5 мм і один електричний увід. Водоохолоджувані трубки можна згинати, що дозволяє

орієнтувати положення кристала в камері. Із зовнішньої сторони камери до електричного виходу підключають генератор для формування й посилення сигналів, що надходять від кварцового кристала. Сигнал від генератора подають на вимірювальний прилад, який і розраховує товщину напильної плівки за зміною частоти коливань кварцового кристала. Тримач можна додатково оснащувати пневматичною заслінкою для запобігання запиленню кристала за різних режимів напильювання.

Гермовід призначено для введення трубок водоохолодження кварцового тримача усередину камери. Ущільнення трубок проводять гумовими кільцями, які підтискають болтами. Таке з'єднання є рознімним, що дозволяє регулювати місце розташування кварцового тримача усередині камери. Сам гермовід також ущільнюють гумовим кільцем, яке закладається в канавку основи.

Кварцові кристали дозволяють виконувати вимірювання для великої кількості застосувань. Кристали можна застосовувати в широкому діапазоні: від напильювання плівок у вакуумі до покриття металів у рідинах, а також у дослідницьких проєктах, де як вимірювальний елемент застосовують кристали. Усі вироби 100 % тестовано виготовлювачем.

До комплекту із кварцовим вимірником товщини плівки входить тестова програма для демонстрації працездатності приладу.

Для включення КИТП в автоматизовану систему керування використовують протокол. Для дуже складних покриттів або їх великої різноманітності, за якої штатних налаштувань приладу недостатньо, додатково використовують сервісну програму для персонального комп'ютера.

Програма дозволяє створювати необмежене число матеріалів, шарів і плівок. Забезпечує зберігання всіх конфігураційних даних й їх редагування. Графіки дозволяють наочно стежити за ходом нанесення покриттів.

У камері, де підтримується вакуум $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Торр, розміщені пластини кварцового вимірювача на силіконовій основі, човничок із фольги тантала, в якій міститься випаровуваний кремній. Через контакти на тантал подають напругу, яка нагріває кремній до температури випаровування. Струм варіюють у межах 10–15 А. Задаючи силу струму, можна отримувати різні товщини КП й їхню різну морфологію.

Іншою можливістю нагрівання танталового човника стало подавання на електроди через контакти імпульсів напруги, тривалість яких задавалася таймером. Частота проходження імпульсів змінювалася

від 0,1 до 0,01 Гц і вибиралася такою, щоб забезпечити відновлення вакуумних умов у вакуумній камері в проміжку між розрядами. Енергія, яка виділялася під час розряду, змінювалася від імпульсу до імпульсу. Для контролю параметрів розряду слугує схема вимірювання енергії, виділюваної на електродах за один імпульс.

Мікрофотографія плівки 7, оброблена за допомогою тунельної мікроскопії, кластерного растру на кремнії [5], дозволяє оцінити геометричні розміри НК кремнію ($15 \div 20$ А), які відтінені вуглецем (рис. 2).

За отримання особливо тонких плівок товщиною $\sim (25\text{—}50)$ А передавання енергії, виділюваної під час подавання струму на тантал, повинно бути достатнім для того, щоб щільність потоку атомів кремнію, що випаровуються, була постійною. Кварцовий вимірник товщини 2 і тримач підкладки 4 розташовані симетрично щодо осі вакуумної камери з метою забезпечення однакових умов осадження кремнію. Основою кварцового вимірника слугує пластинка кварцового резонатора, що визначає частоту стабільного автогенератора. Оскільки генерована частота залежить від маси кварцового резонатора, за відходом генерованої частоти, з урахуванням попереднього калібрування, можна визначити товщину плівки, що осіла на кварцовій пластині, а отже, і на зразку, який перебуває за таких же умов.

Маса напильного на одиницю поверхні кварца шару Δm_c і зміна частоти кварцового резонатора Δf пов'язані простим співвідношенням:

$$\Delta m = (m_g / f_g) \Delta f, \quad (1)$$

де m_g — маса кварцової пластини одиничної площі; f_g — резонансна частота.

Чутливість методу кварцового резонатора дуже висока. Так, наприклад, для кристала з резонансною

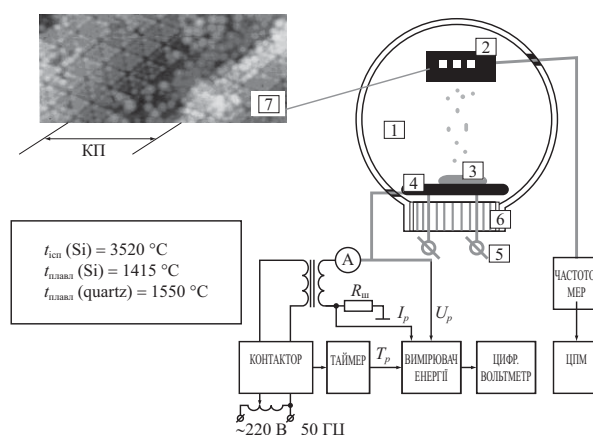


Рис. 2. Схема експериментальної установки для отримання НКП

Fig 2. Schema of the experimental device for the making of the nanocluster's subsystem

частотою $f = 5$ МГц, масою $m_g = 100$ мг чутливість $m_g/f_g = 0,02$ мкг/Гц, тобто, реєструючи відхід частоти кварцового резонатора на 1 Гц, у принципі можна контролювати збільшення маси в соті частки мікрограма.

Кварцовий резонатор чутливий до зміни температури. Для урахування відходу резонансної частоти від температури в наших вимірюваннях кварцові резонатори, що використовували, піддано спеціальному відбору за результатами вимірювань температурної залежності резонансної частоти. Використано 40 резонаторів марки РК170 і РК171 із частотою власного резонансу (5...10) МГц. Найбільш типові залежності $f(T)$ наведено на рис. 3.

Як видно, температурна крива 1 характеризується слабкою залежністю частоти від температури (~5 % резонаторів). Приблизно 75 % резонаторів описують графічною залежністю 2. Більш складною залежністю (крива 3) відзначено ~20 % резонаторів.

Точність методу вимірювання маси напильного шару із застосуванням кварцового резонатора багато в чому визначається стабільністю частоти генератора, до схеми якого включено кварцовий резонатор. Принципову електричну схему стабільного кварцового генератора подано на рис. 4.

Генератор, призначений для роботи в діапазоні (1...100) МГц, зібрано на чутливому високочастотному підсилювачі (Т1–Т4) із кварцовим резонатором у ланцюзі позитивного зворотного зв'язку. Транзистор Т5 є буферним емітерним повторювачем, що зменшує вплив навантаження на параметри генерованого сигналу. Підсилювач генератора виконано за схемою: загальний колектор — загальна база — загальний колектор (Т2–Т4). Транзистор Т1 включено до ланцюга негативного зворотного зв'язку, що нейтралізує ємність кварцотримача. Крім того, негативний зворотний зв'язок стабілізує амплітуду вихідних коливань. Коригувальна ємність C_2 збільшує стійкість генерації на високих частотах. У розглянутій схемі генератора досягнуто широку смугу пропускання підсилювача. Тому підсилювач має мізерно малий додатковий набіг фаз аж до частот ~ 100 МГц, що й зумовлює високу стабільність частоти генерацій.

Сума вхідного й вихідного опорів підсилювача менша від еквівалентного опору втрат кварцового резонатора. Відносна нестабільність частоти генератора становить величину $\sim 10^{-7}$. Генератор змонтовано на невеликій платі й розміщено у вакуумній камері. Живлення й знімання результувального сиг-

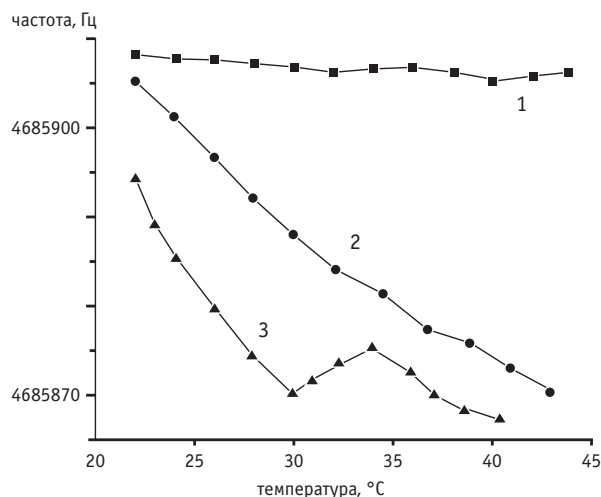


Рис. 3. Температурні залежності частоти кварцового резонатора від температури

Fig 3. Temperature's dependence from frequency of the quartz resonator

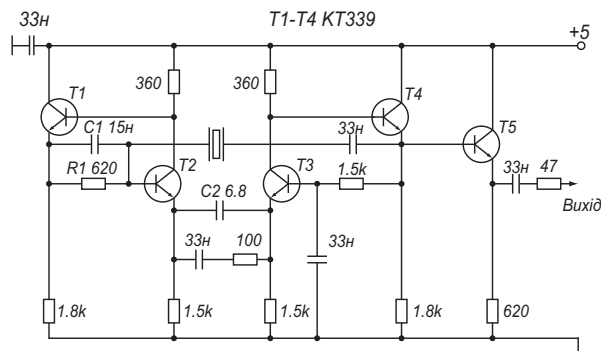


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема кварцового генератора

Fig 4. Principled current diagram of the quartz generator

налу здійснюються через вакуумно-щільний роз'єм. Таке розміщення дозволяє максимально вкоротити провідники до кварцових резонаторів і зменшити наведення на схему.

У момент випаровування кремнію виділяється енергія, частина якої у виді випромінювання, яке може розігрівати пластинку кварцового резонатора. Спеціально проведені нами вимірювання показали, що температура підкладки дещо зростає протягом сеансу. Повернення до попередньої температури відбувається через (2–3) хв. Щоби виключити шкідливий вплив температурного відходу частоти на результати вимірювань, ми використовували резонатори зі слабкою температурною залежністю (крива 1, рис. 3).

На рис. 5 представлено криву, що ілюструє зміну в часі частоти резонансу кварцового кристала після напильювання НКП. Дрейф частоти після напильюван-

ня зумовлено адсорбцією залишкових газів свіжо-напилим шаром кремнію. Застосовуючи кристали зі слабкою температурною залежністю, точність у визначенні відходу частоти Δf нам вдавалося довести до 1 Гц.

Похибка методу зумовлена точністю, з якою визначався відхід резонансної частоти Δf , і точністю у визначенні маси кристала m_g . У нашому випадку похибка вимірювання товщини напиленого шару становила 5%. Метод кварцового резонатора дозволив нам налагодити методику виготовлення НКП ТТ із контрольованою й заздалегідь заданою товщиною. У таблиці наведено результати вимірювань товщини КП методом кварцового резонатора. Описаний вище метод дозволив нам вимірювати товщину шару речовини (кремнію) у процесі напилювання в чистому виді, тобто без урахування маси адсорбованого газу, що дуже важливо для визначення товщини мішені в експериментах з іонними пучками.

Описана вище методика формування й керування товщиною НКП, що складається із НК як основної складової ГС, відкриває нові можливості для створення ефективних приладів нанометрового діапазону на основі НКП ТТР. Практичне вирішення зафіксованих нами проблем повинно визначити успіх технології отримання НКП. Насамперед, це підвищення робочої частоти резонатора, що призводить до подальшого підвищення його чутливості. За реалізації описаного нами методу за конкретних умов необхідно враховувати ряд особливостей: а) пружні

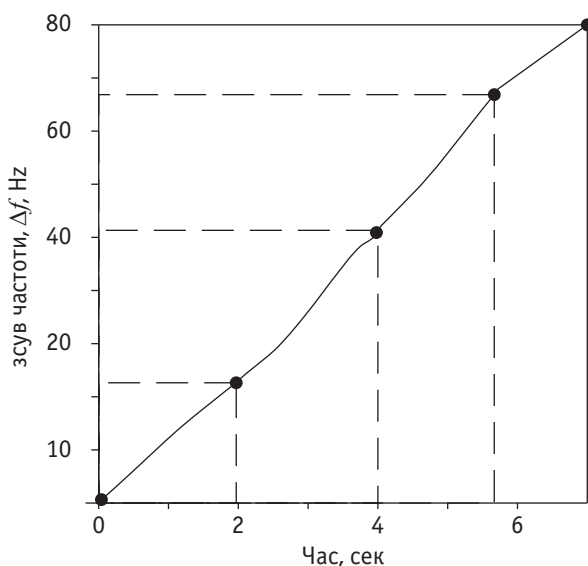


Рис. 5. Кінетичні криві синтезу НКП на підкладку кремнію, отримані за допомогою п'єзореzonансного датчика

Fig 5. Kinetics curves of the nanocluster's subsystem synthesis on the silicon substrate

Зіставлення результатів вимірювань товщини НКП кремнію

The results for the thickness of nanocluster's subsystem on the silicon substrate

Номер зразка	Δf кварца, Гц	Товщина НКП за даними кварца, мкм
1	80	1,034
2	105	1,368
3	120	1,519
4	136	1,748
5	156	2,006
6	200	2,584
7	320	4,134

властивості напиленої речовини відрізняються від пружних характеристик підкладки; б) щільність у тонкому шарі напиленої речовини менша від щільності цієї речовини в масивному зразку; в) зсув частоти резонансу зумовлено не лише масою нанесеного шару, але також і напругами, що виникають на границі підкладка–напилений матеріал.

Отже, цілеспрямоване удосконалювання технології запропонованого нами методу формування ГП, імовірно, дозволить суттєво поліпшити якість фотоелементів.

Такий комплексний підхід дозволив застосувати метод неруйнівного контролю поверхні ТТ (з використанням КИТП), у комбінації з виявленим нами спектральним розподілом інверсованого фотопентильного ефекту.

Причому для цього методу неруйнівного контролю враховано стандарт загальних технічних вимог до застосовуваного нами засобу (типу КИТП), призначеного для реалізації вимірювань товщини покриття поверхні твердотільної матриці кластерним растром колоїдної дисперсності; встановлені сфера його застосування, а також засоби вимірювання основних параметрів.

ВИСНОВКИ

Отже, у статті розглянуто:

1. Можливості, переваги й недоліки відомих методів діагностики НКП твердотільної матриці.
2. Обґрунтовано необхідність розроблення теорії й принципів побудови ГС на основі НКП, а також проведення експериментальних досліджень із метою підтвердження розробленої теорії й установа залежностей похибок параметрів НК і НКП на їхній основі.

3. Показано необхідність розроблення нових типів вимірювальних систем із застосуванням датчиків (наприклад, на основі кварца), які мають підвищену надійність роботи, високу чутливість і точність вимірювання параметрів.

4. Показано, що для розроблення сучасних ме-

тодів керування характеристиками й контролю властивостей ТТР необхідно: а) розробити єдиний підхід, який дозволяє системно вивчати твердотільні матриці з НКП; б) створити основу структурно-морфологічного аналізу НК й їх синтезу в єдину НКП ТТР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС.-М.:Техносфера (Krasnikov G.Ya., Zaytsev N.A. System of the silicon-dioxid silicon submicron up beigest integral scheme. — Moscow: Publ. «Technosphere»), — 2008. — 367 с/р.
2. Находкін М.Г., Сізов Ф.Ф. Елементи функціональної електроніки. — К.:ВД «Професіонал» (Nachodkin M.G., Sisov F.F. Elements of the functional electronics. — Kiev.: Publ «Profesional»), — 2002. — 201 с/р.
3. Халдеев Г.В., Компьютерное моделирование электрохимических процессов на межфазной границе / Г.В. Халдеев, С.Н. Петров // Успехи Химии (Khaldeev G.V. Computer simulation of the electrochemical processes on the inter phase boarder / Khaldeev G.V., Petrov S.N.// Success of Chemistry). — 1998. — № 2. — С/Р.107—124.
4. Physics and Chemistry of Small Clusters / Eds. P.Jena, B.K.Rao, S.N.Khanna.-N.Y.: Plenum Press., — 1987. — 355 p.
5. Ковальчук В.В. Кластерная модификация полупроводниковых гетероструктур. — Наукове видання. К.: «Хай-Тек Пресс» (Kovalchuk V.V. Cluster modification of the semiconductors heterostructure. — К.: «HiTech press»), — 2007. — 304 с/р.
6. Архаров В.И. О кластерной природе конденсированного состояния вещества // Физика твердого тела. Республиканский межведомственный научно-технический сборник / Под ред. В.И. Архарова. Харьков: Высшая школа (Arkharov V.I. About cluster nature of the condensed state of the matter // Solid state physics. Russian interdepartment science and technical bulletin / Ed. В.И. Arkharov V.I. Kharkov: Publ. Higher School), — 1989. — С/Р. 3—8.
7. Ковальчук В.В. Метрологія формування наносистеми з використанням фрактального підходу / В.В. Ковальчук, А.М. Сиротенко // Метрологія та прилади (Kovalchuk V.V. Metrology of forming of the nanosystem using of fractal approach Kovalchuk V.V., Sirotenko A.N. // Metrology and instruments). — 2012. — № 2 (34). С/Р. 61—65.
8. Kovalchuk V.V. Nanoelectronic's material for optic system / V.V. Kovalchuk // Photoelectronics. — 2012. — № 21. — Р. 65—68.
9. Ковальчук В.В. Измерение толщины кластерного слоя методом кварцевого резонатора / Коломиец Л.В., Ковальчук В.В., Грабовский О.В., Жеребцова Л.Н. // Сборник научных трудов Кировоградского национального технического университета (Kovalchuk V.V./ Determination of the thickness of the cluster layer using method of the resonator's quartz / Kolomietz L.V., Kovalchuk V.V., Hrabovskiy O.V., Zherebtsova L.N. // Bulletin of scientific articles of the Kirovograd national technical university). — 2010. — № 1. — С/Р. 11—17.
10. Ковальчук В.В. Тополого-энергетические характеристики нанокластерных подсистем / В.В. Ковальчук, О.Н. Маслий, В.А. Рац, В.А. Громов // Вестник ИАН Украины (V.V. Kovalchuk Topology and energy descriptions of nanoclusters subsystem / V.V. Kovalchuk, O.N. Maslij, V.A.Rats, V.A.Gromov // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine). — 2012. — № 2. — С/Р. 78—82.
11. Губанов В.А., Жуков В.П., Литинский А.О. Полуэмпирические методы молекулярных орбиталей в квантовой химии. — М.: Наука (Gubanov V.A., Zhukov V.P., Litinskiy A.O. Semi empirical methods of the molecular orbital's at the quantum chemistry Moscow.: Publ «Science»), — 1976. — С/Р. 21—118.
12. Асланов Л.А. Многообразие квазикристаллов / Л.А. Асланов // Журн.структ.химии (Aslanov L.A. Many forms of the quasicrystal / J. Strct. Chemistry). — 1991. — 32, № 1. — С/Р. 168—170. ■

Отримано / received: 05.03.2015.

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

УДК: 621.745.5: 669.71

ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ АЗОТУ В АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ПЛАВЛЕННЯ У ПОТОЦІ ГЕЛІЮ

М. Калинюк, кандидат технічних наук, завідувач лабораторії,
Л. Капітанчук, науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ,
О. Калинюк, кандидат технічних наук, головний технолог,
ТОВ «Стратегія БМ», м. Київ

Представлено літературний огляд методів визначення вмісту азоту в алюмінієвих сплавах. Розроблено методику визначення вмісту азоту у цих сплавах з використанням відновлювального плавлення аналізованого зразка у потоці газу-носія — гелію.

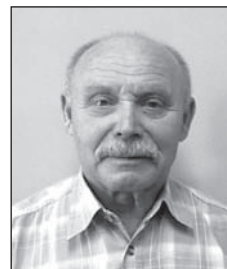
Literature review on methods of determination of nitrogen content in aluminium alloys. Method of determination nitrogen content in these alloys with utilization of the restoration melting of analytical sample in carrying gas flow — helium.

Ключові слова: алюмінієві сплави, азот, аналіз, гелій.
Keywords: aluminium alloys, nitrogen, analysis, helium.

Азот практично не розчиняється ні в рідкому, ні в твердому алюмінії. У системі утворюється сполука AlN , розчинність якої в алюмінії за температур (1200...1500) °C складає менше, ніж 0,004 % мас. [1–3]. Розчинність азоту в алюмінії за температури плавлення дорівнює 0,00022 % мас. [4, 5]. У [4] наведено діаграму системи $Al-N$.

У виробництві алюмінієвих сплавів використовують азот як рафінувальний нейтральний газ під час обробки розплавів [6, 7], компонент інертних атмосфер за дугового зварювання та відпалювання [8]. Рідкий алюміній барботує азотом для видалення шкідливої домішки — водню [9]. Відомо використання азоту як легувального елемента у сталях та сплавах [10]. Азот вводять до розплавлених алюмінієвих сплавів у виді гексахлораміакату алюмінію [11, 12], закису азоту або його суміші з нейтральним газом під шаром флюсу [13], азотної плазми [14] розпиленням металу в атмосфері азоту під високим тиском [5, 15]. Згідно з [7] вміст азоту в початковому металі $Al4$ — (0,003...0,004) %, а в обробленому — (0,01...0,02) % мас. Після оброблення азотною плазмою сплав $Al14B$ містить ~ (0,2...0,3) % мас.азоту, але автори [14] не повідомляють стосовно початкової концентрації. В алюмінії високої чистоти визначено 0,0001 % мас.азоту [2]. У результаті того чи іншого оброблення в розплаві утворюються нітриди алюмінію та легувальних елементів, тобто на розплав впливають ендогенні частинки нітрідів [5].

Зі збільшенням вмісту азоту параметр ґратки алюмінію також збільшується, підвищуються електроопір та механічні властивості (межа міцності, модуль пружності тощо), зміцнюються межі зерен, метал стає більш крихким [5, 7, 8, 11–14].



М. Калинюк



Л. Капітанчук



О. Калинюк

У монографіях [16—18] наведено велику бібліографію з методів визначення вмісту азоту в металах, у тому числі алюмінію. Найбільш поширений — метод К'ельдаля [15, 19—25], який існує у різних варіантах. За публікаціями [15, 19, 20, 24, 25] наважку алюмінію розчиняють у кислоті з подальшим додаванням луги та відгонкою й поглинанням аміаку. Одночасне розчинення у лузі та відгонка аміаку, що утворюється, наведені у [19, 22]. У [21] запропоновано фотоколориметричний метод визначення вмісту азоту в алюмінієвих сплавах із вмістом азоту (0,001...0,01)% мас. Цей метод ґрунтується на переводі нітрідного азоту в амонійні солі, відгонці аміаку з лужного розчину та визначенні вмісту азоту в конденсаті за масовою концентрацією його в аміаку з використанням реактиву Несслера. У [26] запропоновано спосіб визначення вмісту азоту в алюмінієвих сплавах з використанням окислення зразка у розплаві кисеньвмістних солей в атмосфері розрідженого вуглекислого газу. Алюміній, що входить до складу нітріду, окислюється, а азот виділяється у молекулярному виді.

Хімічний метод (метод К'ельдаля) визначення вмісту азоту в алюмінії та його сплавах має суттєві недоліки [9, 19—26]:

1. Надзвичайно низьку продуктивність (тривалість аналізу до 3 годин та більше).
2. Високу трудомісткість та складність аналізу.
3. Необхідність високої кваліфікації хіміка - аналітика.
4. Високу межу визначення (не нижче (0,001...0,005)% мас.).
5. Використання наважки великої маси.
6. Велику тривалість та складність підготування металу до аналізів.
7. Серйозну техніку безпеки (кислоти, луги, відкрите нагрівання).

Автори робіт [16—18] наводять інформацію щодо намагання визначити вміст азоту в алюмінії методом відновлювального плавлення у вакуумі. Вони вказують на великі труднощі під час проведення такого аналізу: утворення субліматів алюмінію, сорбцію азоту на субліматах, вспінювання аналізованого металу тощо. Все це веде до заниження результатів аналізів.

Нами не виявлено друкованих матеріалів із визначення вмісту азоту в алюмінієвих сплавах методом відновлювального плавлення у потоці газу-носія. Цей метод найбільше використовують для визначення вмісту газових домішок у металах [16, 17]. Аналізований метал плавлять у графітовому тиглі. Через останній проходить електричний струм

до 1200 А. Тигель можна нагрівати до ~3000 °С. Тривалість аналізу не перевищує 1 хв. Під час аналізу метал плавиться та взаємодіє з матеріалом тигля (графітом). Оксиди та нітріди відновлюються вуглецем. Із розплавленого металу виділяються кисень у виді CO, азот і водень у молекулярному виді. Струменем газу-носія газова суміш із печі транспортується до аналізатора. Як газ — носій використовують інертні гази (аргон, гелій).

ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ

У роботі використано:

1. Аналізатори TN-114 та TC-436 фірми «LECO».
- У [27] наведено технічні характеристики та принципи роботи цих приладів.
2. Нікель електролітичний ГОСТ 19241-80.
3. Нікелеві капсули фірми «LECO» № 502-183.
4. Нікелеві капсули фірми «BALZERS» № Ch69-260/5.
5. Нікелеву фольгу.
6. Графітові тиглі фірми «LECO»:
а) зовнішні тиглі № 775-433.
б) внутрішні тиглі № 775-892.

ПРОБОПІДГОТУВАННЯ

Дослідні плавлення виконували у шахтній печі опору СШОЛ. Метал плавляли у чавунному тиглі місткістю 3 кг. Температуру рідкого алюмінієвого сплаву АК7 (Al9) доводили до (720...750) °С та проводили рафінування гексахлоретаном (ГОСТ 9991-63) у кількості 0,3 % від маси металу. Після такої обробки розплав витримували 10 хвилин, потім до нього вводили легувальні добавки у виді спресованих та спечених брикетів, до складу яких входили порошки Al, Mg, Cu, Zn, Mn.

Сплави виплавляли у такий спосіб, щоби до їх хімічних складів входила мінімальна кількість нітрідотворювальних елементів (наприклад, титану). Один із розплавів обробляли азотною плазмою протягом до 140 с. До інших вводили нітріди Ti, Al, Si до 0,1 % від маси металу, що виплавляли. За температури ~750 °С нітріди вводили до рідкого металу зануренням модифікаторів, які виготовляли у такий спосіб:

1. Змішували порошки Al, Cu, Mg, Zn та нітріду з ацетоном.
2. Сушили за температури ~150 °С протягом 60 хв.
3. Змішували протягом 24 год з використанням розмольних тіл, щоби отримати ультрадисперсні частинки.
4. Пресували брикети.
5. Спікали у вакуумі (10^{-3} мм. рт. ст.) за температури (750...780) °С протягом 5 год.

Таблиця 1. Хімічний склад алюмінієвого сплаву АК7(Ал9), % мас.

Table 1. Chemical content of aluminium alloy AK7(Al9), % mas.

Сплав та його оброблення	Si	Cu	Mn	Ni	Ti	Fe	Zn	Mg
ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-89)	6,0-8,0	0,20	0,50	—	<0,15	0,15-0,50	0,30	0,20-0,45
Початковий сплав	7,5	0,79	0,34	0,06	<0,05	0,54	0,34	0,38
Оброблення розплаву азотною плазмою	7,9	0,80	0,22	0,20	<0,05	0,80	0,25	0,50
Уведення до розплаву нітріду кремнію	7,8	0,82	0,35	0,06	<0,05	0,62	0,41	0,45
Уведення до розплаву нітріду алюмінію	7,4	0,93	0,26	0,06	<0,05	0,62	0,42	0,47
Уведення до розплаву нітріду титану	7,5	0,78	0,36	0,06	<0,05	0,60	0,37	0,49

Рідкий метал витримували $\sim(25-30)$ хв за температури $\sim 750^\circ\text{C}$.

Після цього метал з тигля виливали у мідні товстостінні рознімні виливниці. Температура лиття — $(720...750)^\circ\text{C}$. Довжина відливка ~ 340 мм, діаметр ~ 12 мм. У табл. 1 наведено хімічні складі сплавів АК7 (Ал9) після оброблення азотною плазмою та нітрідами алюмінію, кремнію й титану.

Хімічні складі сплавів практично не змінилися після оброблення плазмою чи нітрідами порівняно з початковим. Із відливок на токарному верстаті вичували стержні діаметром 3 або 8 мм. Із них робили темплети товщиною $(2...3)$ мм. Зразки діаметром 3 і товщиною $(2...3)$ мм загортали у нікелеву фольгу або поміщали у нікелеві капсули. Такі зразки аналізували на приладі TN-114. Із темплетів діамет-

ром 8 і товщиною $(2...3)$ мм гострозубцями робили зразки вагою $(0,1...0,4)$ г, які аналізували на приладі ТС - 436. Перед аналізом зразки промивали етиловим спиртом та сушили струменем теплого повітря.

На рис. 1 (а, б) наведено схеми завантаження зразків до печі для аналізаторів TN-114, ТС-436 відповідно.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ

Низький рівень холостого експерименту забезпечено використанням нікелю (фольги, капсулів, шматочків), відбором та попереднім підготуванням графітових тиглів. Нікель практично не розчиняє азоту. За температури 1600°C рідкий нікель розчиняє $0,001\%$ мас.азоту [28]. Для аналізатора TN-114 поправка холостого експерименту була на рівні $0,0003\%$ мас.азоту (табл 2).

На приладі ТС-436 було застосовано режим «Попереднього підготування аналітичного зразка»:

1. Дегазацію порожнього тигля: $\sim 2600^\circ\text{C}$.
2. Завантаження аналітичного зразка $(0,1...0,4)$ г та нікелевих шматочків $(2,0...2,5)$ г до графітового тигля.
3. Нагрівання тигля разом зі зразком та нікелем: $t \sim 350^\circ\text{C}$, $\tau \sim 20$ с.
4. Аналіз: $t \sim 2400^\circ\text{C}$, $\tau \sim 20$ с.

За такого варіанту аналізу (рис. 1 б) поправка холостого експерименту дорівнює $0,0001\%$ мас., що мінімум на порядок нижче, ніж за хімічного методу аналізу (методу К'ельдаля) (табл. 2).

Необхідно унеможливити випаровування алюмінію та легувальних елементів зі сплавів АК7 (Ал9) та утворення їхніх субліматів, які поглинають гази, що виділяються із металу. Це зроблено експериментальним шляхом — вибором оптимальних умов підготування і завантаження зразків та аналізу. Температура та час аналізу: 2400°C та 40 с.

Рекомендації з калібрування печей приладів TN-114 та ТС-436 за температурою наведено у [27, 29].

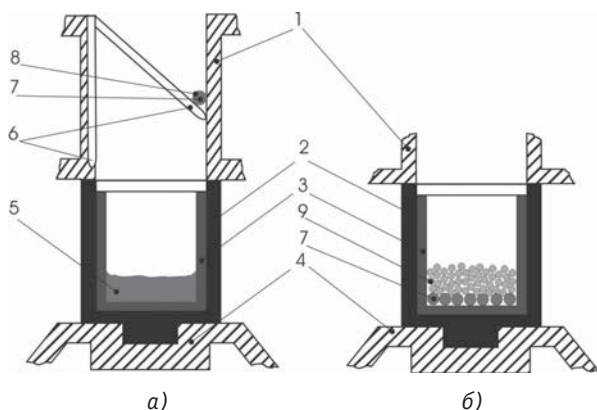


Рис. 1. Схеми завантаження алюмінієвого зразка до графітового тигля: а) крізь шлюз; б) метод попереднього підготування зразка.

1 — верхній електрод, 2 — зовнішній тигель, 3 — внутрішній тигель, 4 — нижній електрод, 5 — нікелева ванна, 6 — шлюз, 7 — алюмінієвий зразок, 8 — нікелева фольга, 9 — шматки нікелю

Fig. 1. The diagram for charging of aluminium sample to graphite crucible: a) through sluice; b) preliminary preparation of sample method

Таблиця 2. Рівень фону під час визначення вмісту азоту в алюмінієвому сплаві АК7 (Ал9)

Table 2. Background level under determination nitrogen content in aluminium alloy AK7 (Al9)

Характеристика металу	Спосіб завантаження металу до тигля	Вміст азоту, ppm
1. Нікелеві капсули фірми «Balzers» ch.69-26015	1. Порожній тигель	0
2. Нікелеві капсули фірми «LECO» № 502-183	2. Дегазація	
3. Нікелева фольга	3. Аналіз	
4. Нікель електролітичний ГОСТ 19241 — 80	1. Завантаження до тигля	0
	2. Дегазація	
	3. Аналіз	
	1. Завантаження до шлюзу печі TN-114	3,0 ± 0,5
	2. Дегазація порожнього тигля	
	3. Аналіз	
	1. Дегазація порожнього тигля у печі ТС-436	1,0 ± 0,5
	2. Завантаження до тигля	
	3. Підготування аналітичного зразка	
	4. Аналіз	

Таблиця 3. Аналіз нітрідів на вміст азоту

Table 3. Analysis nitrogen content in nitrides

Нітрід	Вміст азоту в нітріді (розрахунок за формулою) % мас.	Маса зразка, г	Вміст азоту, % мас.	
			TN-114	ТС-436
TiN	22,6 за стандартом 20,1 ± 0,5	0,010... 0,025	19,7 ± 1,2	20,6 ± 0,4
Si ₃ N ₄	39,9		39,7 ± 0,5	40,0 ± 0,6
AlN	34,1 за стандартом 34,1 (плазмохімічний синтез)		34,1 ± 0,4	34,2 ± 0,4

На жаль, стандартні зразки алюмінієвих сплавів на вміст азоту, тим більше сплавів, до яких уводили нітріди кремнію, титану та алюмінію, відсутні. Тому для підтвердження правильності вибраних нами режимів аналізу провели експерименти із визначення вмісту азоту в нітрідах кремнію, титану та алюмінію (табл. 3).

На рис. 2 представлено результати експериментів із визначення робочого діапазону мас аналітичних зразків. Проаналізовано майже 30 зразків початкового сплаву АК7 (Ал9) у діапазоні (0,08...0,41) г. За мас зразків <0,15 та >0,35 г простежується залежність результатів аналізів від маси.

За мас зразків < 0,15 г спостерігається зменшення результатів зі збільшенням маси. Це можна пояснити впливом на результат азоту, сорбованого поверхнею аналітичного зразка (фізичною адсорбцією та хемосорбцією). Вміст газів на поверхні аналітичного зразка більший, ніж у об'ємі. Зі збільшенням маси зразка результат різко зменшується. Газові домішки, що містяться на поверхні аналітичного зразка, завищують результат аналізу внаслідок:

- *фізичної адсорбції* — поглинання газів (N₂, O₂, H₂O, CO₂ тощо) із будь-якої атмосфери (повітря) зі створенням шару товщиною в одну чи кілька мо-

лекул на поверхні металу. Процес зворотний зі зміною температури та тиску.

- *хемосорбції* (активної адсорбції) — створення валентних зв'язків між металом та адсорбованими газами. Процес має тенденцію до незворотності (особливо за температурою).

Вміст азоту в аналітичних зразках не залежить від їхньої маси у діапазоні (0,15...0,35) г. Це і є робочий діапазон мас.

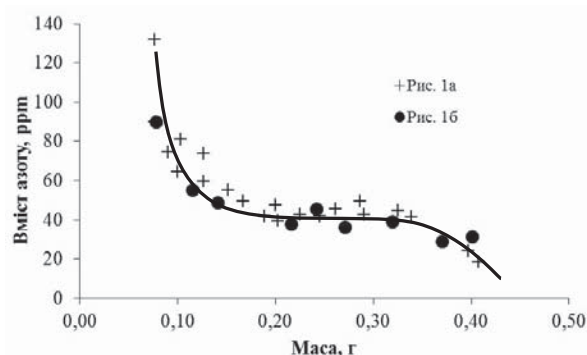


Рис. 2. Залежність вмісту азоту в початковому сплаві АК7 (Ал9) від маси аналітичного зразка

Fig. 2. Dependence of nitrogen content in initial alloy AK7 (Al9) on sample mass

За маси зразка >0,35 г результат аналізу зменшується зі збільшенням маси. Це можна пояснити тим, що за час аналізу зразок не встигає повністю прореагувати з рідкою металевою ванною. Аналіз затягується до двох хвилин. Є загроза протікання рідкого металу крізь тигель та порушення стабільності режиму аналізу. Крім того, різко зростає випаровування алюмінію та магнію з металевої ванни. Їхні сублімати концентруються на холодних поверхнях печі та сорбують азот, що виділяється з алюмінієвого зразка. Відношення маси аналітичного зразка до маси нікелю не повинно перевищувати (10...15) % мас.

Проаналізовано початковий сплав АК7 (Ал9) на вміст азоту ($0,0042 \pm 0,0006$ % мас.) (рис. 2). Його також проаналізували хімічним методом (методом К'ельдаля):

в Інституті електрозварювання, м. Київ: 0,0034 % мас.,

у Політехнічному інституті, м. Київ: 0,0035 % мас.,

у ВІЛС, м. Москва: 0,0030 % мас.

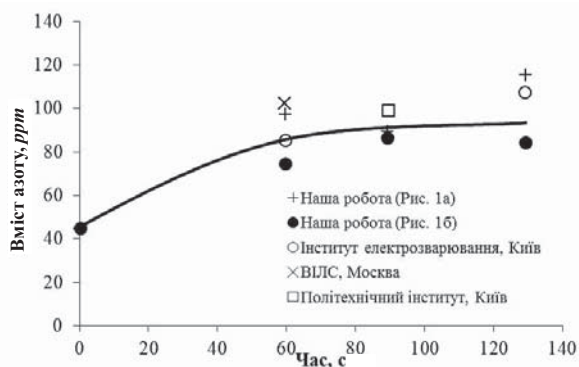


Рис. 3. Залежність вмісту азоту від часу обробки азотною плазмою розплаву АК7 (АЛ9)

Fig. 3. Dependence of nitrogen content from time of processing nitrogen plasma of melting AK7 (AL9)

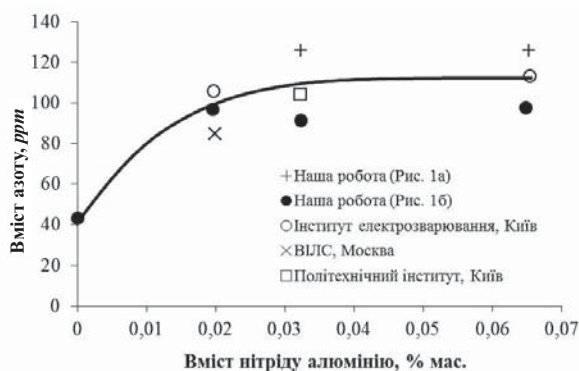


Рис. 5. Залежність вмісту азоту від кількості введенного до розплаву АК7 (АЛ9) нітриду алюмінію

Fig. 5. Dependence of nitrogen content from quantity of aluminium nitride, that was lead into melting AK7 (AL9)

Таблиця 4. Фазовий аналіз алюмінієвого сплаву АК7(Ал9) на електронографі EMP 100

Table 4. Fase analysis of aluminium alloy AK7(Al9) on electronograph EMP 100

Оброблення сплаву	Фаза
Початковий метал	$(\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\text{AlN})$
Оброблення розплаву азотною плазмою	$(\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\beta - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\text{AlN})$
Уведення до розплаву нітриду кремнію	$(\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\beta - \text{Si}_3\text{N}_4)$
Уведення до розплаву нітриду алюмінію	$(\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\beta - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\text{AlN})$
Уведення до розплаву нітриду титану	$(\alpha - \text{Si}_3\text{N}_4) + (\text{AlN})$

На рис. 3—6 наведено залежності вмісту азоту у сплавах АК7 (Ал9) від оброблення розплавів азотною плазмою та від кількості введених нітрідів кремнію, алюмінію та титану.

Результати експериментів опрацьовано згідно з рекомендаціями [30].

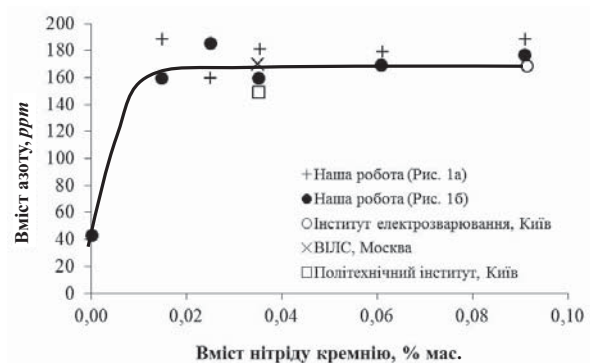


Рис. 4. Залежність вмісту азоту від кількості введенного до розплаву АК7 (АЛ9) нітриду кремнію

Fig. 4. Dependence of nitrogen content from quantity of silicon nitride, that was lead into melting AK7 (AL9)

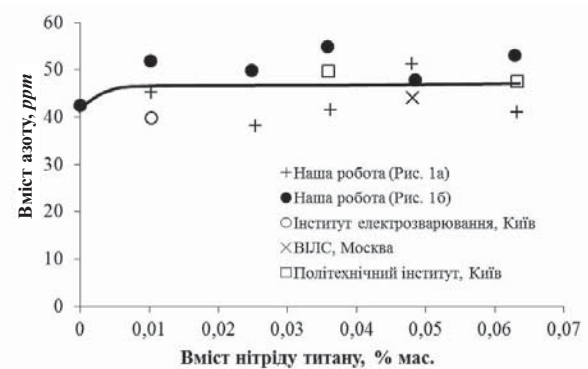
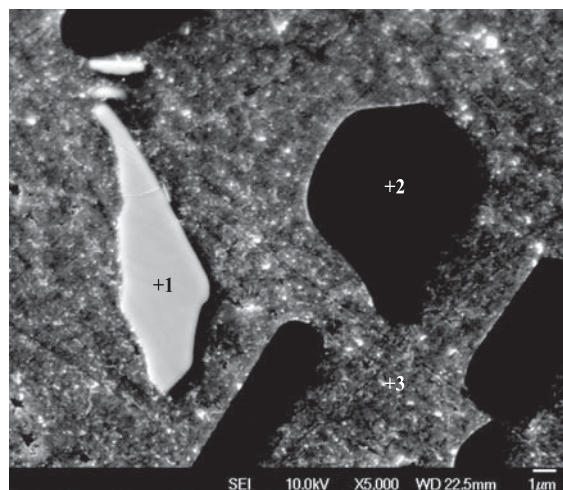


Рис. 6. Залежність вмісту азоту від кількості введенного до розплаву АК7 (АЛ9) нітриду титану

Fig. 6. Dependence of nitrogen content from quantity of titanium nitride, that was lead into melting AK7 (AL9)



Вміст елементів в атомних процентах:

Елемент	Точка 1	Точка 2	Точка 3
C	0.8	1.4	9.9
O	1.8	1.6	9.7
Al	48.9	0.8	77.1
Si	17.4	95.4	1.7
Fe	29.5	0.5	0.4
Cu	1.6	0.3	1.1

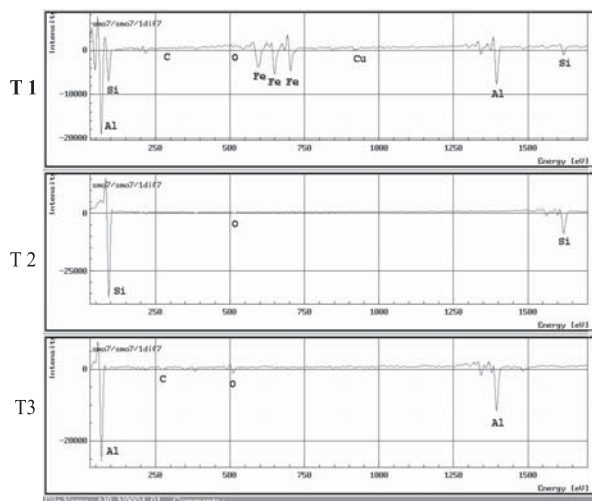


Рис. 7. Мікроструктура та спектри Оже сплаву АК7(Ал9), «обробленого» нітридом титану.

Fig. 7. Microstructure and Auger spectra of alloy AK7(Al9), «processing» by titanium nitride.

Визначено (рис. 6), що вміст азоту в сплаві, до якого вводили нітрид титану, не перевищує концентрації азоту в початковому металі. Спектральний (табл. 1) та фазовий (табл. 4) аналізи засвідчили, що сплав вміщує кількість титану на рівні початкового металу.

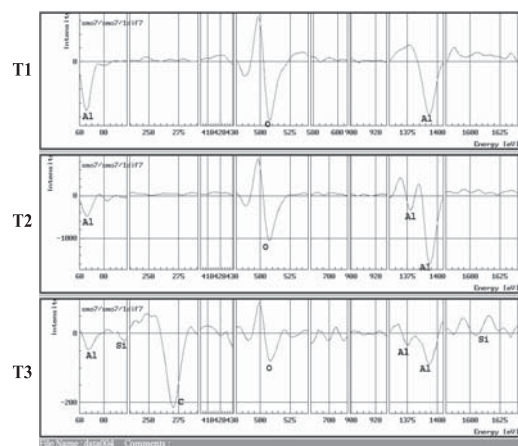
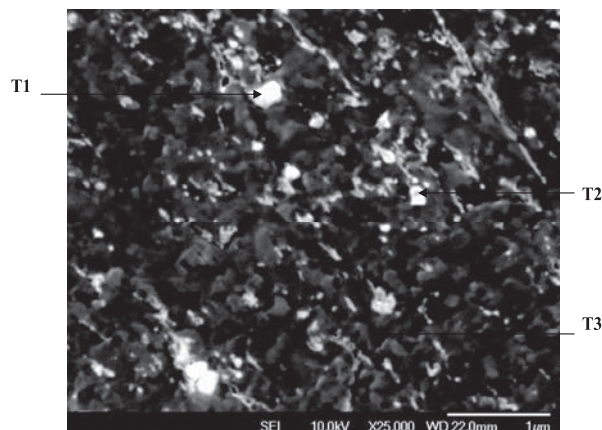


Рис. 8. Мікроструктура та спектри Оже сплаву АК7(Ал9), «обробленого» нітридом титану.

Fig. 8. Microstructure and Auger spectra of alloy AK7(Al9), «processing» by titanium nitride.

Дослідження структурних складових цього сплаву з розміром від 100 нм та більше на Оже — мікрозонді JAMP-9500F фірми «JEOL» не виявили присутності нітриду титану в металі (рис. 7, 8). Скоріше за все, у цьому сплаві нітрид титану не засвоївся рідким металом та перейшов у шлак.

Розроблений нами метод визначення азоту в алюмінієвих сплавах дозволяє знизити межу визначення та збільшити продуктивність аналізу.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику визначення вмісту азоту у алюмінієвих сплавах у потоці гелію. Метал розчиняють у ванні з рідкого нікелю, який насичується вуглецем із графітового тигля. Останній нагрівають електричним струмом. Тривалість аналізу: ~1 хв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем, М., Машиностроение (Lakishev N.P.

Diagrams of condition of the Binary metallic systems, M, Mechengineering), 1996, т/в 1, 176.

2. Хансен М., Андерко К., Структуры двойных сплавов, т.1 Гостехиздат (Hansen M., Anderko K., Constitutions of Binary Alloys, Gostechizdat USSR), М, 1962, 608 с/р.
3. Фромм Е., Гебхардт Е., Газы и углерод в металлах, Металлургия (Fromm E., Gebhardt E., Gases and carbon in metals, Metallurgy), М, 1980, 712 с/р.
4. ASM International Binary Alloys Phase Diagrams, Second Edition, 1996.
5. Ремизов Г.О., Чернега Д.Ф., Упрочнение отливок цветных сплавов Знание, УССР, Киев (Remizov G.O. Chernega D.F. Strengthening of casting of nonferrous alloys, Knowledge, USSR, Kiev), 1987, 17 с/р.
6. Альтман Л.Б., Неметаллические включения в алюминиевых сплавах, М, Металлургия (Altman L.B. Nonmetallic including in aluminium alloys, М, Metallurgy), 1965, 128 с/р.
7. Макаров Г.С., Рафинирование алюминиевых сплавов газами, М, Металлургия (Makarov G.S., Purification of aluminum alloys by gases, М, Metallurgy), 1983, 120 с/р.
8. Мондольфо Л.Ф., Структура и свойства алюминиевых сплавов, М, Металлургия (Mondolfo L.F. Structure and characteristics of aluminium alloys, М, Metallurgy), 1961, 240 с/р.
9. Botor Jan, Kinetics of liquid aluminium degassing with N₂, Cl₂, Zesz.nauk AGH, 1980, №778, 21-31.
10. Королев М.Л., Азот как легирующий элемент стали, М., Металлургия (Korolev M.L., Nitrogen as alloying element of steel, М, Metallurgy), 1961, 240 с/р.
11. Дьяченко Л.И., Погодина-Алексеева К.М., Влияние легирования азотом на свойства сплава Ал4, Литейное производство (Djachenko L.I., Pogodina-Alekseeva K.M., Influence of alloying by nitrogen on characteristic of alloys Ал4, Foundry production), 1970, № 2, 24—25.
12. Погодина-Алексеева К.М., Дьяченко Л.И., Способ легирования легких сплавов азотом, Авторское свидетельство №208273, Б.И. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки (Djachenko L.I., Pogodina-Alekseeva K.M., Method of alloying light alloys by nitrogen, Author's certificate №208273, B.I. Openings, inventions, industrial samples and trade marks), 1968, № 3.
13. Новохатский И.А., Попов И.Д., Карбовский И.И., Способ обработки расплавов алюминия и его сплавов. Авторское свидетельство № 939578, Б. И. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки (Novokhatsky I.A., Popov I.D., Karbovsky I.I., Method of processing melting aluminium and its alloys. Author's certificate № 939578, B.I. Openings, inventions, industrial samples and trade marks), 1982, № 24.
14. Свидуневич Н.А., Пальчевский Б.Н., Сидоров В.А. Плазменнохимическая обработка алюминиевого расплава, «Химия и химическая обработка», Минск, Высшая школа (Svidunovich N.A., Palchevsky B.N., Sidorov V.A., Plasmochemical processing of aluminium melting, Chemie and chemical processing, Minsk, High school), 1975, № 9, 67—70.
15. Борисова О.И., О содержании азота в алюминиевых порошках, Сб.тезисов докладов 10 Украинской республиканской научно-технической конференции, Днепропетровск, ДМЕТІ (Borysova O.I., About nitrogen content in aluminium powder, Coll.of papers 10 Ukrainian republic sci-tech. conference, Dnepropetrovsk, DMETI), 1986, 113.
16. Туровцева З.М., Кунин Л.Л., Анализ газов в металлах, М-Л, издат. АН СССР (Turvtseva Z.M., Kunin L.L., Analysis gases in metals, M-L, Publ. AN USSR), 1959, 390 с/р.
17. Вассерман Л.М., Кунин Л.Л., Суrowой Ю.Н., Определение газов в металлах, М, Наука (Vasserman A.M., Kunin L.L., Surovoy Y.N. Determination gases in metals, М, Nauka), 1976, 344 с/р.
18. Волинец В.Ф., Волинец М.П., Аналитическая химия азота, М., Наука (Volynets V.F., Volynets M.P., Analytical chemistry of nitrogen, М, Nauka), 1977, 308 с/р.
19. Клячко Ю.А., Коллоидные явления в металлах IX. Азот а алюминии и его сплавах, Журнал прикладной химии (Klachko Y.A., Colloidal phenomenon in metals, IX. Nitrogen in aluminium and its alloys, Magazine of applied chemistry), 1941, XIV, № 1 с/р. 84—92.
20. Станимирова М., Определяне на азотного съдържание на алуминиєви сплави, Техническа мисъл (Stanimirova M., Determination of nitrogen content in aluminium alloys, Technical view), 1978, т. 15, № 5, 113—116.
21. Методика контроля определения азота в алюминиевых сплавах фотоколориметрическим методом (Control methods of determination nitrogen in aluminium alloys by photocolorymetric methods), МК-312-33-84, ВИЛС, 1985, 8 с/р.
22. Simensen C.J., Berg G., Review of the inclusions in aluminium, Aluminium, 1980, V. 56, № 5 335—340.
23. Швайгер М.И. Выделение и определение нитридов алюминия и кремния, Зав.лаб. (Shvaiger M.I., Selection and determination aluminium and silicon nitrides, Zavod. Lab), 1960, № 11, 1223—1228.
24. Станимирова М., Определяне на азот в сплави на желязно-манганова основа и на алуминиєва основа, съдържащи силиций, Материалозн. и технол. (Stanimirova M., Determination nitrogen in alloys on iron-manganese base and aluminium base, supporting silicon, Material science and technical), 1983, 12, 69—74.
25. Кийтано Акияма, Акияма Одзакі, Определение следов натрия и азота в алюминии, Кейкин Дзоку (Kijitana Akijama, Akijama Odzaki, Determination of Traces natrium and nitrogen in aluminium, Kejkin Dzoku), Light Metals, 1957, № 24, 76—81.
26. Каруна Е.К., Титов В.М., Комарова Н.К., Носкова Г.В., Приказчикова Т.Д., О возможности определения азота в алюминиевых сплавах методом вакуумной экстракции, Технология легких сплавов (Karuna E.K., Titov V.M., Komarova N.K., Noskova G.V., Prikazchikova T.D., About possibility determination nitrogen in aluminium alloys by vacuum extraction method, Technology of light alloys), 1980, № 9, 36—38.
27. Калинюк М. Організація процесу аналізу титанових сплавів на вміст домішок кисню, азоту, водню та вуглецю, Метрологія та прилади (Kalyniuk M, Arrangement of the process of the analysis of titanium alloys on content of the impurities of oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon, Metrology and instruments), 2014, № 2, 50—57.
28. Калинюк Н., Латаш Ю.В. и др. Растворимость азота в жидкой меди, никеле и сплавах Cu-Cr, Ni-Cr, Известия АН СССР

- (Kalyniuk N. Latash Y.V. and others, Solubility nitrogen in liquid copper, nickel and alloys Cu-Cr, Ni-Cr, News AN USSR), 1986, № 1, 45—49.
29. Калинюк М., Визначення вмісту кисню у кремнії, Метрологія та прилади (Kalyniuk M., Determination oxygen

content in silicon, Metrology and instrument), 2013, № 6, 58—66.

30. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений, Ленинград, Наука (Zajdel A.N. Elementary valuation of the mistakes of measuring, Leningrad, Nauka), 1968, 98 с/р. ■

Отримано / received: 08.10.2014.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Д. Сміяном (Україна).

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

ЗАСІДАННЯ НАУКОВО-МЕТОДИЧНОЇ ПІДКОМІСІЇ МОН ЗА НАПРЯМОМ «МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

З 13 по 15 травня відбулося чергове засідання науково-методичної підкомісії (НМПК) Міністерства освіти і науки (МОН) за напрямом підготовки «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології» (МІВТ).

У м. Херсоні, у стінах Херсонського Національного технічного університету (ХНТУ) зібралися провідні науково-педагогічні працівники, які ведуть підготовку фахівців-метрологів у ВНЗ України.

Розпочав роботу НМПК її Голова проф. Ю.М. Туз, який висвітлив основні результати роботи цього колегіального органу за минулий рік. Зокрема, він відзначив зусилля колективів кафедр, представлених у НМПК, спрямовані на розроблення навчальних видань, публікацію наукових статей, залучення студентів до участі в конкурсах на кращі студентські роботи.

Із привітальним словом та повідомленням стосовно історії та сьогодення ХНТУ до присутніх звернувся його ректор проф. Ю.М. Бардачов. Досвідом підготовки фахівців за напрямом МІВТ у ХНТУ поділився завідувач кафедри інформаційно-вимірвальних технологій, електроніки та інженерії проф. ОО. Новіков.

Заслухано декілька доповідей і повідомлень, серед яких найбільший інтерес викликали доповіді проф. Ю.Ф. Павленка «Про міжнародну систему одиниць NS та шляхи її впровадження в Україні» та проф. С.А. Чеховського «Реалізація лабораторної бази кафедри метрології та вимірвальної техніки Івано-Франківського університету нафти і газу для дистанційного навчання в рамках проекту TEMPUS».

Засідання НМПК відбувалося після щойно оприлюдненого «Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» (далі - Переліку), затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 266 від 29.04.2015. У новому керівному документі значно змінено структуру галузей знань і скорочено кількість спеціальностей підготовки фахівців порівняно з попереднім «Переліком», але збережено спеціальність «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка». Слід відзначити, що з самого початку діяльності робочої групи МОН, яка розробляла проект нового «Переліку», члени НМПК активно працювали над всебічним висвітленням вагомості напрямку підготовки МІВТ. Особливу роль при цьому відігра-

ла президія НМПК на чолі з проф. Ю.М. Тузом, зокрема, в процесі підготовки довідкового матеріалу і пропозицій для робочої групи з розроблення нового «Переліку». Значною мірою завдяки цим спільним зусиллям підтверджено високу значимість зазначеної спеціальності, і вона зайняла належне місце в оновленій системі підготовки кадрів.

Тому протягом трьох днів роботи на засіданні розглянуто проблемні питання і завдання, вирішення яких вже найближчим часом визначатиме шляхи переходу підготовки фахівців за напрямом «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології» до підготовки за спеціальністю «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка». Зокрема, обговорено точні завдання НМПК і представлених в ній кафедр у зв'язку із затвердженням нового «Переліку», а також заходи, спрямовані на подальший розвиток змісту навчання за спеціальністю за сучасних умов.

Учасники засідання ознайомилися з основними напрямками навчально-методичної роботи та наукової діяльності, з лабораторною базою кафедри інформаційно-вимірвальних технологій, електроніки та інженерії ХНТУ. Відбувся обмін думками стосовно особливостей організації навчального процесу під час спілкування з професорсько-викладацьким складом цього ВНЗ. Члени НМПК взяли участь у роботі 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія, інформаційно-вимірвальні технології та системи», підвели підсумки Всеукраїнського конкурсу на кращу студентську роботу із застосування досягнень корпорації «National Instruments», провели презентацію нових методичних розроблень та видань навчально-методичної літератури. Обговорили й ухвалили перспективний план і рекомендації щодо видання нової навчальної літератури.

НМПК прийняла рішення, в якому, зокрема, схвалено досвід підготовки фахівців за напрямом МІВТ у ХНТУ; рекомендовано зосередити викладання дисциплін, пов'язаних з метрологією та інформаційно-вимірвальною технікою, на кафедрі інформаційно-вимірвальних технологій, електроніки та інженерії цього ВНЗ.

**О. Крюков, член НМПК,
доктор технічних наук, професор,
Національна академія
Національної гвардії України, м. Харків**

ВСЕУКРАЇНСЬКА СТУДЕНТСЬКА ОЛІМПІАДА ЗА НАПРЯМОМ ПІДГОТОВКИ «МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ»

18–22 травня у Національному університеті (НУ) «Львівська політехніка» проведено Всеукраїнську студентську олімпіаду за напрямом підготовки «Метрологія, стандартизація та сертифікація». Міністерство освіти та науки України вже протягом 5 років надає право Львівській політехніці проводити II етап цієї олімпіади.

Її учасників привітали Голова організаційного комітету проректор з науково-педагогічної роботи НУ «Львівська політехніка» проф. Д. Федасюк, директор Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології проф. М. Микийчук, завідувач кафедри метрології, стандартизації та сертифікації (МСС) проф. П. Столярчук, відповідальний секретар Олімпіади доц. Н. Гоц.

В олімпіаді взяв участь 51 студент із 12 вищих навчальних закладів (ВНЗ) України, зокрема, із національних технічних університетів: «ХПІ», Івано-Франківського нафти і газу та Херсонського; національних університетів: аерокосмічного ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харківського автомобільно-дорожного, гірничого, «Львівська політехніка», Львівського аграрного, Харківського радіоелектроніки, Одеського політехнічного; Одеської державної академії технічного регулювання та якості; Національної металургійної академії України.

Основна частина олімпіади – розв'язування тестових завдань та задач — відбувалася на кафедрі метрології, стандартизації та сертифікації. Викладачі кафедри професори Є. Походило, Р. Байцар, Т. Бойко, доценти Н. Гоц, Т. Бубела підготували тестові питання та задачі олімпіади за Програмою II етапу олімпіади за такими темами:

- метрологія,
- опрацювання результатів вимірювань;
- метрологічне забезпечення вимірювань;
- міжнародна та національна стандартизація;
- оцінювання відповідності в Україні та світі.

За підрахунком результатів написання конкурсних завдань олімпіади визначено, що переможцями Олімпіади стали студентки: І. Завада, НТУ «ХПІ» (I місце); Н. Зіганшин, НУ «Львівська по-



літехніка», Ю. Голенькова, Харківський НУ радіоелектроніки (II місце); М. Криворучко, Одеська Державна академія технічного регулювання та якості, Л. Удовик, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є.Жуковського «ХАІ» (III місце).

Учасники та організатори олімпіади зустрілися за Круглим столом. Провідні фахівці у сфері метрології генеральний директор ДП «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних та управляючих систем» В. Паракуда, директор Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології НУ «Львівська політехніка» М. Микийчук, завідувач кафедри МСС П. Столярчук, професор кафедри МСС В. Яцук ознайомили учасників олімпіади з сучасними напрямками розвитку метрології, стандартизації та сертифікації. Темати дискусії стали: підготовка фахівців з метрології, стандартизації та сертифікації кафедрою МСС НУ «Львівська політехніка», іншими ВНЗ України; наукові дослідження та практичні розроблення кафедр-учасниць олімпіади; досвід організації наукової роботи студентів; можливості реалізації спільних наукових досліджень у сфері метрології, стандартизації та сертифікації.

Для учасників олімпіади організовано екскурсії до Церкви св. Юра, історичних пам'яток старого Львова, Золочівського замку Львівщини. Це дозволило поглибити їх знання з історії України та познайомитися з традиціями Львівщини.

На урочистому закритті представлено фото-презентацію подій олімпіади, колективно підготовлену студентами-учасниками та аспіранткою кафедри МСС О. Антонюк (<https://www.youtube.com/watch?v=NT093kecy2o&feature=youtu.be>).

*П. Столярчук, д.т.н., проф., завідувач кафедри МСС НУ «Львівська Політехніка»,
Н. Гоц, д.т.н., доц., відповідальна за проведення олімпіади.*

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. Ліцензія МОН України серія № 636067 від 10.03.2015 р. Після успішного закінчення курсу слухачі отримують посвідчення чи посвідчення з сертифікатом ДП «УкрНДНЦ».

План набору слухачів на II півріччя 2015 року

Ч/ч	Курс	Період навчання
	1. Підвищення кваліфікації фахівців повірочних та калібрувальних лабораторій з повірки та калібрування засобів вимірювальної техніки за видами вимірювань:	
1.1	геометричних величин	07.12 — 18.12
1.1.1	спеціалізованих засобів вимірювань геометричних величин на залізничному транспорті	07.12 — 11.12
1.1.2	колієвимірювальних шаблонів	07.12 — 11.12
1.1.3	шаблонів вагонного господарства	07.12 — 11.12
1.2	механічних величин	07.12 — 18.12
1.2.1	маси	07.12 — 11.12
1.3	параметрів потоку, витрат, рівня та об'єму речовин	у міру комплектування, 2 тижні
1.3.1	маси, об'єму, місткості та витрати	у міру комплектування, 2 тижні
1.3.2	маси, об'єму, місткості	у міру комплектування, 2 тижні
1.3.3	об'єму, місткості	у міру комплектування, 2 тижні
1.4	температури, тиску, витрати	09.11 — 20.11
1.4.1	температури, тиску	09.11 — 20.11
1.4.2	тиску	09.11 — 13.11
1.5	електричних величин	21.09 — 02.10
1.5.1	електричних величин на залізничному транспорті	21.09 — 25.09
1.6	радіотехнічних величин	21.09 — 02.10
1.6.1	радіотехнічних величин на залізничному транспорті	21.09 — 25.09
	2. Підвищення кваліфікації фахівців за курсами:	
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві	30.06 — 10.07; 19.10 — 30.10
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві (з д/р)	30.06 — 03.07; 19.10 — 23.10
2.2	Метрологічна експертиза технічної документації	30.06 — 10.07; 19.10 — 30.10
2.3	Забезпечення єдності вимірювань в закладах охорони здоров'я	19.10 — 23.10
2.4	Забезпечення єдності вимірювань ВК ВІС та АСК ТП. Метрологічний контроль ВК	30.06 — 10.07; 19.10 — 30.10
2.5	Забезпечення єдності вимірювань в калібрувальних та вимірювальних лабораторіях	30.06 — 03.07; 07.12 — 11.12; 19.10 — 23.10
2.5.1	Забезпечення відповідності калібрувальних та вимірювальних лабораторій критеріям атестації в ДМС, підготовка до атестації	30.06 — 03.07; 19.10 — 23.10; 07.12 — 11.12
2.6	Забезпечення єдності вимірювань при проведенні контролю колісних транспортних засобів	06.07 — 10.07
2.6.1	Забезпечення єдності вимірювання димності відпрацьованих газів двигунів автомобілів згідно з ДСТУ 4276:2004	06.07 — 10.07
2.7	Забезпечення єдності вимірювання та обліку витрат енергоносіїв	30.11 — 04.12
2.7.1	Забезпечення обліку якості та кількості вугілля при прийманні на підприємствах	у міру комплектування, 1 тиждень
2.7.2	Забезпечення єдності вимірювання та обліку витрати природного газу	30.11 — 04.12
2.7.3	Основні методи та засоби вимірювання витрати та кількості газу на підприємствах постачання газу споживачам. Калібрування та повірка ЗВТ	30.11 — 04.12
2.8	Розробка та атестація методик виконання вимірювань. Оцінка похибки та невизначеності вимірювань	09.11 — 13.11
2.9	Технічне регулювання в Україні	14.09 — 18.09
2.10	Розробка і впровадження систем управління якістю	26.10 — 30.10
2.10.1	Забезпечення функціонування систем управління якістю та проведення внутрішнього аудиту	26.10 — 30.10
2.11	Стандартизація, розробка та впровадження нормативних документів	14.09 — 18.09
2.12	Тепловізійні вимірювання. Тепловізійні методи контролю і діагностики	23.11 — 27.11; 07.12 — 11.12
2.13	Проведення вимірювань та випробувань електротехнічними лабораторіями	21.09 — 25.09; 07.12 — 11.12
2.14	Внутрішній аудит в лабораторіях за ДСТУ ISO/IEC 17025:2006	17.08 — 21.08; 02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
2.15	Вимоги до калібрувальних та випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Внутрішній аудит в лабораторіях	17.08 — 21.08; 02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
2.15.1	Вимоги до калібрувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань.	02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
2.15.2	Вимоги до випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань.	02.11 — 06.11 та в міру комплектування, 1 тиждень
	3. Тематичні семінари:	
3.1	Особливості забезпечення єдності вимірювань в сучасних умовах. Нова редакція Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність».	01.07 — 02.07; 21.10 — 22.10
3.2	Стандартизація. Актуальні питання сьогодення. Нова редакція Закону України «Про стандартизацію».	15.09 — 16.09
	4. Підготовка кандидатів в аудиторів:	
4.1	Підготовка кандидатів в аудиторів з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (1-й модуль)	14.09 — 19.09
4.2	Підготовка кандидатів в аудиторів з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (2-й модуль)	у міру комплектування, 4 дні

Заявки на навчання надсилати на адресу Харківської філії ДП «УкрНДНЦ», електронну адресу або факсом.

Комплектування додаткових груп проводиться на замовлення підприємств. За вимогою підприємств надсилаємо інформаційні листи з тематикою окремих курсів навчання.