

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

№ 3 (65), 2017

Науково-виробничий журнал

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
Державне підприємство
«Всеукраїнський державний
науково-виробничий центр
стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
(ДП «Укрметртестстандарт»),
ТОВ виробничо-комерційна
фірма «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску дванадцятий
Передплатний індекс 92386

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., проф., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
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., проф.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В., к. т. н.
Кухарчук В. В., д. т. н., проф.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Народницький Г. Ю., д. т. н., с. н. с.
Неежмаков П. І., д. т. н., доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., д. т. н., проф.
Радєв Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Самойленко О. М., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
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 №12 від 29.06.2017)

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Свободи, 32б;
Тел.: (057) 714-23-07, (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
http://www.amu.in.ua/journal1

Видавець та виготовлювач:

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

Підписано до друку 09.07.2017.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 23.

© «Метрологія та прилади», 2017

Журнал **зарєєстровано**
у Державній реєстраційній
службі України, свідоцтво серія
КВ № 20033-8933ПР від 17.05.2013;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015

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

16–18 травня 2017 року в Мадриді (Іспанія) відбулися 11-а
Генеральна асамблея EURAMET та Науковий симпозиум,
присвячений 30-ій річниці співробітництва в Європейській метрології.

В їх роботі взяли участь понад 100 фахівців, які представляли
національні метрологічні інститути 37 країн-членів EURAMET, призначені
інститути (designated institutes), технічні комітети EURAMET, інші
урядові та неурядові організації, зокрема, BIPM, WELMEC, SIM, Eurachem,
CEN- CENELEC, EUROLAB.

Україну на цих заходах представляли заступник директора
Департаменту технічного регулювання Мінекономрозвитку України
О.П. Гіленко та начальник відділу ДП «Укрметртестстандарт»
С.В. Ціпоренко.

На засіданні Генеральної асамблеї заслухано й обговорено виступи та
доповіді провідних європейських метрологів, присвячені Національному
метрологічному інституту Іспанії (CEM) та метрологічній
інфраструктурі цієї країни; стратегічній та дослідній діяльності
EURAMET, розвитку потенціалу і зв'язків цієї організації; внеску EURAMET
у перегляд CIPM MRA; діяльності технічних комітетів EURAMET; важливим
подіям у партнерських організаціях: WELMEC, SIM, NCSLI, Eurachem, CEN-
CENELEC, EUROLAB, COOMET, — у повних і асоційованих членів EURAMET: INM
(Молдова), Rise (Швеція), BFKH (Угорщина).

Під час Наукового симпозиуму заслухано виступи та доповіді стосовно
історії створення та становлення EURAMET, її науково-дослідних програм,
а також перспектив розвитку та завдань на майбутнє. Окрім того, його
учасникам було представлено доповідь професора, лауреата Нобелівської
премії, доктора Клауса фон Клітцинга «Квантовий ефект Хола: рушійна
сила нової Міжнародної системи одиниць».

Більш детальну інформацію щодо 11-ої Генеральної асамблеї EURAMET
можна отримати за таким посиланням: www.euramet.org

(За матеріалами ДП «Укрметртестстандарт»)

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО	INTERNATIONAL COOPERATION
Вітальні послання директорів Міжнародних бюро з мір і вагів Мартіна Мілтона та законодавчої метрології Стівена Паторея з нагоди Всесвітнього дня метрології 2017 Вимірювання для транспорту3	Messages from the Directors of the BIPM Martin Milton and of the BIML Stephen Patoray dedicated to the World Metrology Day 2017 Measurement for transport3
Науковій, технічній, навчальній та метрологічній спільнотам України 4	Scientific, Technical, Educational and Metrological Communities of Ukraine 4
ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ	LEGAL METROLOGY
Попруга Ю., Кузьменко Ю., Самойленко О., Черепков С., Жалдак М., Проненко С., Потоцький І., Ціпоренко С. Відповідальність, компетентність, демократичність — основи політики держави у сфері метрології та метрологічної діяльності.....8	Popruga Yu., Kuzmenko Yu., Samoylenko O., Cherepkov S., Zhaldak M., Pronenko S., Pototskiy I., Tsiporenko S. The Responsibility, Competence, Democrat — Principles of Power Politics in Sphere of Metrology and Metrological Activities8
МІЖНАРОДНІ ЗВІРЕННЯ	INTERNATIONAL COMPARISONS
Величко О. Міжнародні ключові та додаткові звірення у рамках КООМЕТ національних еталонів одиниць електричної ємності..... 14	Velychko O. International Key and Supplementary Comparison Coomet of National Standard of Electric Capability Units 14
ЕТАЛОНИ ТА ЕТАЛОННІ УСТАНОВКИ	ETALONS AND ETHNIC INSTALLATIONS
Воронцов Є., Гиря П., Лобойченко М., Народницький Г. Рекомендації щодо роботи з еталонними металевими мірниками 22	Vorontsov Ye., Gyrya P., Loboichenko M., Narodnyskiy G. Recommendations for Work with Standard Metal Measuring Tank 22
ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ	PARAMETERS AND CHARACTERISTICS
Квітний Р., Іванов Ю., Кривогубченко С., Стукач О. Особливості оцінювання параметрів процесу передавання даних із використанням турбо-кодів 25	Kvyetnyy R., Ivanov Yu., Krivogubchenko S., Stukach O. Features of Estimation of the Transmission Data Process Using Turbo-Codes 25
ПОВІРКА ТА КАЛІБРУВАННЯ	VERIFICATION AND CALIBRATION
Косарєва О., Дзябенко О. Коригування міжкалібрувальних інтервалів вимірювального обладнання 33	Kosarev E., Dzyabenko A. The Correction of Intercalibration Intervals of Measuring Apparatus 33
ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	ERRORS AND UNCERTAINTY
Матіко Ф., Роман В. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку із застосуванням одноядерних функцій salami 36	Matiko F., Roman V. Investigation of Ultrasonic Flowmeter Error in Conditions of Distortion of Flow Structure Using One Peak Functions Salami 36
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ	NONDESTRUCTIVE CONTROL
Григоренко С., Григоренко І. Дослідження впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на похибку виявлення дефектів металевих виробів за допомогою апарату fuzzy-logic..... 44	Hrihorenko S., Hrihorenko I. Investigation of the Influence of External and Internal Factors on the Error of the Detection of Metal Products Defects with the Apparatus Fuzzy-Logic 44
НЕЛІНІЙНА МЕТРОЛОГІЯ	NONLINEAR METROLOGY
Мачехін Ю., Курський Ю. Представлення невизначеності вимірювання нелінійних динамічних змінних..... 49	Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Expression of Uncertainty in Measurement of Nonlinear Dynamic Variables 49
ШКАЛИ ВИМІРЮВАННЯ	MEASURING SCALES
Промоскаль В., Заруба В., Близниченко О., Будко В. Прикладні аспекти неметричних шкал вимірювання в енерготехнології вугільних енергоблоків ТЕС 52	Promoskal V., Zaruba V., Bliznichenko O., Budko V. Applied Aspects of Non-Metric Measurement Scales in Power Technology of Coal Power Units of Thermal Power Stations 52
УБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ	SUPPORT AND EFFICIENCY
Габрук Р. Гарантування безпеки експлуатації рухомих об'єктів водного транспорту шляхом забезпечення надійності функціонування сертифікованих систем 64	Gabruk R. Guaranteeing Safety of Operation of Mobile Water Transport Objects by Ensuring the Certified Systems Reliability 64
ОХОРОНА ПРАЦІ	OCCUPATIONAL HEALTH
Мамонтов О., Колтун Ю., Мамонтов О. Метод оптимального розміщення джерел шуму та ЕМП у виробничому приміщенні.....67	Mamontov A., Koltun Y., Mamontov O. Method of Optimum Placement of Noise Sources and Elektromagnetic Field in Working Area 67
ІНФОРМАЦІЯ 24, 72	INFORMATION 24, 72



ВІТАЛЬНІ ПОСЛАННЯ ДИРЕКТОРІВ МІЖНАРОДНИХ БЮРО З МІР І ВАГІВ МАРТИНА МІЛТОНА ТА ЗАКОНОДАВЧОЇ МЕТРОЛОГІЇ СТВЕНА ПАТОРЕЯ З НАГОДИ ВСЕСВІТНЬОГО ДНЯ МЕТРОЛОГІЇ 2017 ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТУ



Економічна діяльність і громадяни в усьому світі залежать від доступу до безпечного й надійного транспорту. Це є одним із факторів, який найбільш важливий для успішного розвитку сучасного суспільства.

Оскільки потреби у нових і більш досконалих засобах транспорту очевидні, дуже важливо, щоби вони відповідали зростаючим потребам економіки й охорони навколишнього середовища. Кожний вид транспорту — від велосипедів до контейнерних суден, від автомобілів до космічного корабля — повинен задовольняти вимогам відповідних стандартів. На цих стандартах, що визначають вимоги до кожного аспекту виробництва, — від безпеки й економічності до викидів в атмосферу — повинні засновуватися національні й міжнародне законодавства.

Упровадження стандартів залежить від методів і засобів вимірювань, а також еталонів. Ось деяка тематика найзатребуваніших стандартів, розроблених з урахуванням результатів діяльності національних метрологічних інститутів:

- точне й швидке зважування вантажних контейнерів для забезпечення навантаження контейнерних суден;
- характеристика поверхонь із низьким коефіцієнтом тертя й аеродинамічних форм літальних апаратів для мінімізації витрати палива;
- достовірні вимірювання хімічного складу викидів транспортних засобів для надання підтримки міським владам і регулювальним органам для контролю рівнів забруднення.

Зі збільшенням потреби в доступному й ефективному транспорті також зростає необхідність відповідних вимірювань і стандартів. Деякі із цих вимог рано чи пізно будуть задоволені завдяки новим розробленням, таким як автомобілі без водіїв і транспортні засоби з нульовим рівнем викидів, які, у свою чергу, поставлять нові завдання для метрології.



Якщо судити за послідовністю тем і статей, пов'язаних із Всесвітнім днем метрології протягом останніх років, то стає зовсім очевидним, що законодавча метрологія є важливою частиною нашого повсякденного життя. У багатьох відношеннях транспорт також відіграє значну роль у житті кожного із нас, кожного дня:

- вода, газ і електрика повинні транспортуватися від їхнього джерела до місць використання, таким

як наші будинки або підприємства;

- бензин і дизельне паливо також повинні транспортуватися від свого джерела через переробні заводи в резервуари для зберігання й, зрештою, до нашого легкового й вантажного автотранспорту;
- більша частина продукції, овочів, м'яса й інших продуктів харчування повинні перевозитися з місць їх виробництва на споживчі ринки.

Автомобільні дороги й залізниці, повітря, вода, кабелі й трубопроводи — всі вони забезпечують середовище для перевезення людей і/або вантажів.

Багато виробів, таких як наші смартфони, комп'ютери або телевізори, виробляються в одному місці, а потім повинні перевозитися до місць роздрібного продажу. Навіть вода часто повинна перевозитися на великі відстані для задоволення сільськогосподарських і міських потреб.

Близько 30 різних Рекомендацій МОЗМ відносяться до того чи іншого виду транспорту й поширюються на стандарти для встаткування, використовуюваного для вимірювання різних аспектів транспортного ланцюжка. Ці Рекомендації пропонують вирішення низки питань; ось деякі з них:

* R 99 Instruments for measuring vehicle exhaust emissions (Прилади для вимірювань викидів вихлопних газів транспортних засобів).

* R 126 Evidential breath analyzers (Доказові аналізатори дихання).

* R 80 Road and rail tankers with level gauging (Автомобільні й залізничні цистерни з вимірюванням рівня).

* R 106 Automatic rail-weighbridges (Автоматичні вагонні ваги).

* R 134 Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads (Автоматичне встаткування для зважування автотранспортних засобів у русі й вимірювання навантаження на вісь).

* R 50 Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers) (Підсумовувальні автоматичні прилади зважування (конвеєрні ваги) безперервної дії).

* R 59 Moisture meters for cereal grains and oilseeds (Вимірники вологості продовольчого зерна й насіння олійних культур).

Можливість безпечно, економічно й акуратно транспортувати різні предмети стала відігравати важливу роль у повсякденному житті людей у більшості країн світу. Чи пов'язано це з торгівлею з нашими сусідами, з прилеглим містом або місцями у віддалених кутках світу, — ми всі є або отримувачами, або постачальниками продуктів і виробів, що транспортуються.

Ми сподіваємося, що цього року Ви знову з радістю відзначите з нами Всесвітній день метрології, й з нетерпінням чекаємо цей день, щоби ще раз підкреслити значення метрології в нашому світі. 📏



НАУКОВІЙ, ТЕХНІЧНІЙ, НАВЧАЛЬНІЙ ТА МЕТРОЛОГІЧНІЙ СПІЛЬНОТАМ УКРАЇНИ

Д.т.н., проф. Євген Володарський —
Президент АМУ,

Д.т.н. Володимир Большаков —
Віце-президент АМУ,

К.т.н. Юрій Кузьменко —
Заступник генерального директора
ДП «Укрметртестстандарт», член-кор. АМУ,

Сергій Проненко – начальник відділу
міжнародного співробітництва у сфері
метрології ДП «Укрметртестстандарт»,
член-кор. АМУ

Академія метрології України (АМУ) та Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий Центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт») звертаються до наукових метрологічних центрів України, наукових установ Академії Наук України, учбових закладів всіх рівнів, метрологічних служб підприємств і організацій, керівництва та працівників випробувальних та калібрувальних лабораторій усіляко підтримати ініціативу і заклик до співпраці Міжнародного Бюро з Мір і Вагів (BIPM) у поширенні знань стосовно введення нових визначень основних одиниць Міжнародної системи одиниць SI.

На всіх етапах розвитку суспільства його науковий, технологічний, торговельний, соціальний (у певному розумінні), культурний рівні визначалися і визначаються філософсько-фізичною природою й економічною раціональністю визначення одиниць вимірювань та фізичним і технологічним рівнями їх первинної реалізації. Сьогодні для людства настав надзвичайно важливий етап переходу від накопичення знань стосовно природних фізичних констант із використанням усіх досягнень фізики і, зокрема, метрології до визначення основних одиниць міжнародної системи у такий спосіб, щоби

певні природні фізичні константи дорівнювали значенням, зафіксованим на момент «перевизначення». Це надасть можливість перейти від артефактів як основ попередніх визначень до природних незмінних констант, що характеризують фізичні явища на квантовому рівні.

Міжнародним Комітетом з Мір і Вагів (CIPM) та Міжнародним Бюро з Мір і Вагів визначено, що рішення стосовно нових міжнародних визначень одиниць SI має бути прийнято Генеральною Конференцією з Мір і Вагів (CGPM) у листопаді 2018 року. З цього приводу BIPM надіслало національним метрологічним установам спеціальний документ під назвою «Майбутній перегляд Si. Бренд Бук» (*Future Revision of the Si. Brand Book*). Повний текст цього документа англійською мовою можна отримати на сайті BIPM за посиланням:

<http://www.bipm.org/en/si-download-area/>

Неофіційний переклад українською викладено на сайтах АМУ та ДП «Укрметртестстандарт».

Основному тексту Бренд Буку передувє лист-звернення Директора BIPM доктора Мартіна Дж. Мілтона, переклад якого наводиться повністю.



Вступне слово директора BIPM

Я радий надати вам цей Бренд Бук, який допоможе всьому співтовариству метрологів відзначити перевизначення Міжнародної системи одиниць (SI). На момент написання роботи ми очікуємо, що це станеться, коли Генеральна Конференція з Мір і Вагів збереться у листопаді 2018 року.

Робота, необхідна для досягнення цієї мети, тривала багато років і була насправді міжнародними зусиллями. Універсальність доступу, який вона дозволить, була метою для «метричної системи», історія якої налічує понад 200 років.

Така важлива подія надасть унікальну можливість для просування робіт з метрології. Ми сподіваємося, що матеріал у цьому Бренд Букі дозволить окремим національним метрологічним інститутам максимально використати цей шанс. Використання одного й того ж логотипу і ключових повідомлень у всьому світі гарантує, що заходи різних організацій будуть узгодженими й об'єднаними задля підвищення профілю SI та метрології на міжнародному рівні.

Цю книгу і додаткові ресурси можна завантажити з нашого сайту:

<http://www.bipm.org/en/si-download-area/>

Я надзвичайно вдячний *Fiona Aty* (Фіоні Оті) (NPL), *Valerie Morazzani* (Валері Мораззані) (LNE), *Gail Porter* (Гейлу Портеру) (NIST) і *Jens Simon* (Йенсу Сімону) (PTB) за їх роботу зі створення цієї книги та її змісту.

Я з нетерпінням чекаю спільної роботи з Вами для просування робіт з метрології та перегляду SI.



Мартін Дж.Т. Мілтон (*Martin J.T. Milton*),
Директор BIPM, Павільйон Бретю, Севр, Франція

У книзі Бренд Бук сформульовано прагнення, цілі, суб'єкти та основні етапи і механізми здійснення кампанії з ознайомлення всіх верств суспільства зі значимістю та

головним змістом перегляду та «перевизначення» основних одиниць SI. Нижче наведено у неофіційному перекладі деякі з головних положень Бренд Буку.



Прагнення на 2018 рік

Надати унікальну можливість поговорити про SI

SI використовують надзвичайно широко, але її повний вплив рідко визнають або цінують. Існуватимуть аудиторії, які будуть зацікавлені, й ті, які повинні бути зацікавлені. Ми прагнемо використати це і ще більше підвищити обізнаність відносно важливої ролі вимірювань та метрології.

Наповнити змістом універсальність доступу до узгодженої бази для вимірювань по всьому світу

Це була амбіція «метричної системи», історія якої налічує понад 200 років. Із 2018 року можна буде зрозуміти всі визначення універсально вперше.

Підтримувати майбутні вимоги для підвищення точності

Із розвитком науки і техніки вимоги до точності вимірювань зростатимуть. Визначення 2018 року дозволять їх виконати на багато років вперед.

Наше прагнення полягає в тому, щоби заохочувати НМІ (національні метрологічні інститути) використовувати цю можливість для створення інформаційної кампанії навколо SI у своїх країнах.





Підхід і принципи інформаційної кампанії

Була створена Робоча група CIPM для просування SI. Робоча група має:

- забезпечувати фокусування на цю можливість;
- створювати ресурси для підтримки в цьому прагненні;
- заохочувати НМІ проводити власні інформаційні кампанії;
- сприяти обміну ресурсами.

Принципи взаємодії НМІ:

- намагатися використати цю подію, щоби обговорити SI в загальних термінах;
- використовувати надані ресурси або створювати свої власні;
- вільно обмінюватися інформацією через Робочу групу;
- забезпечити, аби всі матеріали відповідали призначенню і мали відповідні авторські права і схвалення;
- брати на себе відповідальність за переклад і незначне редагування або внесення місцевого контексту;
- брати на себе відповідальність за реалізацію у своїй власній країні (при цьому ті, що мають тісні зв'язки, можуть забажати об'єднати сили);
- використовувати ключові повідомлення та терміни, зазначені в цьому Бренд Буці;
- шукати можливості для спільних комунікаційних програм поза цієї кампанії.

Більш детальну інформацію стосовно цієї Робочої групи можна отримати за адресою:

www.bipm.org/en/committees/cc/wg/cipm-tgsi.html



Що таке перегляд SI

У переглянутому SI чотири базові одиниці, а саме, кілограм, ампер, кельвін і моль будуть перевизначені з точки зору констант; нові визначення будуть засновані на фіксованих чисельних значеннях постійної Планка (h), елементарного заряду (e), постійної Больцмана (k) і постійної Авогадро (N_A) відповідно.

Окрім того, визначення всіх семи базових одиниць S_i будуть також рівномірно виражені з використанням формулювання з явною постійною і буде розроблено конкретне впровадження в практику, щоби пояснити розуміння визначень кожної з базових одиниць практичним способом.

Це призведе до більш простого і більш фундаментального визначення всього SI й не обмежуватиметься останніми визначеннями, заснованими на матеріальному артефакті — міжнародному прототипі кілограма.

Після перевизначення SI являтиме собою систему одиниць, в якій:

- незбурена частота надтонкого переходу основного стану атома цезію-133 $\Delta\nu_{CS}$ дорівнює 9 192 631 770 Герц;
- швидкість світла у вакуумі c становить рівно 299 792 458 метрів за секунду;
- стала Планка h дорівнює $6,626\ 068\ 96 \times 10^{-34}$ Джоуль·секунда;
- елементарний заряд e дорівнює $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ кулонів;
- стала Больцмана k становить рівно $1,380\ 658\ 367 \times 10^{-23}$ Джоуль/Кельвін;
- стала Авогадро N_A становить рівно $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ обернених молей;
- світлова ефективність K_{cd} монохроматичного випромінювання частоти 540×10^{12} Гц складає рівно 683 люмена на Ват.

Примітка: X являє невідомі остаточно цифри.

Більше інформації на сайті: www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/



“ Аудиторії

Охоплено широку аудиторію, яка зацікавлена в *SI*. Ми пропонуємо Вам взяти до уваги такі групи у Ваших кампаніях з інформування за межами Ваших власних наукових і технічних співтовариств.

Політики і лідери громадської думки

Ключові особи з уряду, наукових кіл, промисловості та за її межами, які є впливовими особами, що формують думку у Вашій країні, в науковому співтоваристві. Ви, ймовірно, знаєте, хто ці люди, і можете інформувати їх безпосередньо.

Вчителі та викладачі

Усі викладачі наукового співтовариства повинні будуть зрозуміти зміни на певному рівні, щоб вони могли поділитися цим зі своїми учнями — можливо, з 14 років. Вчителі часто орієнтуються на професійні органи за своїми ресурсами, які можуть вже включати НМІ. Якщо у Вас немає близьких зв'язків, поспілкуйтеся з Вашими професійними науковими органами.

Загальна і науково зацікавлена громадськість

Буде широка аудиторія наукової громадськості, яка активно читає новини науки. Вони звертатимуться до популярних ЗМІ для отримання інформації, тому переконайтеся, що Ви повідомите відповідну пресу. Спеціалізовані агентства можуть допомогти в цьому, якщо у Вас немає такої підтримки у Вашому НМІ або урядовій організації.

Користувачі *SI*

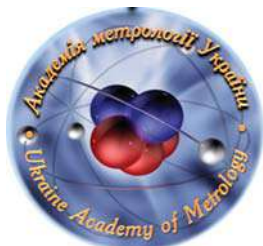
Усі НМІ матимуть співтовариства відомих користувачів – які або напряду працюють з Вами, або побічно – через випробувальні лабораторії або стандарти. Ймовірно, у Вас є списки клієнтів або партнерів, і Ви можете працювати з постачальниками послуг відстеження в країні для спілкування з цими співтовариствами.

АМУ і ДП «Укрметртестстандарт» закликають усі організації та осіб, що складають, на думку авторів Бренд Буку, аудиторію цієї інформаційної кампанії, ознайомитися з документом у цілому, а також з усіма матеріалами за посиланнями *BIPM* і наведе-

ної нижче бібліографії та докласти максимум можливих ресурсів і зусиль для ознайомлення суспільства з переглядом системи *SI* – основи всього матеріального та інформаційного життя суспільства.

Інформаційні посилання

1. До нової міжнародної системи одиниць: перспективи перевизначення і практична реалізація одиниці маси — кілограма. П.І. Неєжмаков, Український метрологічний журнал, 2012, № 3.
2. Брошура *SI* Міжнародного Бюро з Мір і Вагів. 8-а редакція.
3. Основні одиниці *SI* (англ.) на сайті Міжнародного Бюро з Мір і Вагів.
4. www.bipm.org/utis/en/pdf/metre_convention.pdf.
5. Міжнародна система одиниць (*SI*) (англ.) на сайті Національного інституту стандартів і технології (*NIST*).
6. *SI Base Units* (англ.) на сайті *National Physical Laboratory (NPL)*.
7. *BIPM – future revision of the SI* www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/.
8. Proposed redefinition of SI base units — Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Proposed_redefinition_of_Si_base_units



УДК 351.821

ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ, КОМПЕТЕНТНІСТЬ, ДЕМОКРАТИЧНІСТЬ — ОСНОВИ ПОЛІТИКИ ДЕРЖАВИ У СФЕРІ МЕТРОЛОГІЇ ТА МЕТРОЛОГІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Ю. Попруга, заступник директора департаменту технічного регулювання — начальник управління метрології, Мінекономрозвитку України, м. Київ,

Ю. Кузьменко, кандидат технічних наук, заступник генерального директора з метрології, оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки та наукової діяльності,

О. Самойленко, доктор технічних наук, директор науково-виробничого інституту вимірювань геометричних, механічних та віброакустичних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки,

С. Черепков, кандидат технічних наук, директор науково-технічного інституту національної метрологічної служби України,

М. Жалдак, заступник директора науково-технічного інституту національної метрологічної служби України,

С. Проненко, начальник науково-технічного відділу міжнародного співробітництва у сфері метрології,

І. Потоцький, начальник науково-технічного відділу загальної та законодавчої метрології,

С. Ціпоренко, начальник науково-технічного відділу вимірювань маси,

ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Розглянуто бачення основ політики у сфері метрології, закладених у положення Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» і підзаконних актів, зокрема, відносно загальних принципів, застосування еталонної бази, здійснення повірки засобів вимірювальної техніки, калібрування, забезпечення простежуваності результатів вимірювань і калібрувань, розподілу і певного змісту метрологічної діяльності у законодавчо регульованій та добровільній сферах.

The article discusses the policy vision in the metrology field laid down in the provision of Law of Ukraine «On metrology and metrological activity» and regulations, concerning the general principles, use of measurement standards, verification of measuring instruments, calibration, ensure traceability of measurement results and calibrations, distribution and certain content metrological activity in law regulated and voluntary sectors.

Ключові слова: законодавчо регульована метрологія, повірка, калібрування, еталон, простежуваність.

Keywords: legal metrology, verification, calibration, measurement standard, traceability.

Уведення в дію з початку 2016 року нової редакції Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] (Закону), імплементація його разом із сорока підзаконними актами, розробленими в дуже стислі терміни, зумовило велику кількість запитань, а подекуди навіть розгубленість працівників підприємств і організацій, щодо необхідності перегляду і запровадження нових форм та підходів у метрологічній діяльності як у законодавчо регульованій, так і у добровільній сферах. На цьому тлі на шпальтах періодичних видань та у виступах різних начебто експертів, які не мали відношення до розроблення чинної сьогодні нормативної бази, з'явилася низка неадекватних тлумачень і роз'яснень, які суперечать «і духу, і букві Закону».

Зважаючи на зазначене, група фахівців — членів Робочої групи Мінекономрозвитку України з розроблення Закону та авторів проектів прийнятих нормативно-правових актів щодо його імплементації вважає за необхідне висловити, наскільки можливо стисло, бачення основ політики у сфері метрології, закладених у положення Закону та підзаконних актів, зокрема, відносно загальних принципів, застосування еталонної бази, здійснення повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), калібрування, забезпечення простежуваності результатів вимірювань і калібрувань, розподілу і певного змісту метрологічної діяльності у законодавчо регульованій та добровільній сферах.

Головний принцип, закладений у Законі й відповідно у підзаконних актах, суттєво відрізняє

нинішню нормативно-правову базу, на якій базується метрологічна система, від попередньої, побудованої на принципах колишнього СРСР. Основним є демократичність положень Закону в тому розумінні, що Закон і нормативно-правові акти визначають мінімальний «набір» законодавчих вимог до об'єктів та суб'єктів метрологічної діяльності, механізмів реалізації цих вимог. Рішення і дії щодо всього не регламентованого Законом у діяльності підприємств і організацій нині не регулюється державою, а перебуває цілком у компетенції й сфері відповідальності власників, користувачів ЗВТ, вимірювальних, калібрувальних та, в певних аспектах, повірочних лабораторій тощо. Держава наділила підприємства, установи та організації значно більшими повноваженнями і відповідальністю за достовірність результатів вимірювань у себе ніж було до цього. Фактично законодавчо регульована сфера обмежується лише 80 категоріями ЗВТ, які застосовуються у найбільш соціально критичних сферах суспільного життя, таких як: охорона здоров'я, екологія, безпека, торговельно-комерційні операції тощо. Це повністю відповідає положенням документів Метричної Конвенції, Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML), Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), Міжнародної асоціації з акредитації лабораторій (ILAC), принципам побудови метрологічного законодавства і практиці країн Європейського Союзу та провідних країн світу.

Відносити ЗВТ до законодавчо регульованих чи ні?; надавати їх на повірку або калібрування?; здійснювати калібрування ЗВТ силами своєї організації й якщо так, то на яких засадах?; акредитовувати вимірювальну, випробувальну або калібрувальну лабораторію, чи ні?; в яких діапазонах і з якою невизначеністю замовляти калібрування й у кого? — вирішення цих і багатьох інших питань метрологічного забезпечення відносяться цілком до компетенції підприємств, організацій, відомств, а рішення приймаються виключно на їх розсуд і під їх відповідальність.

Наведений головний принцип побудови нормативно-правової бази метрологічної системи України зумовив визначення основних понять Закону і постановити регламентацію цих понять, структур і механізмів, їх втілення у метрологічну практику. Тому далі фахівцям підприємств представлено бачення щодо змісту і сенсу певних положень законодавства.

ЕТАЛОНИ

Законом не віднесено до сфери законодавчого регулювання такої вельми важливої, але специфіч-

ної категорії ЗВТ, як еталони. Це повністю відповідає практиці всіх без винятку країн ЄС, США, Японії, Австралії, інших країн, принципам Міжнародного Комітету з мір і вагів (CIPM), його Угоди «Про взаємне визнання національних еталонів, сертифікатів калібрувань та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами» (CIPM MRA) [2]. Закон регламентує визначення еталона у загальному сенсі: «еталон — реалізація визначення певної величини із встановленим значенням величини та пов'язаною з ним невизначеністю вимірювання, що використовується як основа для порівняння». Також регламентує визначення тих видів еталонів, що мають особливе і суттєве значення для державної політики у сфері метрології залежно від статусу еталона з фізичної, методологічної й процесуальної точок зору на національному і міжнародному рівнях:

«первинний еталон — еталон, установлений із використанням первинної референтної методики вимірювань або створений як артефакт, обраний за угодою;

вторинний еталон — еталон, установлений шляхом калібрування за первинним еталоном для величини того самого роду»;

«Національним еталоном вважається еталон, визнаний центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, як основа для передавання значень величини іншим еталонам відповідної одиниці величини, що є в державі».

Поняття «робочий еталон», хоча воно і не визначено наявною редакцією Закону, потрібно розуміти як будь-який еталон, що застосовується для повірки та/або калібрування ЗВТ, незалежно від рівня його точності та/або статусу в ієрархічних схемах, оскільки не передбачено «розрядності» еталонів або будь-якої відмінності, «категорійності» еталонів за їх застосування в повірці або калібруванні ЗВТ. Це поняття визначено в Документах Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML) і, очевидно, розумно було б внести його до Закону в порядку змін до останнього.

Законодавство не передбачає повірки еталонів. Це впливає із визначення повірки, її сенсу та форм представлення і застосування результатів. *Еталони будь-якої точності повинні піддаватися калібруванню.* Визначення вторинного еталона прямо стосовно цього свідчить: «вторинний еталон — еталон, установлений шляхом калібрування за первинним еталоном для величини того самого роду». Еталони є засобами передавання

одиниць від первинних еталонів до робочих ЗВТ у такий спосіб, щоби забезпечувалася простежуваність результатів вимірювань до одиниць *SI*: «**метрологічна простежуваність** (простежуваність) — власність результату вимірювань, яка полягає в тому, що цей результат може бути пов'язаний з еталоном через задокументований нерозривний ланцюг калібрувань, кожне з яких робить свій внесок у невизначеність вимірювання» (пункт 3 статті 1 Закону). Застосування процедур і форм представлення повірки еталонів у концепції порівняння похибок з нормами їх допустимих значень неприйнятно. Сумніви, що висловлюються стосовно ускладнень у процесі виконання повірки ЗВТ за каліброваними еталонами з приписаною еталонам невизначеністю, не мають підстав. Це знайшло відображення у нормативно-правовому акті «Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів», затвердженому наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України № 193 від 08.02.2016, зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 24.02.2016 за № 278/28408: «Для еталонів, які застосовують під час проведення повірки, обов'язково наводяться **граничні значення невизначеностей вимірювань**, які повинні забезпечувати ці еталони. Співвідношення між **невизначеністю вимірювань**, що забезпечує еталон, та максимально допустимою похибкою ЗВТ, що підлягає повірці, становить не менше ніж один до трьох».

«**Еталони повинні бути калібровані** з дотриманням міжкалібрувальних інтервалів, а стандартні зразки повинні мати встановлені значення властивостей з відповідними **невизначеностями результатів вимірювань та простежуваністю** відповідно до ДСТУ-Н *ISO Guide 35* [3], супроводжуючи їх документами відповідно до ДСТУ-Н *ISO Guide 31* [4], з чинними строками застосування. **Простежуваність еталонів** повинна бути **документально підтверджена сертифікатами калібрування**». Те положення, що еталони потрібно калібрувати, а не повіряти, міститься й у нормативно-правовому акті «Критерії, яким повинні відповідати наукові метрологічні центри, державні підприємства, які належать до сфери управління Мінекономрозвитку України та провадять метрологічну діяльність, та повірочні лабораторії, які уповноважуються або уповноважені на проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації», затвердженому наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України № 1192 від 23.09.2015, зареєстрованим у Міністерстві юстиції

України 07.10.2015 за № 1213/27658: «**Документи, що підтверджують результати калібрування еталонів** та засвідчують метрологічні та технічні характеристики ЗВТ і допоміжного обладнання, повинні зберігатися протягом усього періоду використання цих еталонів, ЗВТ та обладнання».

ПОВІРКА ЗВТ

Повірка є принципово сукупністю процедур законодавчо регульованої сфери метрології. Її об'єкти і суб'єкти у законодавчо регульованій сфері чітко визначені Законом у статті 17.

Об'єкти — частина перша: «1. Законодавчо регульовані засоби вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, підлягають періодичній повірці та повірці після ремонту.

Не підлягають періодичній повірці та повірці після ремонту законодавчо регульовані засоби вимірювальної техніки, що застосовуються:

** органами з оцінки відповідності (у тому числі випробувальними та калібрувальними лабораторіями), акредитованими Національним органом України з акредитації чи національними органами з акредитації інших держав, для провадження діяльності, стосовно якої їх було акредитовано;*

** науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами та калібрувальними лабораторіями, які проводять калібрування засобів вимірювальної техніки відповідно до частини другої статті 27 цього Закону, стосовно засобів вимірювальної техніки, що використовуються ними при калібруванні.»*

Суб'єкти — частина п'ята: «5. Повірка законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, проводиться:

• науковими метрологічними центрами, які мають міжнародно визнані калібрувальні та вимірювальні можливості за відповідними видами та підвидами вимірювань, та/або із застосуванням національних еталонів;

• науковими метрологічними центрами, метрологічними центрами та повірочними лабораторіями, уповноваженими на проведення повірки відповідних засобів.»

Останнє особливо важливо, оскільки Закон у такий спосіб однозначно визначає, що повірка будь-якою організацією, що не є науковим метрологічним центром, визначеним Кабінетом Міністрів України, є юридично правомочною лише за умови, що ця організація уповноважена належним чином. Закон у частині першій статті 18 однозначно визначає, ким повинна уповноважуватися будь-яка

організація на проведення повірки ЗВТ: «1. Органом з уповноваження на проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, є центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності». Уповноваження здійснюється на основі вимог нормативно-правового акта «Критерії, яким повинні відповідати наукові метрологічні центри, державні підприємства, які належать до сфери управління Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та провадять метрологічну діяльність, та повірочні лабораторії, які уповноважуються або уповноважені на проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації».

Ні про які повірки «для власних потреб» лабораторіями, призначеними керівництвом підприємства, як це пропонується в окремих «роз'яснювальних» публікаціях, мова йти не може!

Потрібно особливо підкреслити, що зазначене у частині сьомій статті 17 Закону положення «7. Повірка засобів вимірювальної техніки, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології та перебувають в експлуатації, проводиться на добровільних засадах» визначає саме повірку в **повному обсязі вимог** до того, хто її здійснює і в якому порядку. Автори вважають, що повірка законодавчо нерегульованих ЗВТ допускається як рідкий виняток, оскільки є доволі суперечливим як у частині застосування для цього методик повірки, так і у відношенні оформлення результатів. Справа в тому, що нормативно-правовий акт «Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів» визначає, що:

«3. Повірку ЗВТ проводять згідно з методиками повірки, які містяться в нормативно-правових актах або національних стандартах.

4. Методики повірки розробляються з урахуванням міжнародних нормативних документів та/або європейських стандартів.

5. Наукові метрологічні центри розробляють методики повірки та подають до Мінекономрозвитку пропозиції щодо їх затвердження.

Методики повірки, які містяться в національних стандартах, розробляються за участю наукових метрологічних центрів, а оформлення позитивних результатів повірки передбачено лише як «Свідоцтво про повірку законодавчо регульованого ЗВТ».

Суттєво, що Законом визначено контроль за дотриманням уповноваженими повірочними лабора-

торіями критеріїв уповноваження: частина дев'ята статті 18: «9. Центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, проводить моніторинг відповідності уповноважених організацій вимогам цього Закону та критеріям, яким вони повинні відповідати, і приймає рішення щодо анулювання свідоцтва про уповноваження, якщо вони не виконують своїх обов'язків, визначених цим Законом».

КАЛІБРУВАННЯ ЗВТ

Часто-густо у листах підприємств і організацій, від учасників семінарів, конференцій тощо звучать запитання на кшталт: «Якими повинні бути повноваження калібрувальної лабораторії?», «Чи може підприємство калібрувати свої ЗВТ для власних потреб?», «Чи потрібно взагалі калібрувати ЗВТ, що експлуатуються поза законодавчо регульованою сферою?», «Як розрахувати міжкваліфікаційний інтервал?», «Чи можна використовувати як еталони ЗВТ, що пройшли повірку?» і багато інших подібних. Не маючи на меті надати загальне описання процедур калібрування, автори вважають доцільним висловити своє бачення лише щодо окремих аспектів цієї діяльності.

У Законі наведено визначення калібрування, що повністю автентичне міжнародному: «калібрування — сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу».

Суттєво: калібрування — це порівняння двох вимірювань, не приладів. Тобто, одного вимірювання, виконаного з використанням пристрою з відомим розміром або правильністю, та другого вимірювання, виконаного другим пристроєм. Пристрій з відомою або приписаною правильністю вважається еталонем (*standard*), а другий пристрій — об'єктом випробувань (*unit under test*).

Отже, можна зробити висновок, що еталони, які застосовуються для калібрування, повинні бути калібровані, оскільки саме під час калібрування еталонів їм приписуються невизначеності відтворюваних значень.

При тому, що калібрування ЗВТ принципово не є предметом законодавчого регулювання, Закон статтею 27 визначив, хто саме і на якій основі може

здійснювати калібрування: «Стаття 27. Калібрування засобів вимірювальної техніки

1. Калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології.

2. Калібрування засобів вимірювальної техніки проводиться:

науковими метрологічними центрами;

метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, акредитованими Національним органом України з акредитації;

метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, які мають документально підтвержену простежуваність своїх еталонів до національних еталонів, еталонів інших держав або міжнародних еталонів відповідних одиниць вимірювання.

Положення частини другої статті 27 кореспондуються з положеннями документа *ILAC P10 «ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results»* — «Політика ILAC щодо простежуваності результатів вимірювань» [5], а саме, третій абзац частини другої, статті 27 Закону аналогічний пункту 3b розділу 5 Документа *ILAC P10*:

«3b) A calibration laboratory whose service is suitable for the intended need but not covered by the ILAC Arrangement or by Regional Arrangements recognised by ILAC. In these cases the accreditation body shall establish a policy to ensure that those services meet the relevant criteria for metrological traceability in ISO/IEC 17025:2005» (у перекладі буквально означає: «Калібрувальна лабораторія, чий сервіс відповідає призначенню, але не покритий Угодою ILAC або Регіональною Угодою, що визнається ILAC. У цих випадках орган з акредитації встановлює політику для забезпечення задоволення цим сервісом критеріїв метрологічної простежуваності в *ISO/IEC 17025:2005*). У цьому положенні ILAC політика органу з акредитації згадується не відносно саме калібрувальної лабораторії, а відносно випробувальної (вимірювальної) лабораторії, що використовує результати вимірювань засобом, каліброваним калібрувальною лабораторією. Проблема може виникнути для випробувальної лабораторії (самостійної підприємства), чиї або у складі результати, з того чи іншого приводу, розглядатимуться Європейськими експертами (саме Європейськими) щодо доведеності їх простежуваності. Питання в тому, що ILAC є всесвітньою організацією, а Європейська Асоціація з акредитації, ЄА у своїх рекомендаціях встановлює значно жорсткіші вимоги, які зводяться до норми, що відповідає

першим двом критеріям статті 27 Закону, і у спрощеному вигляді звучить так: для того, щоби вважати простежуваність калібрувань доведеною, будь-яка калібрувальна лабораторія, включаючи наукові метрологічні центри, повинна або бути підписантом Угоди *CIPM MRA* [2] і мати визнання у базі даних Міжнародного бюро з мір і вагів (так звані *СМС*), або бути акредитованою національним органом з акредитації, учасником Угоди *ILAC* [6]. Були непоодинокі випадки, коли Європейські експерти не визнавали доведеність простежуваності результатів вимірювань ЗВТ, каліброваних неакредитованою лабораторією, що не є науковим метрологічним центром.

Необхідно особливо відзначити, що, за умов дії чинного на сьогодні законодавства, *засадами для здійснення калібрування не можуть бути свідцтва про уповноваження «на здійснення перевірки (калібрування)»*, видані до набрання чинності Закону. Розділ X «Прикінцеві та перехідні положення» Закону у пункті частині 4 пролонгує право лише перевірки ЗВТ до кінця строку дії свідцтва: «4. Свідцтва про уповноваження на проведення перевірки засобів вимірювальної техніки, видані в установленому порядку до набрання чинності цим Законом, **чинні в частині права проводити перевірку законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки**, що перебувають в експлуатації, протягом визначеного в таких свідцтвах строку дії».

КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ НА ПІДПРИЄМСТВАХ (У ЛАБОРАТОРІЯХ)

Більшість запитань, що виникають у працівників лабораторій і підприємств перш за все *стосовно поводження із законодавчо нерегульованими ЗВТ*, зумовлені прагненням пересвідчитися, що отримуються достатньо точні та надійні результати вимірювань. Цілком природно, що, для здійснення контролю якості вимірювань, підприємства та лабораторії замовляють метрологічні послуги сторонніх організацій у виді калібрувань чи як виняток перевірки законодавчо нерегульованих ЗВТ або прагнуть реалізувати внутрішній контроль точності ЗВТ. Це цілком слушно і корисно для підприємства, оскільки є одним із основних критеріїв визначення та коригування, наприклад, міжкалібрувальних інтервалів. Але, *організуючи і здійснюючи процедури внутрішнього контролю точності ЗВТ, не потрібно намагатися називати це перевіркою або калібруванням* із причин, описаних вище, навіть якщо з технічної сторони ці процедури тотожні. І перевірка, і калібрування є офіційними формалізованими процедурами з певним регламентованим оформленням.

Зокрема, оформлення результатів калібрувань, якщо вони виконуються офіційно на визнаних засадах, повинно повністю відповідати вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025 [7], а форма і зміст свідоцтва про калібрування повинні бути визначені документами регіональної міжнародної організації COOMET, членом якої є Україна, і відповідно сертифікати всіх калібрувань повинні відповідати цій формі.

На заключення варто зауважити, що автори намагалися, за можливості стисло, висвітлити, які саме, хоча й далеко не всі, аспекти державної політики у сфері метрології були закладені у зміст чинного Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та підзаконні акти на його імплементацію. І хотілося б попередити, що намагання провести аналогії з нормами і процедурами старої радянської й пострадянської, жорстко регульованої та централізованої метрологічної системи і втиснути сучасну метрологічну діяльність у старі, хоча й привабливо знайомі, рамки хибно і безперспективно. Треба діяти в новій демократичній манері, коли власник і користувач ЗВТ самі по собі приймають зважені й обґрунтовані рішення і відповідають перед Законом, особисто і своїм бізнесом.

ВИСНОВКИ

Зважаючи на наведені вище обґрунтування, викладемо основні практичні висновки у стислій формі:

1. Еталони, незалежно від сфери їх застосування, **калібруються** національними метрологічними центрами або акредитованими Національним агентством з акредитації України калібрувальними лабораторіями.

2. Підставою для здійснення робіт з калібрування за ДСТУ ISO/IEC 17025 [7] є виключно наявність відповідних СМС рядків у базі даних ВІРМ за видами (підвидами) вимірювань або акредитація Національним агентством України з акредитації у певній сфері.


3. Уповноваження на право повірки ЗВТ не є підставою для здійснення діяльності з калібрування еталонів та ЗВТ.

4. Повірку законодавчо регульованих ЗВТ та добровільну повірку здійснюють виключно організації, уповноважені Мінікономрозвитку України на цей вид діяльності.

5. Підприємства та організації, **під свою відповідальність**, на підставі чинного законодавства у сфері метрології та інших сферах, приймають рішення щодо повірки ЗВТ та калібрування тих чи інших еталонів або ЗВТ.

6. Організацію метрологічного забезпечення вимірювань та випробувань, що не входять до сфери законодавчо регульованої метрології, підприємства та організації здійснюють самостійно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», 2016, № 6, С. 7.
2. CIPM MRA «Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes» (Про взаємне визнання національних еталонів та сертифікатів калібрувань та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами) <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-text/>.
3. ISO Guide 35:2006 Reference materials — General and statistical principles for certification (Стандартні зразки. Загальні та статистичні принципи атестації).
4. ДСТУ-Н ISO Guide 31:2008 Метрологія. Стандартні зразки. Зміст сертифікатів і етикеток (ISO Guide 31:2000, IDT).
5. ILAC P10 «ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results» («Політика ILAC щодо простежуваності результатів вимірювань»).
6. ILAC Mutual Recognition Arrangement (Багатостороння угода про взаємне визнання).
7. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. 

Отримано / received: 23.05.2017.

УДК 53.089.68:621.317.335.2

МІЖНАРОДНІ КЛЮЧОВІ ТА ДОДАТКОВІ ЗВІРЕННЯ У РАМКАХ КООМЕТ НАЦІОНАЛЬНИХ ЕТАЛОНІВ ОДИНИЦЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ

О. Величко, доктор технічних наук, директор науково-виробничого інституту,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Розглянуто основні результати міжнародних ключових і додаткових звірень національних еталонів одиниць електричної ємності на частотах 1 кГц і 1,592 кГц у рамках проекту КООМЕТ 345/UA/05 (COOMET.EM-K4, COOMET.EM-S4). Звірення, пілотною лабораторією яких було ДП «Укрметртестстандарт», проведені за участю національних метрологічних інститутів України, Німеччини, Японії, Болгарії, Російської Федерації, Казахстану та Білорусі протягом 2006—2009 років.

In the article the basic results of international key and supplementary comparisons of national standards of unit of capacitance at frequencies of 1 kHz and 1.592 kHz are considered within the framework of project of COOMET 345/UA/05 (COOMET.EM-K4, COOMET.EM-S4). Comparison is conducted with participation of national metrology institutes of Ukraine, Germany, Japan, Bulgaria, Russia, Kazakhstan and Belarus during 2006 — 2009 and the pilot laboratory of comparison was SE «Ukrmetrteststandard».

Ключові слова: національний еталон; ключове звірення; додаткове звірення; національний метрологічний інститут; пілотна лабораторія; ємність.

Keywords: national standard; key comparison; supplementary comparison; national metrology institute; pilot laboratory; AC voltage; capacitance.

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

Міжнародні звірення національних еталонів одиниці електричної ємності проводилися у рамках проекту КООМЕТ 345/UA/05 (COOMET.EM-K4, COOMET.EM-S4) [7] протягом (2006—2009) років, пілотною лабораторією було ДП «Укрметртестстандарт». У звірваннях взяли участь національні метрологічні інститути (НМІ) України, Німеччини, Японії, Болгарії, Російської Федерації, Казахстану та Білорусі. НМІ-учасники такі: ДП «Укрметртестстандарт» (UMTS, Україна); PTB (Німеччина); NMIJ/AIST (Японія); BIM (Болгарія); VNIIM (Росія Федерація); KazInMetr (Казахстан); BelGIM (Білорусь).

Ці звірення проводилися між НМІ-учасниками, які представляють три РМО: КООМЕТ (UMTS, VNIIM, KazInMetr, BelGIM), EURAMET (PTB, BIM) і APMP (NMIJ/AIST). Пілотна лабораторія забезпечила НМІ-учасників звірень еталонем передавання (ЕП), досліджувала його дрейф протягом всього часу проведення звірень, розробила і виконувала графік проведення звірень, збирала й аналізувала отримані дані зрівнянь, підготувала попередній і заключний звіт тощо [8, 9].

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



© Величко О., 2017



Рис. 1. Державний первинний еталон України одиниць електричної ємності й фактора втрат
 Fig. 1. National Primary Standard of Ukraine of the unit of capacitance and loss factor

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

Для проведення звірень обрано ЕП *Andeen-Hagerling* модель *АН11А*, з номінальними значеннями мір ємностей 10 пФ і 100 пФ, які вмонтовано в один корпус *АН1100*. Цей ЕП належить ДП «Укрметртестстандарт» і входить до складу еталона ДЕТУ 08-06-01. Він забезпечує контроль критичних параметрів терморегулювання, а кожна міра ємності *АН11А* ЕП має вбудований термостат з подвійною системою термостатування [8, 9].

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

- стабільність, краща ніж 0,3 ppm/рік;
- температурний коефіцієнт ємності, менший від 0,01 ppm/°C;
- загальний гістерезис від температурних циклів, менший від 0,05 ppm;
- загальний гістерезис від механічних впливів, менший від 0,05 ppm;
- коефіцієнт змінної напруги, менший від 0,003 ppm/V;
- коефіцієнт постійної напруги, менший від 0,0001 ppm/V;
- чутливість на зміну напруги живлення, менша від 0,0003 ppm на 1 % зміни;
- фактор втрат, менший від 0,000003 tgδ;
- робочі діапазони напруг: (85—115) В, (102—138) В, (187—253) В, (204—276) В (середньоквадратичні значення, СКЗ);
- частоти напруги живлення: від 48 до 440 Гц;
- робочий діапазон температур: від 10 до 40 °C;
- робочий діапазон відносної вологості повітря: від 0 до 85 %.

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

Вимірювання НМІ-учасниками виконувалися за таких умов:

- температура: $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$;
- відносна вологість повітря: між 30 і 70 %;
- вимірювальні частоти: 1 і 1,592 кГц;
- вимірювальна напруга для обох номіналів мір ємності: 100 В (СКЗ).

ДП «Укрметртестстандарт» (*UMTS*) як пілотна лабораторія систематично здійснювало вимірювання для визначення часового дрейфу ЕП для номіналів мір ємностей 10 і 100 пФ на частотах 1 і 1,592 кГц. 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.

2. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЗВІРЕНЬ ЕТАЛОНІВ

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

- ♦ інформацію стосовно дат вимірювань;
- ♦ значення вимірювальної частоти та напруги для обох номіналів мір ємності;
- ♦ вимірені значення ємностей з відповідними бюджетами невизначеності вимірювань;
- ♦ значення температури та відносної вологості повітря навколишнього середовища.

Простежуваність до одиниць *SI* національного еталона кожного НМІ-учасника надавалася пілотній лабораторії [2, 8, 9].

Для проведених звірень простежуваність національних еталонів НМІ-учасників така:

- * еталони *PTB* і *VNIIM* — до первинного еталона одиниці ємності (*Calculable Capacitor*);
- * еталон *BIM* — до первинного еталона одиниці ємності *PTB* (*Calculable Capacitor*);
- * еталони *KazInMetr* і *BelGIM* — до первинного еталона одиниці ємності *VNIIM* (*Calculable Capacitor*);
- * еталон *UMTS* — до первинного еталона одиниці опору *PTB* на основі квантового ефекту Холла (*Quantum Hall Resistance*);
- * еталон *NMIJ/AIST* — до первинного еталона одиниці опору на основі квантового ефекту Холла (*Quantum Hall Resistance*).

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

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

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

▲ невизначеності первинного еталона або іншого еталона, які використовувалися під час дослідження ЕП;

▲ невизначеності необхідних для НМІ різноманітних коригувань вимірених значень ємностей;

▲ додаткові специфічні для НМІ складові невизначеності вимірювань.

Відхилення отриманих значень ємностей (δC_i) для НМІ-учасників обох звірень від номінальних значень відповідно 10 пФ (COOMET.EM-K4) і 100 пФ (COOMET.EM-S4) на частотах 1 і 1,592 кГц з їх стандартними невизначеностями (u_{ci}) представлено у табл. 1 [8, 9].

Опорне значення звірень x_{ref} , отримане як середнє всіх значень НМІ-учасників обох звірень за виразом:

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

з відповідною стандартною невизначеністю

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

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

Розраховані значення опорних значень з їх розширеними невизначеностями становили:

$$x_{ref} = -0,131 \text{ мкФ/Ф}, U_{ref} = 0,219 \text{ мкФ/Ф} \quad (k = 2)$$

для 10 пФ на частоті 1 кГц;

$$x_{ref} = -0,219 \text{ мкФ/Ф}, U_{ref} = 0,102 \text{ мкФ/Ф} \quad (k = 2)$$

для 10 пФ на частоті 1,592 кГц;

$$x_{ref} = 0,662 \text{ мкФ/Ф}, U_{ref} = 0,231 \text{ мкФ/Ф} \quad (k = 2)$$

для 100 пФ на частоті 1 кГц;

$$x_{ref} = 0,681 \text{ мкФ/Ф}, U_{ref} = 0,100 \text{ мкФ/Ф} \quad (k = 2)$$

для 100 пФ на частоті 1,592 кГц.

Ступінь еквівалентності еталона i -го НМІ та їх розширені невизначеності у сенсі опорного значення звірень визначалися за виразами:

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

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

Таблиця 1. Відхилення від номінального значення для НМІ-учасників обох звірень з їх розширеними невизначеностями, мкФ/Ф

Table 1. Deviation at nominal value for NMI-participants both comparisons with its expanded uncertainties, $\mu F/F$

НМІ	10 пФ				100 пФ			
	1 кГц		1,592 кГц		1 кГц		1,592 кГц	
	δC_i	u_{ci}	δC_i	u_{ci}	δC_i	u_{ci}	δC_i	u_{ci}
BIM	0,300	1,160	–	–	1,000	6,050	–	–
PTB	0,033	0,208	–0,300	0,060	0,600	0,195	0,650	0,060
VNIIM	–0,190	0,182	–0,230	0,190	0,550	0,204	0,500	0,210
NMIJ/AIST	–	–	0,100	0,122	–	–	0,815	0,106
KazInMetr	–0,540	0,352	–	–	0,500	0,420	–	–
UMTS	–0,080	0,220	–0,025	0,350	0,940	0,230	0,750	0,350
BelGIM	–0,230	1,100	–0,280	1,100	1,034	2,030	1,223	2,030

Таблиця 2. Ступені еквівалентності еталонів НМІ-учасників обох звірень з їх розширеними невизначеностями, мкФ/Ф

Table 2. Degrees of equivalence standards for NMI-participants both comparisons with its expanded uncertainties, $\mu F/F$

НМІ	10 пФ				100 пФ			
	1 кГц		1,592 кГц		1 кГц		1,592 кГц	
	D_i	$U(D_i)$	D_i	$U(D_i)$	D_i	$U(D_i)$	D_i	$U(D_i)$
BIM	0,430	2,310	–	–	0,338	12,098	–	–
PTB	0,164	0,354	–0,081	0,063	–0,065	0,314	–0,031	0,066
VNIIM	–0,059	0,291	–0,011	0,366	–0,113	0,337	–0,181	0,408
NMIJ/AIST	–	–	0,318	0,221	–	–	0,134	0,187
KazInMetr	–0,409	0,669	–	–	–0,163	0,808	–	–
UMTS	0,051	0,382	0,194	0,692	0,278	0,398	0,069	0,693
BelGIM	–0,099	2,189	–0,061	2,198	0,372	4,053	0,542	4,059

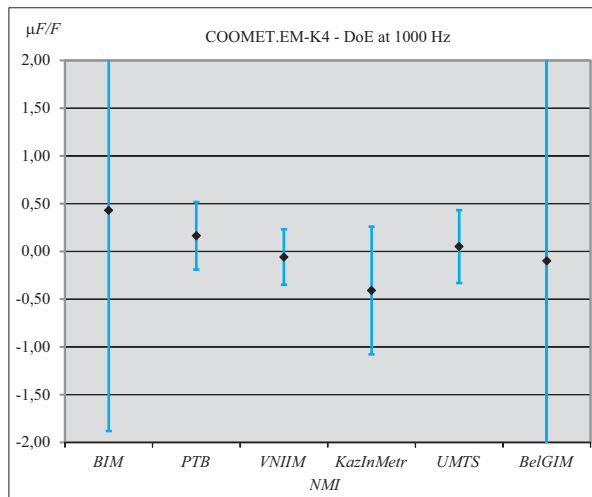


Рис. 2. Ступінь еквівалентності для НМІ-учасників для 10 пФ на частоті 1 кГц

Fig. 2. Degree of equivalence for NMI-participants for 10 pF at frequency 1 kHz

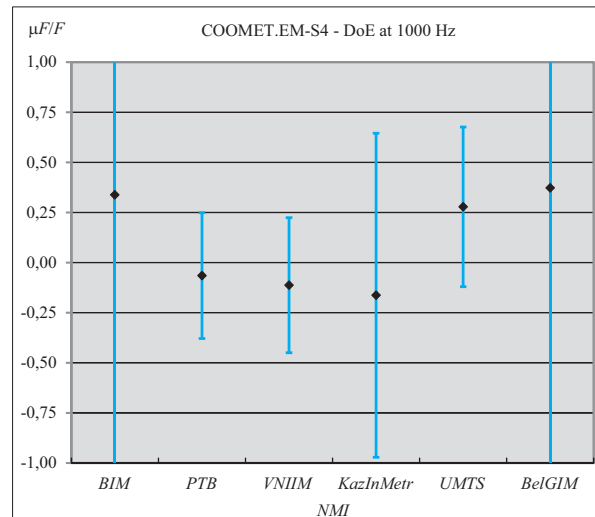


Рис. 4. Ступінь еквівалентності для НМІ-учасників для 100 пФ на частоті 1 кГц

Fig. 4. Degree of equivalence for NMI-participants for 100 pF at frequency 1 kHz

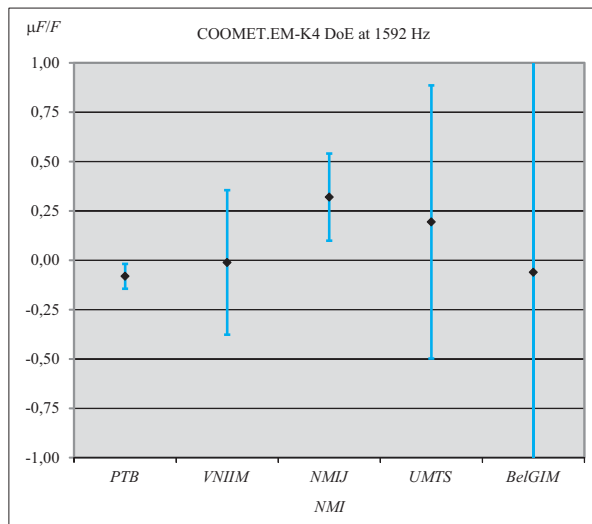


Рис. 3. Ступінь еквівалентності для НМІ-учасників для 10 пФ на частоті 1,592 кГц

Fig. 3. Degree of equivalence for NMI-participants for 10 pF at frequency 1,592 kHz

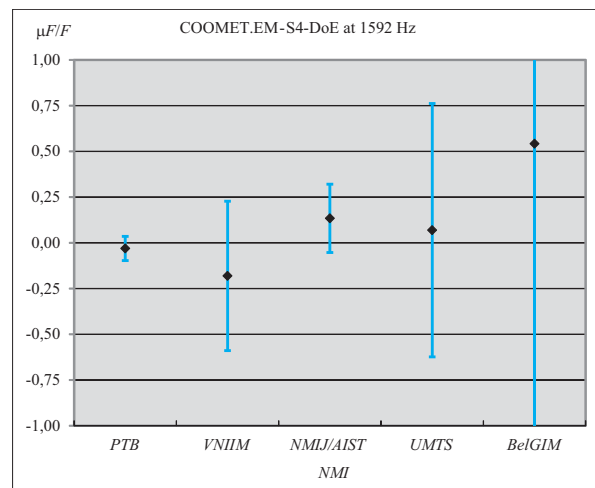


Рис. 5. Ступінь еквівалентності для НМІ-учасників для 100 пФ на частоті 1,592 кГц

Fig. 5. Degree of equivalence for NMI-participants for 100 pF at frequency 1,592 kHz

Заявлені невизначеності НМІ-учасників повинні задовольняти нерівності

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

Ступені еквівалентності еталонів НМІ-учасників обох звірень з їх розширеними невизначеностями ($k = 2$) для 10 і 100 пФ на частотах 1 і 1,592 кГц у сенсі опорного значення відповідного звірення наведені у табл. 2 і на рис. 2—5 [8, 9].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ПОГОДЖЕНОСТІ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗВІРЕНЬ

Розраховано значення χ^2 критерію (табл. 3) для отриманих результатів звірень еталонів НМІ-учасників з урахуванням їх невизначеностей вимірювань

($\{x_i, u(x_i)\}$, $i = 1, \dots, N$) за виразом [11, 12]:

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

Значення критеріїв χ^2 для звірень COOMET.EM-K4 і COOMET.EM-S4 не перевищує критичних значень з рівнем охоплення 0,95 за нерівністю:

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

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

Таблиця 3. Отримані значення для критерію χ^2 для номіналів ємностей 10 і 100 пФ на частотах 1 і 1,592 кГц

Table 3. The got values for a criterion χ^2 for nominal of capacitance 10 and 100 pF at frequencies 1 and 1,592 kHz

Частота, кГц	Ємність, пФ	χ^2	$\chi_{0,95(N-1)}^2$
1	10	2,74	11,07 (N = 6)
1,592		7,09	7,81 (N = 4)
1	100	2,77	11,07 (N = 6)
1,592		3,93	9,49 (N = 5)

4. ПРИВ'ЯЗКА РЕЗУЛЬТАТІВ КЛЮЧОВИХ ЗВІРЕНЬ COOMET.EM-K4 ДО РЕЗУЛЬТАТІВ КЛЮЧОВИХ ЗВІРЕНЬ CCEM-K4

Пілотною лабораторією запропоновано здійснити прив'язку результатів ключових звірень COOMET.EM-K4 до результатів ключових звірень CCEM-K4 на частоті 1,592 кГц за такою методикою.

Ступені еквівалентності еталонів *i*-го НМІ-учасника в контексті опорного значення ключових звірень CCEM-K4 розраховуються як

$$d_i = D_i + \Delta, \tag{8}$$

де: d_i — найкраща оцінка результатів для *i*-го НМІ для прив'язки до звірень CCEM-K4; D_i — результат у звірнях COOMET.EM-K4 для НМІ-учасників, які брали участь лише у звірнях COOMET.EM-K4; Δ — адитивна поправка для результатів звірень НМІ.

Результати досліджень ЕП для *i*-го НМІ розраховуються через результати зв'язувальних НМІ:

$$\Delta_{iLINK} = d_{iLINK} - D_{iLINK} \tag{9}$$

де: d_{iLINK} — результат звірень CCEM-K4 для зв'язувального НМІ; D_{iLINK} — результат звірень COOMET.EM-K4 для зв'язувального НМІ.

Адитивна поправка розраховується як середнє зважене оцінок зв'язувальних НМІ за формулою [11]:

$$\Delta = \sum_{iLINK} w_{iLINK} \Delta_{iLINK}, \tag{10}$$

де: d_{iLINK} — результати звірень CCEM-K4 для зв'язувальних НМІ; D_{iLINK} — результати звірень COOMET.EM-K4 для зв'язувальних НМІ;

$$w_{iLINK} = \frac{s^2(\Delta)}{s^2(\Delta_{iLINK})}, s^2(\Delta) = \frac{1}{\left(\sum_{iLINK} \frac{1}{s^2(\Delta_{iLINK})}\right)}. \tag{11}$$

Невизначеність $s(\Delta_{iLINK})$, пов'язана з Δ_{iLINK} , розраховується як квадратний корінь із суми квадратів невизначеностей передавання звірень CCEM-K4; $u_r = 0,02$ мкФ/Ф — це невизначеність передавання звірень COOMET.EM-K4; $u(p_i) \approx 0,076$ — це невизначеність, пов'язана з недостатньою відтворюваністю результатів зв'язувальних НМІ у період між двома вимірюваннями у рамках звірень CCEM-K4 і COOMET.EM-K4; r_{iLINK} взято для даних PTB і VNIIM із табл. 4, в якій наведено параметри прив'язки результатів ключових звірень CCEM-K4 і COOMET.EM-K4 з їх розширеними невизначеностями для зв'язувальних НМІ на частоті 1,592 кГц.

Зв'язувальними НМІ у ключових звірнях COOMET.EM-K4 є PTB і VNIIM, які були учасниками ключових звірень CCEM-K4. Ніяких змін у методах вимірювань не відбулося за час між звірнями CCEM-K4 і COOMET.EM-K4 для PTB, а для VNIIM у 2003 році була здійснена спеціальна корекція значення одиниці ємності для результату звірень CCEM-K4.

Розрахована зв'язувальна корекція $\Delta = 0,107$ мкФ/Ф зі стандартною дев'ятією $s(\Delta) = 0,112$ мкФ/Ф.

Частотний коефіцієнт ємності (1,592 кГц/1 кГц) для частоти 1,592 кГц для BIM і KazInMetr, які здійснювали вимірювання лише на частоті 1 кГц, $\Delta_{f,1592} = -0,088$ мкФ/Ф з розширеною невизначеністю $U(\Delta_{f,1592}) = 0,244$ мкФ/Ф отримано з використанням виразів:

$$\Delta_{f,1592} = x_{ref,1592} - x_{ref,1000}, \tag{12}$$

$$u^2(\Delta_{f,1592}) = u^2(x_{ref,1592}) + u^2(x_{ref,1000}). \tag{13}$$

Ступінь еквівалентності $d_{i,1592}$ на частоті 1,592 кГц з її невизначеністю для BIM і KazInMetr (табл. 5) розраховано з використанням формул:

$$d_{i,1592} = D_{i,1000} + \Delta_{f,1592} + \Delta, \tag{14}$$

$$u^2(d_{i,1592}) = u^2(D_{i,1000}) + u^2(\Delta_{f,1592}) + s^2(\Delta). \tag{15}$$

Таблиця 4. Параметри прив'язки результатів ключових звірень CCEM-K4 і COOMET.EM-K4 з їх розширеними невизначеностями для зв'язувальних НМІ, мкФ/Ф

Table 4. Parameters of linking of results key comparisons CCEM-K4 and COOMET.EM-K4 with its expanded uncertainties for linking NMIs, $\mu F/F$

Зв'язувальний НМІ	d_{iLINK}	D_{iLINK}	Δ_{iLINK}	u_r	$u(p_i)$	r_{iLINK}	$s(\Delta_{iLINK})$	w_{iLINK}
VNIIM	-0,118	-0,099	-0,019	0,020	0,076	0,071	0,162	0,687
PTB	-0,004	-0,169	0,165	0,020	0,076	0,066	0,154	0,726

Таблиця 5. Ступені еквівалентності еталонів НМІ-учасників звірень COOMET.EM-K4 з їх розширеними невизначеностями в контексті опорного значення звірень CCEM-K4, мкФ/Ф

Table 5. Degrees of equivalence of standards for NMI-participants comparisons COOMET.EM-K4 with its expanded uncertainties relative to CCEM-K4 KCRV, $\mu\text{F}/\text{F}$

NMI	$d_{i,1592}$	$U(d_{i,1592})$
BIPM	0,449	3,369
NMIJ/AIST	0,425	0,250
KazInMetr	-0,390	0,747
UMTS	0,301	0,727
BelGIM	0,046	2,212

Найкраща оцінка результатів НМІ-учасника, що брав участь у звіреннях CCEM-K4, розраховується за формулою (8), а відповідна стандартна невизначеність — як

$$u^2(d_i) = u^2(D_i) + u^2(\Delta) = u^2(D_i) + s^2(\Delta) + u^2(m_{ref}), \quad (16)$$

де: $u(m_{ref}) = 0,017$ мкФ/Ф — невизначеність опорного значення звірень CCEM-K4.

Відповідно розширена невизначеність визначається виразом $U(d_i) = k_{d_i} u(d_i)$, де коефіцієнт охоплення $k_{d_i} = 2$ за рівня довіри 95 %.

Задекларовані невизначеності НМІ-учасників повинні задовольняти нерівності:

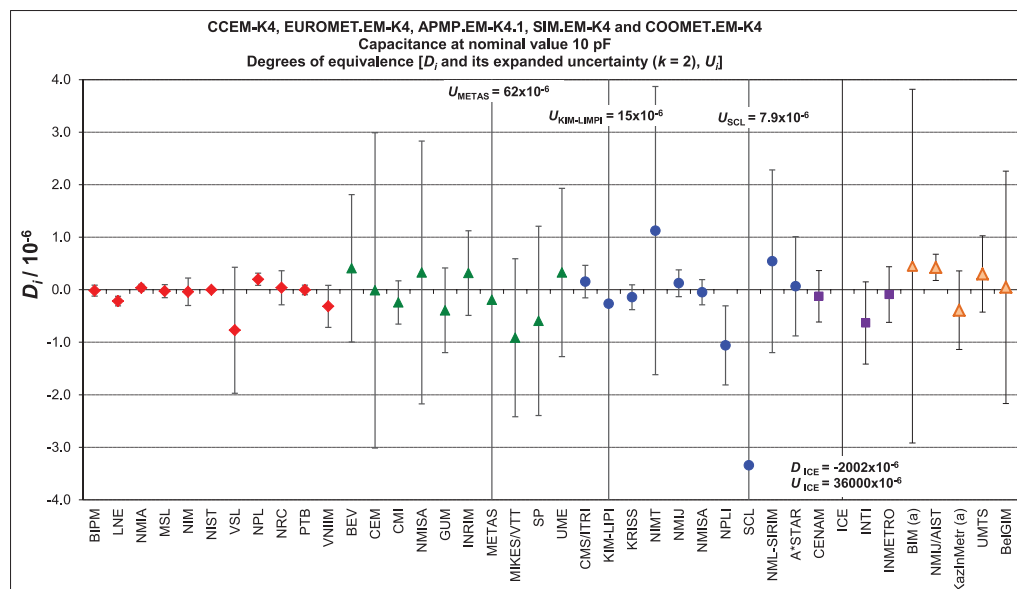
$$|d_i| < 2u_c(d_i). \quad (17)$$

Прив'язку запропонованих ступенів еквівалентності еталонів D_i НМІ-учасників звірень регіональних організацій, в контексті опорного значення ключових звірень CCEM-K4, наведено на рис. 6 [7].

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

У рамках Угоди CIPM MRA калібрувальні й вимірювальні можливості (CMC) визначаються як найвищий рівень вимірювання або калібрування, звичайно пропонується клієнтам НМІ, виражений у значеннях довірчого рівня, що дорівнює 95 %. CMC характеризують якість послуг НМІ з калібрування чи вимірювання, які надаються клієнтам на постійній основі. НМІ видаються відповідні сертифікати калібрування чи вимірювання, які визнаються всіма учасниками Угоди CIPM MRA [13—15].

CMC НМІ країн публікуються у виді pdf-файлів у Додатку С бази даних ключових звірень (KCDB) BIPM у виді таблиць. Приклад таблиці CMC НМІ України для одиниці електричної ємності наведено на рис. 7 [15—17]. Отримані результати звірень за проектами COOMET.EM-K4 і COOMET.EM-S4 підтверджують опубліковані у Додатку С бази даних KCDB BIPM CMC НМІ України (ДП «Укрметртест-стандарт»).



Measurements derived from $R_{k=20}$ for BIPM, LNE and NPL

Red diamonds : participants in CCEM-K4

Blue circles : participants in APMP.EM-K4.1*

a) Measurements made at 1000 Hz

Green triangles : participants in EUROMET.EM-K4*

Purple squares : participants in SIM.EM-K4*

Orange triangles : participants in COOMET.EM-K4*

* linking laboratories to CCEM-K4 are not included

The BIPM key comparison database, January 2017

1/1

Рис. 6. Прив'язку результатів звірень COOMET.EM-K4 до результатів звірень CCEM-K4 на частоті 1,592 кГц
Fig. 6. Linking of results of comparison COOMET.EM-K4 to results of comparison CCEM-K4 at frequency 1,592 kHz

Calibration and Measurement Capabilities

Electricity and Magnetism, Ukraine

SE "Ukrmettestandard" (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")



Quantity	Calibration or Measurement Services		Measurand Level or Range			Measurement Conditions/Independent variables		Expanded Uncertainty						NMI Service Identifier	NMI Service Provider	
	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			Comments
High AC voltage ratio: error	High voltage transformer	Comparison by means of a comparator	0	0.01		Frequency	50 Hz	7E-05 to 3E-04		2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	11	SE "Ukrmettestandard"
High AC voltage ratio: phase displacement	High voltage transformer	Comparison by means of a comparator	15E-06	0.058	rad	Frequency	50 Hz	1.7E-04 to 7.5E-04	rad	2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	12	SE "Ukrmettestandard"
High AC current ratio: error	Current transformer	Comparison by means of a comparator	0	0.05		Frequency	50 Hz	8E-05 to 8E-05		2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	13	SE "Ukrmettestandard"
High AC current ratio: phase displacement	Current transformer	Comparison by means of a comparator	3E-05	0.058	rad	Frequency	50 Hz	1E-04 to 1E-03	rad	2	95%	Yes		Approved on 15 December 2008	14	SE "Ukrmettestandard"
Capacitance: low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	10	10	pF	Frequency	1 kHz, 1,592 kHz	1	μF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	15	SE "Ukrmettestandard"
Capacitance: low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	100	100	pF	Frequency	1 kHz, 1,592 kHz	1	μF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	16	SE "Ukrmettestandard"
Capacitance: low loss capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	1	1000	pF	Frequency	1 kHz, 1,592 kHz	12	μF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	17	SE "Ukrmettestandard"
Capacitance: dielectric capacitors	Standard capacitor	Transformer bridge	1	10	pF	Frequency	1 kHz, 1,592 kHz	14	μF/F	2	95%	Yes		Approved on 28 July 2010	18	SE "Ukrmettestandard"

The BIPM key comparison database, September 2016

2/19

Рис. 7. Приклад таблиці СМС НМІ України для одиниці електричної ємності
 Fig. 7. Example of CMC-table of Ukrainian NMIs for unit of electrical capacitance

ВИСНОВКИ

1. За результатами міжнародних ключових і додаткових звірень національних еталонів одиниць електричної ємності номіналами 10 і 100 пФ на частотах 1 і 1,592 кГц у рамках проектів COOMET.EM-K4 і COOMET.EM-S4, проведених за участю НМІ України, Німеччини, Японії, Болгарії, Російської Федерації, Казахстану та Білорусі, отримано хороші результати. Звіти за проектами COOMET.EM-K4 і COOMET.EM-S4 опубліковано у Додатку В бази даних KCDB BIPM у рамках Угоди CIPM MRA.

2. Пілотною лабораторією здійснено прив'язку результатів ключових звірень COOMET.EM-K4 до результатів ключових звірень CCEM-K4, що дозволило НМІ Болгарії, Японії, Казахстану, України та Білорусі підтвердити свої СМС чи розробити нові. Отримані результати звірень у рамках проектів COOMET.EM-K4 і COOMET.EM-S4 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 правом (авторизацією) від директора BIPM.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Величко О.М. Міжнародні звірення еталонів та їх значення // Укр. метролог. журнал (Velychko O.M. International comparisons of standard and its importance // Ukrainian metrological journal). — 1998. — № 4. — С/Р. 48—51.
2. Величко О.Н. Метрологическая прослеживаемость на разных уровнях метрологических работ // Измерит. техника (Velichko O.N. Traceability of measurement results at different levels of metrological work // Measurement Techniques). — 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 concerning traceability of measurements // 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 assurance 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 // Укр. метролог. журнал (Velychko O.M. Processing of data of the international comparisons of national standard: main requirements and procedures // Ukrainian metrological 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 і вагів (International database of key comparisons of International Bureau of Weights and Measures) — KCDD <http://kcdb.bipm.org/>
8. Velychko O., Akhmadov O. Final Report on COOMET Key Comparison of Capacitance at 10 pF (COOMET. EM-K4). — Kyiv, Ukraine, October 2014. — 46 p. // Metrologia. — 2017. — Vol. 54. — Issue 1A. — Technical Supplement 01005. doi:10.1088/0026-1394/54/1A/01005.
9. Velychko O., Akhmadov O. Final Report on COOMET Supplementary Comparison of Capacitance at 100 pF (COOMET. EM-S4)/. — Kyiv, Ukraine, October 2014. — 37 p. // Metrologia. — 2017. — Vol. 54. — Issue 1A. — Technical Supplement 01006. doi:10.1088/0026-1394/54/1A/01006.
10. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
11. COOMET R/GM/14:2016. Guidelines on COOMET key comparison evaluation.
12. COOMET R/GM/19:2016. Guidelines on COOMET supplementary comparison evaluation.
13. CIPM MRA-D-04:2013. Calibration and Measurement Capabilities in the context of the CIPM MRA.
14. Величко О.Н. Калибровочные и измерительные возможности национальных метрологических институтов: особенности подготовки, экспертизы и публикации // Измерит. техника (Velichko O. N. Calibration and measurement capabilities of metrological institutes: features of preparation, examination, and publication // Measurement Techniques). — 2010. — № 6. — С/Р. 69—73.
15. Величко О. Калібрувальні та вимірювальні можливості НМІ: основні процедури експертизи та оприлюднення // Метрологія та прилади (Velychko O. Calibration and measurement capabilities of NMIs: main procedures of expertise and disclosure // Metrology and instruments). — 2010. — № 2. — С/Р. 3—10.
16. Величко О.М. Метрологічне та нормативне забезпечення вимірювання електромагнітних величин // Стандартизація, сертифікація, якість (Velychko O.M. Metrological and normative assurance of measurements of electrical quantities // Standardization, certification, quality). — 2006. — № 6. — С/Р. 34—42.
17. Величко О. Метрологічне та нормативне забезпечення вимірювань електромагнітних величин у ДП «Укрметртестстандарт» // Метрологія та прилади (Velychko O. Metrological and normative assurance of measurements of electrical quantities in SE «Ukrmetrteststandard» // Metrology and instruments). — 2009. — № 5. — С/Р. 5—12. ❏

Отримано / received: 06.04.2017.

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

УДК537.73:389

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОБОТИ З ЕТАЛОННИМИ МЕТАЛЕВИМИ МІРНИКАМИ

Є. Воронцов, провідний інженер з метрології,

П. Гиря, начальник відділу маси та об'єму,

М. Лобойченко, інженер з метрології 1 категорії,
ДП «Харківстандартметрологія»,

Г. Народницький, доктор технічних наук, директор наукового центру механічних вимірювань,
ННЦ «Інститут метрології», м. Харків

Наведено рекомендації щодо правильного калібрування та подальшого використання еталонних металевих мірників 1-го розряду для зменшення впливу конструкції кранів мірників на невизначеність мірників.

Recommendations for proper calibration and subsequent use of standard metal measuring tank 1st level to reduce the impact of construction cranes tank to uncertainty tank.

Ключові слова: еталонні металеві мірники, невизначеність, місткість, крани.
Keywords: standard metal measuring tanks, uncertainty, roominess, cranes.

Згідно з [1] металеві еталонні мірники (мірники) є зливними мірами місткості.

У разі використання мірників для визначення об'єму зливої рідини необхідно після зливання води струменем дати час на зливання крапель — 30 секунд для мірників 2-го розряду, 60 секунд для мірників 1-го розряду. У разі використання мірників для визначення об'єму налитої в мірники рідини вони повинні бути перед наливанням певної дози рідини, об'єм якої вимірюється, змочені рідиною зі зливанням цієї рідини через кран та витримкою часу на зливання крапель. Після цього в мірник заливається рідина, об'єм якої вимірюється.

У [2] розглянуто додаткові дії з мірниками, які використовуються як еталони порівняння під час звірень еталонних установок. До цих додаткових дій відноситься правильне заливання води в мірник 1-го розряду шлангом через заливний кран для того, щоби в мірник не потрапили повітряні бульбашки. Друга додаткова дія — забезпечення пустої порожнини зливого крана, для чого, після зливання води струменем, проводиться зливання крапель із мірника 1-го розряду протягом 30 секунд, після чого протягом ще 30 секунд 5 разів закривається та відкривається зливний

кран, а далі (через 60 секунд після закінчення зливання води струменем) зливний кран закривається. Для звірень найбільш важливо, щоби всі учасники звірень все виконували однаково, — забезпечувати однаковий стан заливних кранів (закриті, порожнина заповнена водою) та зливних кранів (закриті, порожнина пуста).

Наведені вище дії зі зливним краном особливо важливі для шарових сучасних кранів. Авторами цієї статті проведені дослідження місткості порожнини шарових кранів. Для цього, після зливання води із мірника через зливний кран та після стікання крапель із мірника, зливний кран закривався, після чого він знову відкривався, і вода із нього стікала в мірний посуд. Далі операція зливання води в мірний посуд повторювалася ще 4 рази. Було знайдено, що об'єм зливої у такий спосіб води в мірний посуд складав не менше 0,02 % від номінальної місткості мірника, тобто дорівнював нормованій похибці мірника. Зокрема, для мірника місткістю 50 л об'єм зливої води склав 16 мл. При цьому основна частина води злилася під час першого відкриття крана для зливання води із порожнини.

Крани клінетної конструкції мають дуже малу порожнину, і нею можна знехтувати.

Однак, правильне використання мірників не менш важливе, ніж звірення. Потрібно забезпечити, щоби мірники використовувалися так само, як калібрувалися.

Нижче буде показано, що найбільш придатним режимом використання, а внаслідок цього, і калібрування мірників є забезпечення порожнини кранів заповненими рідиною (під час калібрування — водою).

Для всіх режимів перед калібруванням необхідно провести перевірку герметичності мірника шляхом заливання в нього питної води на (12–24) години. Перевіряється відсутність підтікань. Після цього вода зливається через зливний кран. Під час останнього зливання заповнюється порожнина зливного крана водою.

Розглянемо основні режими калібрування та використання мірників 1-го розряду.

1. Мірник з двома кранами (заливним та зливним), заповнення водою мірника через заливний (верхній) кран.

Для забезпечення відсутності повітряних бульбашок у мірнику потрібно залити в мірник із закритим зливним краном достатній об'єм води, щоби після цього в шланзі вже не було бульбашок повітря. Далі, не знімаючи з мірника заливний шланг, потрібно відкрити зливний кран та випустити воду (витримку на зливання крапель проводити не потрібно). Залити воду до рівня на (6–8) мм вище позначки номінальної місткості (у разі калібрування — дистильовану воду). Закрити заливний кран та від'єднати заливний шланг. Піпеткою довести нижню границю меніска води до рівня верхньої границі позначки номінальної місткості.

У цьому стані порожнини обох кранів заповнені водою, і мірник може використовуватися для зливання із нього води під час проведення вимірювання або для калібрування.

Під час калібрування мірник з дистильованою водою зважується, після чого відкривається зливний кран, і вода зливається в допоміжний посуд. Після закінчення зливання струменем дається витримка на 60 секунд для зливання крапель, і зливний кран закривається. Вимірюється температура води в допоміжному посуді.

У цьому стані порожнини обох кранів також заповнені водою, а різниця маси заповненого водою мірника та порожнього мірника дорівнює масі води в мірнику.

2. Мірник з двома кранами, заповнення водою мірника через горловину шлангом.

Для забезпечення відсутності повітряних буль-

башок у мірнику шланг на початку заливання має бути розміщено кінцем у горловині мірника. Після заливання близько половини мірника водою потрібно відкрити заливний кран повністю на (3–5) секунд для випускання повітря із патрубків заливного крана. Під час цієї операції заповнюється водою порожнина верхнього крана.

Порожнина зливного крана заповнюється водою під час контролю герметичності. Якщо контроль герметичності не проводиться, то необхідно перед калібруванням або використанням мірника залити його не менше ніж на 20 % місткості водою та випустити воду через зливний кран, після чого закрити зливний кран. У результаті порожнина зливного крана заповнена водою. Подальше калібрування і використання мірника виконується так само, як і в пункті 1.

3. Мірник 1-го розряду з одним (зливним) краном.

Мірник заливається водою через горловину кухолем або шлангом. У разі використання шлангу його кінець має бути в горловині для забезпечення відсутності повітряних бульбашок у мірнику зі шлангу. Вода заливається до рівня, на (6–8) мм вище позначки номінальної місткості. Подальше калібрування та використання мірника виконується так само, як у пункті 2. Порожнина крана заповнюється під час контролю герметичності. Якщо контроль герметичності не проводиться, то необхідно перед калібруванням або використанням мірника залити його водою не менше ніж на 20 % місткості та випустити воду через кран, після чого закрити кран. Далі порожнина крана заповнена водою.


Розглянемо основні режими калібрування та використання мірників 2-го розряду.

Мірники 2-го розряду мають лише один кран — зливний, або не мають крана. Згідно з [1] місткість мірників 2-го розряду під час їх калібрування визначається об'ємним методом — наливанням питної води у попередньо змочений мірник із мірників 1-го розряду. Після змочування мірника 2-го розряду вода із нього зливається струменем і протягом 30 секунд стікають краплі, після чого закривається кран. У результаті порожнина крана мірника 2-го розряду заповнюється водою. Після зливання води із мірників 1-го розряду протягом 60 секунд краплі стікають із мірників 1-го розряду в мірник 2-го розряду. Далі, за допомогою піпеток або бюреток та циліндрів, згідно з порядком за [1], рівень води в мірнику 2-го розряду доводиться до рівня позначки номінальної місткості (нижня границя меніска води має бути сполучена з верхньою границею позначки номінальної місткості).

У процесі використання мірника 2-го розряду із заливанням у нього рідини порядок має бути таким же: мірник попередньо змочується рідиною (мірник під час змочування має бути заповненим не менше ніж на 20 % від номінальної місткості), зливається рідина з мірника струменем та протягом 30 секунд зливають краплі, після чого закривається кран. У такий спосіб порожнина в крані мірника заповнюється рідиною. Після цього в мірник заливається рідина, об'єм якої має бути вимірено.

Якщо мірник 2-го розряду використовується для заливання із нього певного об'єму в інший посуд (наприклад, в технічні мірники, автомобільні цистерни тощо), то для забезпечення того, щоби мірник був змоченим і з нього стекли краплі, мірник може попередньо не змочуватися. Але в цьому випадку перша порція рідини із мірника буде зменшена на об'єм порожнини крана мірника. Тому і в цьому випадку для забезпечення заповнених водою порожнин кранів необхідно змочувати мірник до використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ 7218:2011 Метрологія. Мірники металеві еталонні. Методика повірки (калібрування); Чинний з 01.08.2011. — К.: Держспоживстандарт України (ДСТУ 7218:2011 Metrology. Standard metallic gauges. Procedure of verification (calibration); Constitute from 01.08.2011. — К.: Derzspozyvstandart of Ukraine), 2011. — 15 с/р. (Ukr).
2. Воронцов Є., Гири П., Лобойченко М., Коршунов В., Народницький Г. Щодо похибки еталонних металевих мірників 1-го розряду, які використовують як еталони порівняння під час звірень / Метрологія та прилади — (Vorontsov Ye., Gyrya P., Loboichenko M., Korshunov V., Narodnytskyi G. Concerning the error of standard metal tank 1st level which are used as standards of comparison when comparisons / Metrology and instruments) — 2015. — №4 — С/Р. 9—11 (Ukr). 

Отримано / received: 10.05.2017.

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

27-МЕ ЗАСІДАННЯ КОМІТЕТУ COOMET

26–28 квітня 2017 році у Мінську (Білорусь) відбулися 27-ме засідання Комітету COOMET, 15-те засідання Об'єднаного комітету з еталонів COOMET та семінар «COOMET – 25: історія, результати та перспективи співробітництва».

У роботі засідання Комітету COOMET взяли участь його члени та їхні офіційні представники, голови Технічних комітетів і представники національних секретаріатів COOMET із 17 країн-членів організації, представники міжнародних метрологічних організацій BIPM та BIML.

Розглянуто 19 питань, зокрема, щодо основних результатів діяльності COOMET у 2016 році; Меморандуму про взаєморозуміння у сфері забезпечення єдності вимірювань між ЄЕК та COOMET; співробітництва COOMET з EURAMET та NCSLI; реалізації CIPM MRA; результатів засідань JCRB і CIML та відповідних завдань COOMET; діяльності Форуму якості COOMET; діяльності організації у сферах зако-

нодавчої метрології, інформації та навчання; формування структурних органів COOMET і призначення голів ТК та ПК.

Проведено чергові вибори Президента COOMET. Новим Президентом COOMET обрано Валерія Гуревича, директора БелГІМ (Білорусь). За правилами процедури він почне виконання своїх обов'язків через рік, під час 28-го засідання Комітету COOMET, яке заплановано провести в Сараєво (Боснія та Герцеговина) у квітні 2018 року.

Семінар був присвячений 25-річчю COOMET. Було заслухано доповіді колишніх та нинішніх президентів, віце-президентів, ветеранів організації та гостей семінару щодо історії, початку та розвитку співробітництва, участі COOMET у міжнародній співпраці, результатів та нових завдань COOMET зі створення сучасної бази вимірювань.

(За матеріалами ННЦ «Інститут метрології»)

УДК 621.391:519.72 + 004.942

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТУРБО-КОДІВ

Р. Кветний, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматичної та інформаційно-виміральної техніки,

Ю. Іванов, кандидат технічних наук, асистент кафедри,

С. Кривогубченко, кандидат технічних наук, доцент кафедри,

О. Стукач, доктор технічних наук, професор кафедри вимірвальних систем та метрології, Вінницький національний технічний університет

Робота присвячена розробленню та дослідженню цифрової системи зв'язку з турбо-кодеком. Виконано метрологічну експертизу для отримання раціональних рішень. Проаналізовано складові компоненти системи зв'язку, алгоритми декодування групи SOVA та MAP, оцінено їх обчислювальну складність. Запропоновано використовувати алгоритм PL-log-MAP. Розроблено апаратні та програмні засоби для забезпечення потрібної вірогідності передавання даних. Показано прототип турбо-декодера та проведено експерименти.

The work is devoted to developing and research of the digital communication system with turbo codec. The metrological expertise for rational solutions has been done. The components of the communication system (fig. 1), decoding algorithms of SOVA [7-9] and MAP [1, 11-15] group have been analyzed, their computational complexity has been estimated (table 1) [10, 18]. It is proposed to use an PL-log-MAP algorithm [4, 16]. The hardware (fig. 3) and software (fig. 4) have been developed to provide the desired data transmission reliability. The turbo-decoder prototype have been shown (fig. 6) [19] and experimental researches have been conducted (fig. 5 and 7).

Ключові слова: завадостійке кодування, турбо-код, ітеративне декодування, MAP, log-MAP, PL-log-MAP, SOVA, імітаційне моделювання, програмні та апаратні засоби, цифрова система зв'язку.

Keywords: error-correcting coding, turbo-code, iterative decoding, MAP, log-MAP, PL-log-MAP, SOVA, simulation, software and hardware, digital communication system.

Системи цифрового передавання даних відіграють важливу роль у сучасному світі, й вимоги до швидкості та надійності переданих даних постійно зростають. Для підвищення енергетичної ефективності та виправлення помилок практично у всіх сучасних цифрових системах передавання даних застосовується завадостійке кодування. Завадостійкість забезпечує надійність і вірогідність переданої інформації. Реалізація сучасних завадостійких систем передавання цифрових даних неможлива без застосування кодерів, виконаних за сучасною технологією, здатних працювати на високих тактових частотах, що дозволяє підвищити ефективність використання апаратної реалізації, енергетичну ефективність, завадостійкість, а також позитивно позначається на економічному ефекті. Кодери і декодери завадостійких кодів є найбільш ресурсомістким компонентом апаратури, особливо із зростанням швидкості передавання даних [1].

Дослідження асимптот кодової відстані для різних кодів дозволило визначити, що, за ймовірностей помилки $p = 10^{-5} - 10^{-7}$ (нормоване відношення сигнал/шум E_b/N_0 до 3 дБ), кращим із розглянутих кодів є турбо-код. Застосування турбо-кодів за високих значень коефіцієнта бітових помилок (BER — bit error rate) зменшує показник E_b/N_0 на (5—7) дБ порівняно з іншими завадостійкими кодами. Такі коди можуть бути використані для зменшення необхідної потужності під час передавання даних із заданою швидкістю, що, безумовно, представляє їх застосування перспективним. Важлива перевага турбо-коду — незалежність складності декодування від довжини інформаційного блоку, що дозволяє знизити частоту виникнення помилок шляхом збільшення довжини послідовності бінарних інформаційних символів. Недоліком турбо-декодування є висока складність, що призводить до зниження швидкості опрацювання інформації внаслідок збільшення кількості операцій

декодування, які припадають на один інформаційний символ. Загальним недоліком турбо-кодів є порівняно невелика кодова відстань d_f , що призводить до того, що за великої (малої) BER ефективність турбо-кодів висока (обмежена) [2].

Турбо-коди з імовірнісними алгоритмами декодування дозволяють здійснити високоефективне передавання даних практично в будь-якій системі зв'язку: телебаченні (DVB-RCS, DVB-RCT, DVB-SSP), телеметрії, бездротових локальних мережах (WiMAX), SDR системах (software defined radio — програмно-визначених радіосистемах), мобільних (3G, 4G LTE, Inmarsat) і космічних (CCSDS) комунікаціях. Наприклад, дослідження NASA JPL (Mars Reconnaissance Orbiter + Mars Science Laboratory) дозволили отримати 24 Гб інформації, включаючи високоякісні фотографії й відеофайли поверхні Червоної планети за допомогою марсохода Curiosity та турбо-коду (швидкість $R = 1/6$, кадр 8920 бітів) [2, 3].

Отже, турбо-коди мають перевагу перед наявними коригувальними кодами, оскільки дозволяють досягти компромісу між високими показниками вірогідності та швидкості передавання даних у каналах з низькою енергетикою.

Мета цієї роботи — розроблення та дослідження цифрової системи зв'язку з турбо-кодеком. Найбільшу увагу потрібно приділити розробленню турбо-декодера. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- 1) аналіз процесу передавання даних;
- 2) розроблення апаратних засобів;
- 3) розроблення програмного забезпечення;
- 4) проведення комп'ютерного моделювання процесу передавання даних;
- 5) реалізація дослідного зразка турбо-декодера.

На кожному із цих етапів необхідно проводити метрологічну експертизу (аналіз та оцінювання технічних рішень у частині метрологічного забезпечення: вибір вимірюваних параметрів, установлення вимог до точності вимірювань, вибір методів і засобів вимірювань, їх метрологічного обслуговування, аналіз технічної документації тощо). Під час проведення метрологічної експертизи виявляються помилкові або недостатньо обґрунтовані рішення, визначаються рекомендовані, раціональні рішення з конкретних питань метрологічного забезпечення.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Класичну систему передавання цифрових даних з модулем для оцінювання BER наведено на рис. 1. Як джерело інформації використовуються мульти-

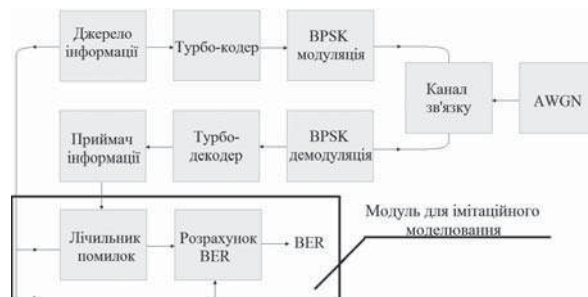


Рис. 1. Класична структурна схема системи передавання цифрових даних

Fig. 1. Classical block diagram of digital data transmission



Рис. 2. Структура турбо-кодера

Fig. 2. Turbo-coder block diagram

медіа дані (текст, зображення, аудіо-, відеофайли). Для моделювання використовують генератор псевдовипадкових послідовностей з генерацією рівномірно розподілених випадкових величин за методом S.K. Park та K.W. Miller [4]. Приймач інформації отримує декодовану версію даних, після чого лічильник помилок підраховує помилки в бітах. На виході схеми розраховується коефіцієнт BER у виді відношення помилок до загальної кількості бітів.

Класичний турбо-кодер (рис. 2) містить два паралельно сполучених згорткових кодера. Відмінність кодера 1 від кодера 2 полягає в тому, що в першому є систематичний вихід, через який до каналу зв'язку надходить інформаційна послідовність $X = \{D_k\}$, що забезпечує систематичне представлення кодової послідовності.

Теоретично та експериментально доведено, що рекурсивні систематичні згорткові (РСЗ) коди можуть давати достатньо велику вагу w кодових слів на виходах із кодерів порівняно з нерекурсивними, навіть коли вага w вхідної послідовності мала. Це головна перевага турбо-коду, оскільки саме низька вхідна вага кодових слів є домінуючим чинником появи помилок. Із виходу всього турбо-кодера на модулятор спочатку надходить символ із систематичного виходу верхнього кодера D_1 , а потім — два перевірюваних символи: із першого кодера $D_{1,2}$ та другого $D_{1,3}$, утворюючи єдине кодове слово. Завдяки використанню РСЗ кодерів до каналу зв'язку передаються два кодові блоки: перший блок, який складається з інформаційної частини $\{D_k\}$ і перевірюваної частини $\{D_{k,2}\}$ кодера 1, і другий кодовий блок,

що складається з перемішаної інформаційної частини $\pi(\{D_k\})$ і перевіркової частини $\{D_{k,3}\}$ кодера 2. Параметри породжувальних поліномів та процедури оптимізації згорткового кодера визначені експериментально [2, 3].

Для збільшення кодової швидкості R застосовується операція *перфорачії* (*puncturing*) певних бітів парності вихідної послідовності з кодерів, тобто періодичного вилучення частини символів кодових слів за певним правилом. Перфорачія значно підвищує гнучкість системи без значного збільшення складності.

Під час кодування початкові стани компонентних кодерів найчастіше нульові. Закінчення кодування інформаційного блока повинно відбуватися за нульових станів кодерів (*термінація* кодера), оскільки численні результати моделювання засвідчують істотну перевагу характеристик завадостійкості для турбо-кодів з такими параметрами.

Ще однією важливою особливістю турбо-коду є наявність *інтерлівера*. Інтерлівер π (пермутація, перемішувач) — це алгебраїчна система, яка виконує бікцію набору даних. Відповідно деінтерлівер π^{-1} відновлює вихідну структуру інформації. Операція інтерлівінгу — це спосіб боротьби з помилками, оскільки на вході декодера помилки рівномірно розподіляються у часі, утворюючи потік незалежних помилок. Основним завданням синтезу інтерлівера є максимізація мінімальної кодової відстані турбо-коду d_{\min} або мінімізація кількості кодових слів із вагою w_{\min} . Інтерлівери, які використовуються в цифрових системах зв'язку, можна систематизувати за ознаками на декілька видів: блокові (*block*) та згорткові (*convolutional*); без опрацювання даних або «на льоту» (*on the fly sequence generation*), з попереднім опрацюванням (*preprocessing sequence generation*); гнучкі, укорочені або обрізані (*prunable*), точного розміру (*fixed*); детерміністичні (*deterministic*) та випадкові (*random*). Для оцінювання ефективності роботи інтерліверів використовується ряд методів: дисперсія (*dispersion*), спред (*spread*), спредінг фактор (*spreading factor*), s -параметр, спред фактор (*spread factor*), метрика циклічної кореляційної суми (*metric of cycle correlation sum*) тощо [5].

Наступним елементом системи зв'язку є *модем*. Модуляція зазвичай використовується у зв'язці з певним завадостійким кодом. Вона дозволяє підвищити завадостійкість системи та зменшити конструктивні розміри антени. Часто застосовують модуляцію з невисокою кратністю, наприклад, двійкову фазову модуляцію (*BPSK — binary phase-shift keying*). Далі

символи з модулятора додаються до дійсних величин шуму з каналу зв'язку, формуючи зашумлений сигнал [2, 3].

Аналітичне моделювання більшості каналів передавання даних у теорії завадостійкого кодування припускає гаусівський розподіл завад (*AWGN — additive white Gaussian noise*), що означає статистичну незалежність потоку помилок за центральною граничною теоремою. Для реальних каналів зв'язку це припущення не завжди є правильним, оскільки помилки в таких системах мають виражену тенденцію до групування у пакети помилок. Подібне явище викликає труднощі за декодування завадостійких кодів, але саме для їх подолання (декореляції інформаційної послідовності у часі), отримання квазівипадкових послідовностей та максимізації мінімальної відстані використовується інтерлівер. Для моделювання шумів у каналах передавання даних застосовують перетворення *Box-Muller, G. Marsaglia*, алгоритм *Ziggurat*, які допомагають генерувати випадкові значення шуму за нормальним законом розподілу ймовірностей. Також для алгоритму декодування необхідно оцінити значення дисперсії шуму σ . У роботі [4] показано, що каналні показники слабо впливають на обмін апіорної та апостеріорної інформації з декодерів у зашумлених каналах, але їх дія посилюється в хороших каналах.

Основу математичного апарату методів *турбо-декодування* складає обчислювальна процедура оцінки надійності рішень, яка має назву логарифм відношення функцій правдоподібностей (*LLR — log-likelihood ratio*) [2, 6]. За декодування турбо-декодером із загального потоку даних виділяють два зашумлені кодові блоки $\{x_k, x_{k,2}\}$ та $\{x_k, x_{k,3}\}$, які декодують відповідні декодери. Декодовану інформацію першого (другого) декодера $LLR_{\text{зовн.}}(D_k)$ (зовнішня інформація) з урахуванням перемішування π можна використовувати як апіорну інформацію $LLR_{\text{ап.}}(D_k)$ для другого (першого) декодера з метою уточнення результату декодування, тобто інформація обертається петлею до того моменту, поки м'які рішення не сходяться на стабільному наборі значень. Окрім того, для уточнення апостеріорного $LLR(D_k)$ використовується канална інформація $LLR_{\text{кан.}}$. Подібну операцію можна проводити багаторазово. Виконання циклу роботи декодера (2 ітерації) відбувається за формулами:

$$LLR_1^{(1)}(D_k) = LLR_{\text{ап.}}(D_k) + LLR_{\text{кан.}} \cdot x_{\xi k} + LLR_{\text{зовн.1}}^{(1)}(D_k), \quad (1)$$

$$LLR_2^{(2)}(D_k) = LLR_{\text{зовн.1}}^{(1)}(D_k) + LLR_{\text{кан.}} \cdot x_{\xi k} + LLR_{\text{зовн.2}}^{(2)}(D_k). \quad (2)$$

Надійність м'яких рішень визначається їх абсолютним значенням $|LLR(D_k)|$, причому що воно далі від нуля, тим вищою буде надійність рішення D_k . Відповідно знак $LLR(D_k)$ засвідчує, яке жорстке рішення отримано на цьому етапі:

$$X_k = \text{sign}(LLR(D_k)) = \begin{cases} 1, & LLR(D_k) > 0; \\ 0, & LLR(D_k) \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Висока ефективність турбо-кодів зумовлена розробленими для них спеціальними ітеративними алгоритмами декодування для визначення максимально правдоподібної послідовності бітів (*SOVA* [7–9], *Bi-SOVA* [10]) та окремо кожного бінарного символу (*MAP* [1, 2, 11, 12], *log-MAP* [13], *max-log-MAP*, *PL-log-MAP* та інші модифікації [14–16]). Декодуери *MAP* або *BCJR* показують кращу енергетичну ефективність, але складніші в реалізації, ніж *SOVA* декодуери.

Для алгоритму *MAP* обчислення транзитної (*transit*) метрики відбувається у формі:

$$\gamma_k(s', s) \approx \exp\left(\frac{1}{2} \cdot (D_k \cdot LLR_{\text{ант}}(D_k)) + D_k \cdot LLR_{\text{кан.}} \cdot x_{\xi_k} + \left(\sum_{k=2}^n D_{k,v} \cdot LLR_{\text{кан.}} \cdot x_{\xi_{k,v}}\right)\right). \quad (4)$$

Апостеріорні м'які рішення можна представити як суму трьох вимірювань — каналного, апіорного і зовнішнього, що відображено у такому рівнянні:

$$LLR_{\text{MAP}}(D_k) = \ln \frac{\sum_{(s',s)} \alpha_{k-1}(s') \cdot \beta_k(s) \cdot \gamma_k(s', s)}{\sum_{(s',s)} \alpha_{k-1}(s') \cdot \beta_k(s) \cdot \gamma_k(s', s)}, \quad (5)$$

де $\alpha_k(s) = \sum \gamma_k(s', s) \cdot \alpha_{k-1}(s')$ — метрика прямого (*forward*) шляху на трелліс діаграмі PC3 коду; $\beta_{k-1}(s') = \sum \gamma_k(s', s) \cdot \beta_k(s)$ — метрика зворотного (*backward*) шляху.

Ефективна модифікація *log-MAP* працює в логарифмічній області (розраховуються натуральні логарифми відповідних метрик та виконуються певні спрощення), має меншу обчислювальну складність і досягає показників *BER MAP* алгоритму. Розрахунок логарифму суми експоненціальних складових виконують за допомогою формули логарифму Якобіана:

$$\begin{aligned} f(A_{N-1}, A_N) &= \ln(\exp(A_{N-1}) + \exp(A_N)) = \\ &= \max(A_{N-1}, A_N) + \ln(1 + \exp(-|A_{N-1} - A_N|)) = \\ &= \max(A_{N-1}, A_N) + f_{\text{кор}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для розрахунку апостеріорних рішень функцію логарифму суми N експоненціальних складових представляють рекурсивно у виді:

$$\begin{aligned} LLR_{LM}(D_k) &= \ln \frac{\sum_{(s',s)} \exp(\alpha_{k-1}^{LM}(s') + \beta_k^{LM}(s) + \gamma_k^{LM}(s', s))}{\sum_{(s',s)} \exp(\alpha_{k-1}^{LM}(s') + \beta_k^{LM}(s) + \gamma_k^{LM}(s', s))} = \\ &= \ln \sum_{i=1}^N e^{L_i} \Big|_{D_k=+1} - \ln \sum_{i=1}^N e^{L_i} \Big|_{D_k=-1} = \\ &= f(L_1, f(L_2, \dots, f(L_{N-2}, f(L_{N-1}, L_N)))) \Big|_{D_k=+1}, \end{aligned} \quad (7)$$

де L_i — сума логарифмічних метрик (прямої, зворотної та реберної).

Потрібно зазначити, що у формулі (6) можна знехтувати обчисленням коректувальної функції $f_{\text{кор}}$, що призведе до втрати приблизно 10 % ефективності порівняно з *MAP* методом. Такий субоптимальний алгоритм турбо-декодування має назву *max-log-MAP*. Виникає необхідність доповнення алгоритму *max-log-MAP* за допомогою апроксимації компенсувальної функції з метою підвищення ефективності роботи турбо-декодера. Автори цієї статті пропонують використати ефективний *PL-log-MAP* алгоритм (модифікований *log-MAP* з кусочно лінійною апроксимацією) [4, 10, 16]. У цьому алгоритмі не використовуються складні для обчислення у рекурсивному процесі функції (логарифм, сума експоненціальних складових), що зменшує обчислювальну складність. Ураховавши, що аргумент $z = |A_N - A_{N-1}|$, коректувальну функцію можна представити у такому виді:

$$f_{\text{кор}}(z) = \begin{cases} -0,3792 \cdot z + 0,6754, & \text{if } z \in [0; 1); \\ -0,2229 \cdot z + 0,5327, & \text{if } z \in [1; 1,5); \\ -0,1483 \cdot z + 0,4213, & \text{if } z \in [1,5; 2); \\ -0,0773 \cdot z + 0,2758, & \text{if } z \in [2; 3); \\ -0,0300 \cdot z + 0,1362, & \text{if } z \in [3; 4); \\ +0,0100, & \text{if } z \in (4; \infty). \end{cases} \quad (8)$$

Запропонована апроксимація має високу точність на тестовому діапазоні значень аргументу z (від 0 до 10 з кроком 0,01) порівняно з наявними аналогами (*MAE* = 0,0059, *RMSE* = 0,0070, коефіцієнт кореляції $r = 0,9994$). Коректувальна функція у складі *PL-log-MAP* алгоритму є більш точною, ніж інші аналоги, такі як дробова (на 0,11 %), квадратична (на 0,2 %), комбінована гібридна (на 0,37 %), таблиця пошуку *Robertson-Wang* (на 0,54 %), лінійна Зайцева (на 0,65 %), лінійна (на 1,36 %), багатокрокова (на 2,44 %), лінійна з рядом *C. MacLaurin* (на 6,88 %), константна (на 11,78 %) компенсувальні функції. Графічні порівняння та математичний аналіз запропонованої апроксимації представлені у роботі [16].

Алгоритм декодування *SOVA* полягає у використанні метрик ребер на гратці та блоку операцій додати-порівняти-вибрати (*ACS — Add-Compare-Select*). Розрахунок метрики шляху вперед відбувається

за допомогою операцій ACS до кінця ґратки:

$$M_k(s_k) = \max_{D_k = \pm 1}^{(s', s)} (M_{k-1}(s_{k-1}) + M_k(s', s)) = \\ = \max_{D_k = \pm 1}^{(s', s)} (M_{k-1}(s_{k-1}) + \gamma^{LM} M_k(s', s)), \quad (9)$$

де $M_{k-1}(s_{k-1})$ — поточна метрика у вершині треліс діаграми.

Для отриманого максимально правдоподібного шляху використовується апроксимація *J. Hagenauer* на ґратці з ковзним вікном розміром δ у виді:

$$LLR_{SOVA} \approx D_k \cdot \min_{\substack{i=k \dots k+\delta \\ D_k \neq D_i^k}} (|M_k^{D_k=+1}(s_k) - M_k^{D_k=-1}(s_k)|) = \\ = D_k \cdot \min_{\substack{i=k \dots k+\delta \\ D_k \neq D_i^k}} \Delta_i^s. \quad (10)$$

Двонаправлений алгоритм *SOVA* або *Bi-SOVA* виконується вперед та назад за формулами (9) та (10). Апостеріорні рішення визначаються за виразом:

$$LLR_{Bi-SOVA}(D_k) = \\ = \begin{cases} LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(D_k), & \text{if } LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(D_k) > LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(D_k) \\ LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(D_k), & \text{if } LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(D_k) > LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(D_k) \end{cases} \quad (11)$$

де $LLR_{SOVA}^{\rightarrow}(D_k)$, $LLR_{SOVA}^{\leftarrow}(D_k)$ — апостеріорні рішення, які визначено відповідно за прямим та зворотним алгоритмами *SOVA*.

Щоби уникнути числового бар'єру внаслідок множення великих чисел, метрики шляху вперед та назад нормують.

Закінчення процесу декодування відбувається або після виконання заданої кількості ітераційних циклів (6—10 ітерацій), або після того, як значення результату декодування за певним критерієм зупинки досягне встановленого порогу (за зміною знаку $LLR_{зобн.}(D_k)$; на основі м'яких та жорстких рішень; за зміною перехресної ентропії на основі відстані *Kullback-Leibler*; з розрахунком контрольної суми з використанням циклічного надлишкового коду; за кількістю ітерацій, бітів, кадрів тощо) [17].

РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ

Турбо-коди можуть бути реалізовані програмним, апаратним або програмно-апаратним способами.

Практично турбо-коди реалізуються програмно-апаратним способом на цифрових сигнальних процесорах (ЦСП). Детальні дослідження складності турбо-декодування та порівняльний аналіз складності реалізації декодування біта інформації для алгоритмів турбо-декодування наведено в роботах [10, 18]. Загальна кількість елементарних математичних операцій, які необхідно виконати ЦСП для кожного із алгоритмів турбо-декодування, визначається такими функціями:

$$f_{MAP}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 153 \cdot 2^{m+1} + 361, \quad (12)$$

$$f_{PL-\log-MAP}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 33 \cdot 2^{m+1} - 19, \quad (13)$$

$$f_{\max-\log-MAP}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 11 \cdot 2^{m+1} + 3, \quad (14)$$

$$f_{SOVA}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 11 \cdot 2^m + 5 \cdot m + 11, \quad (15)$$

$$f_{Bi-SOVA}(m, h) = 2^{m+2} \cdot h + 2^{m+4} + 10 \cdot m + 17, \quad (16)$$

де m — кількість комірок пам'яті РСЗ кодера, h — кількість символів з виходу турбо-кодера.

Аналіз формул (12)—(16) свідчить, що складність реалізації алгоритмів декодування турбо-коду зростає у виді степеневі функції зі збільшенням m РСЗ кодера, а з ростом величини h значення функції збільшується на показник 2^{m+2} . Для комплексного порівняльного аналізу обчислювальної складності алгоритмів турбо-декодування застосовано параметри відносної складності $O = N/n$, де N та n — відповідно більша та менша кількості математичних операцій для алгоритмів декодування, які порівнюються. Результати розрахунків для значень m (від 1 до 9) та h (від 2 до 6) представлено у таблиці, де \uparrow (\downarrow) показує у скільки разів (мінімум та максимум) алгоритм декодування в рядку складніший (простіший) за той, який у стовпці [10].

Отже, за однакових вхідних даних найбільш складним є алгоритм *MAP*, далі *PL-log-MAP*, *max-log-MAP*, *Bi-SOVA*, а найменш складний — *SOVA*. Отримані результати можна використовувати для аналізу складності реалізації турбо-коду на ЦСП з метою вибору елементної бази. Отже, оптимальним варіантом є використання *PL-log-MAP* турбо-декодера (рис. 3).

Показники відносної складності для алгоритмів турбо-декодування

Relative complexity for turbo-decoding algorithms

Алгоритми декодування	<i>MAP</i>	<i>PL-log-MAP</i>	<i>max-log-MAP</i>	<i>SOVA</i>	<i>Bi-SOVA</i>
<i>MAP</i>	1	$\uparrow 3,68 \dots 7,67$	$\uparrow 7,19 \dots 15,7$	$\uparrow 9,42 \dots 18,3$	$\uparrow 8,22 \dots 13,2$
<i>PL-log-MAP</i>	$\downarrow 3,68 \dots 7,67$	1	$\uparrow 1,69 \dots 2,46$	$\uparrow 1,87 \dots 3,87$	$\uparrow 1,50 \dots 3,06$
<i>max-log-MAP</i>	$\downarrow 7,19 \dots 15,7$	$\downarrow 1,69 \dots 2,46$	1	$\uparrow 1,10 \dots 1,57$	$\uparrow 0,84 \dots 1,23$
<i>SOVA</i>	$\downarrow 9,42 \dots 18,3$	$\downarrow 1,87 \dots 3,87$	$\downarrow 1,10 \dots 1,57$	1	$\downarrow 1,24 \dots 1,39$
<i>Bi-SOVA</i>	$\downarrow 8,22 \dots 13,2$	$\downarrow 1,50 \dots 3,06$	$\downarrow 0,84 \dots 1,23$	$\uparrow 1,24 \dots 1,39$	1

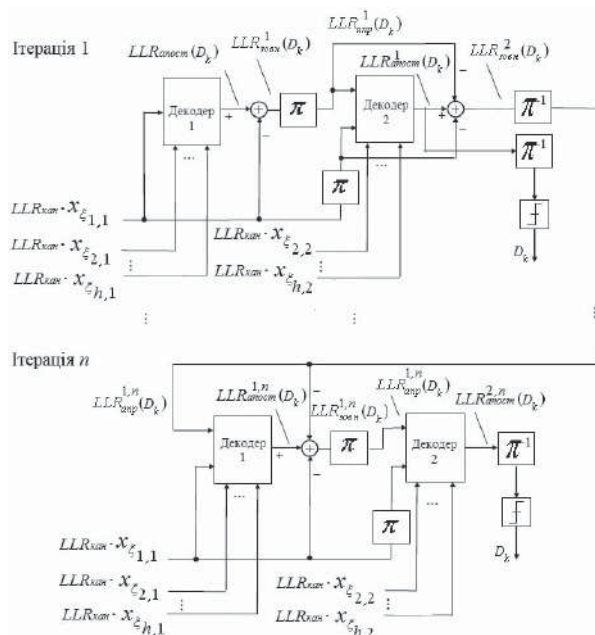


Рис. 3. Структурна схема PL-log-MAP турбо-декодера
Fig. 3. Block diagram of PL-log-MAP turbo-decoder

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Результатом науково-дослідної роботи стало програмне забезпечення, яке дозволяє застосувати турбо-кодек у системах цифрового зв'язку. Програма може моделювати процес передавання даних, а також працювати за реальних умов. Результатом роботи програми є отримані мультимедіа дані; значення BER залежно від E_b/N_0 ; величина часу, протягом якого передавалися дані; швидкість передавання в біт/с; графічні експериментальні залежності $BER = f(E_b/N_0)$ або $BER = f(Q)$, де Q — кількість ітерацій декодування даних. Користувач може взаємодіяти з програмним забезпеченням у діалоговому режимі та переглянути результати роботи у віконному інтерфейсі (рис. 4).

КОМП'ЮТЕРНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Оскільки відсутній адекватний математичний апарат, який дозволив би розрахувати експериментальні значення BER для цифрової системи зв'язку з турбо-кодеком, то використовують комп'ютерне імітаційне моделювання методом Монте-Карло.

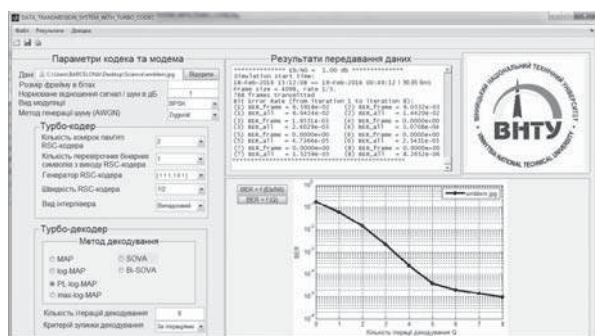


Рис. 4. Віконний інтерфейс програмного забезпечення
Fig. 4. Software interface

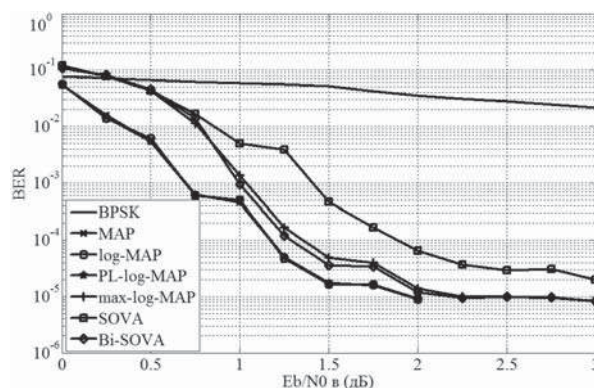


Рис. 5. Експериментальні криві BER для різних алгоритмів турбо-декодування
Fig. 5. Experimental BER curves for different turbo-decoding algorithms

тальні значення BER для цифрової системи зв'язку з турбо-кодеком, то використовують комп'ютерне імітаційне моделювання методом Монте-Карло. У ході експериментів використано BPSK-модем; турбо-код ($R = 1/3$) з двома компонентними РС3 кодерами з генератором $(7, 5)_8$ та термінацією за допомогою "хвостовика"; псевдовипадковий інтерлівер (генерація рівномірно розподілених випадкових величин методом Park-Miller); модель каналу з AWGN (алгоритм Ziggurat); 8 ітерацій декодування, кадр з 1024 бітів; діапазон дослідження від 0 до 3 дБ (крок 0,25 дБ); критерій зупинки процесу декодування — кількість пошкоджених кадрів для кожного значення E_b/N_0 . Результати роботи алгоритмів турбо-декодування наведено на рис. 5.

Потрібно зазначити, що алгоритми MAP, log-MAP, PL-log-MAP дають можливість отримати суттєвий енергетичний вигравш порівняно із SOVA (0,5—0,6 дБ для $BER = 10^{-3} - 10^{-4}$, 1,3 дБ для $BER = 10^{-5}$), Bi-SOVA та max-log-MAP (0,1—0,7 дБ). На значеннях $E_b/N_0 > 3 - 4$ дБ показник BER для алгоритмів декодування групи MAP не сильно залежить від компенсуючої функції, поступово наближаючись до BER алгоритму max-log-MAP. Детальні дослідження та експериментальні дані для різних алгоритмів турбо-декодування наведено у роботі [4, 16].

ДОСЛІДНИЙ ЗРАЗОК ТУРБО-ДЕКОДЕРА

Результатом досліджень є дослідний зразок PL-log-MAP турбо-декодера (рис. 6), який розроблено на основі роботи [19].

Результати роботи системи передавання даних із PL-log-MAP турбо-декодером на реальних даних у мультимедійному виді подано на рис. 7, де в лівому верхньому куті вказано показник Q (передано 768 пакетів по 4096 бітів за $E_b/N_0 = 1$ дБ), знизу

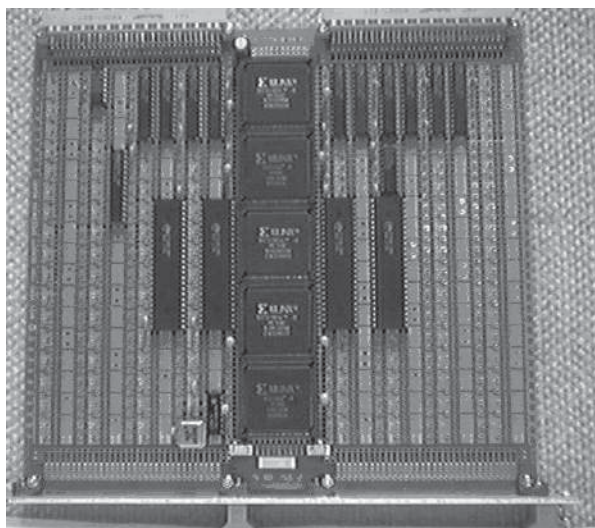


Рис. 6. Зразок PL-log-MAP турбо-декодера
Fig. 6. Example of PL-log-MAP turbo-decoder

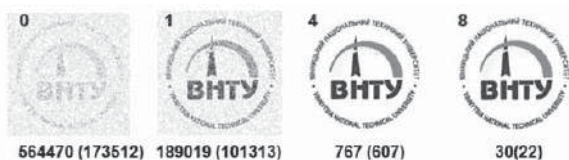


Рис. 7. Результати роботи PL-log-MAP турбо-декодера на мультимедіа даних

Fig. 7. Working results for PL-log-MAP turbo-decoder for multimedia data

перша цифра вказує на кількість бітових, а цифра в дужках — на кількість символних помилок.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано основні складові частини системи передавання даних із турбо-кодом. Аналітичні вирази для оцінки складності роботи турбо-декодера використані для аналізу складності за його програмно-апаратної реалізації. Розроблені програмні та апаратні засоби для забезпечення потрібної вірогідності передавання за певного рівня E_b/N_0 у каналах передавання даних і подальшого оцінювання ймовірнісно-енергетичних характеристик турбо-кодів з використанням різних алгоритмів турбо-декодування. Виконано експериментальні дослідження передавання даних у розробленій системі з турбо-кодом.

Виокремити правильні рішення та отримати ефективні практичні результати допомогла метрологічна експертиза, яка була правильно проведена на кожному етапі розробляння системи передавання даних.

Результати цієї роботи підтверджують високу ефективність турбо-коду та алгоритму декодування PL-log-MAP і можуть бути використані для вибору параметрів турбо-кодів у процесі планування їх експлуатації у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Іванов Ю.Ю. Декодування та реалізація алгоритму BCJR для турбо-коду стандартизованого в DVB-RCS / Ю.Ю. Іванов, А.Я. Кулик, Д.С. Кривоґубченко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. — Суми: СУМДУ (Ivanov Yu.Yu. Dekoduvannya ta realizacija algoritmu BCJR dlja turbo-kodu standartizovanogo v DVB-RCS / Yu.Yu. Ivanov, A.Ia. Kulik, D.S. Krivogubchenko // Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. — Sumi: SUMDU), 2012. — Т. 4. — № 1. — С/С. 84—94.
2. Channel Coding: Theory, Algorithms, and Applications / D. Declercq, M. Fossorier E. Biglieri and others. — Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications, Elsevier, 2014. — 690 p.
3. Hanzo L. Turbo Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding for Transmission over Wireless Channels / L. Hanzo, T.H. Liew, B.L. Yeap. — Southampton: Department of Electronics and Computer Science, 2002. — 746 p.
4. Іванов Ю.Ю. Експериментальне дослідження завадостійкості турбо-кодів: числові оцінки та імітаційне моделювання нового субоптимального алгоритму PL-log-MAP / Ю.Ю. Іванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — Вінниця: ВНТУ (Ivanov Yu.Yu. Eksperimental'ne doslidzhennja zavadostijkosti turbo-kodiv: chislovi ocinki ta imitacijne modeljuvannya novogo suboptimal'nogo algoritmu PL-log-MAP / Yu.Yu. Ivanov // Visnik Vinnic'kogo politehnicnogo institutu. — Vinnicja: VNTU), 2016. — № 5. — С/С. 76—84.
5. Кулик А.Я. Методи оцінювання ефективності інтерліверів у турбо-кодовій конструкції: матер. III науково-технічної конф. "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації" / А.Я. Кулик, Ю.Ю. Іванов. — Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 25-26 вересня 2014 (Kulik A.Ia. Metodi ocinjuvannya efektivnosti interliveriv u turbo-kodovij konstrukcii: mater. III naukovotehnicnoi konf. "Obchisljuval'ni metodi i sistemi peretvorennya informacii" / A.Ia. Kulik, Yu.Yu. Ivanov. — L'viv: Fiziko-mehanichnij institut n G.V. Karpenka NAN Ukraini, 25-26 veresnja 2014). — С/С. 161—164.
6. Іванов Ю.Ю. О некоторых аспектах итеративной стратегии декодирования турбо-кодов: ретроспектива и "турбо"-принцип: матер. IV международной научно-практической конф. "Информационные

- технологии и компьютерная инженерия" / Ю.Ю. Иванов, А.Я. Кулик — Винница: ВНТУ, 28-30 мая 2014 (Ivanov Yu.Yu. O nekotoryh aspektah iterativnoj strategii dekodirovanija turbo-kodov: retrospektiva i "turbo"-princip: mater. IV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoiy konf. "Informacionnye tehnologii i komp'yuternaja inzhenerija" / Yu.Yu. Ivanov, A.Ia. Kulik — Vinnica: VNTU, 28-30 maja 2014). — С/С. 157—160.
7. Hagenauer J. A Viterbi Algorithm with Soft-Decision Outputs and its Applications / J. Hagenauer, P. Hoeher // Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. — USA, Texas: 1989. — P. 1680—1686.
 8. Woodard J. Comparative Study of Turbo Decoding Techniques: An Overview / J. Woodard, L. Hanzo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2000. — № 6. — P. 2208—2233.
 9. Ivanov Y. A Viterbi Algorithm as a Key to Decoding Turbo-Code / Y. Ivanov, A. Kulyk, S. Krivogubchenko // Nauka i studia. — Przemysl: Nauka i studia, 2012. — № 11. — P. 60—65.
 10. Иванов Ю.Ю. Особливості апаратно-програмної реалізації турбо-кодів: порівняльний аналіз складності реалізації на цифровому сигнальному процесорі / Ю.Ю. Иванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — Вінниця: ВНТУ (Ivanov Yu.Yu. Osoblivosti aparatno-programnoi realizacii turbo-kodiv: porivnjaj'nij analiz skladnosti realizacii na cifrovomu signal'nomu procesori / Yu.Yu. Ivanov // Visnik Vinnic'kogo politehnicznego institutu. — Vinnicja: VNTU), 2016. — № 3. — С/С. 94—101.
 11. Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate / L. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, J. Raviv // IEEE Transact. on Information Theory. — 1974. — V. 20. — P. 284—287.
 12. Berrou C. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Proceedings of the ICC'93. — Switzerland, Geneva: 1993. — P. 1064—1070.
 13. Robertson P. A comparison of optimal and sub-optimal MAP decoding algorithms operating in the log domain / P. Robertson, E. Villebrun, P. Hoeher // 1995 IEEE International Conference on Communications ICC'95 "Gateway to Globalization". — USA, Seattle: IEEE, June 18, 1995. — V. 2. — P. 1009—1013.
 14. Soleymani M. Turbo Coding for Satellite and Wireless Communications / M. Soleymani, Y. Gao, U. Vilai-pornsawai. — New York: Kluwer Academic, 2002. — 231 p.
 15. Moon T.K. Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms / T.K. Moon. — John Wiley & Sons, 2005. — 750 p.
 16. A Novel Suboptimal Piecewise-Linear-log-MAP Algorithm for Turbo Decoding / Yu.Yu. Ivanov, A.N. Romanyuk, A.Ia. Kulyk, O.V. Stukach // Proceedings on XI IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, Institute of Electrical and Electronics Engineers. — Omsk: Omsk State Technical University, 21-23 May, 2015. — P. 1—8. — DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147195.
 17. Ivanov Yu. Principles and Comparison of Stopping Rules for Turbo Decoders: матер. V міжнародної науково-практичної конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" / Yu. Ivanov, A. Kulyk. — Івано-Франківськ: п. Голіней О.М., 27—29 травня, 2015 (Ivanov Yu. Principles and Comparison of Stopping Rules for Turbo Decoders: mater. V mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konf. "Informacijni tehnologii ta komp'yuterna inzhenerija" / Yu. Ivanov, A. Kulyk. — Ivano-Frankivsk: p. Golinej O.M., 27—29 travnja, 2015). — С/С. 87—88.
 18. Кулик А.Я. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Иванов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — Вінниця: ВНТУ (Kulik A.Ia. Porivnjaj'nij analiz skladnosti realizacii metodiv dekoduvannja turbo-kodiv / A.Ia. Kulik, S.G. Krivogubchenko, Yu.Yu. Ivanov // Informacijni tehnologii ta komp'yuterna inzhenerija. — Vinnicja: VNTU), 2013. — № 1. — С/С. 26—31.
 19. Pietrobon S.S. Implementation and Performance of a Turbo/MAP Decoder / S.S. Pietrobon // International Journal of Satellite Communications. — John Wiley & Sons, 1998. — V. 16. — P. 23—46. 

Отримано / received: 30.03.2017.

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

УДК 53.089.6

КОРИГУВАННЯ МІЖКАЛІБРУВАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

О. Косарева, начальник лабораторії калібрування ЗВТ,

О. Дзябенко, головний метролог,

Публічне акціонерне товариство «ФЕД», м. Харків

Запропоновано методику встановлення і коригування міжкалібрувальних інтервалів еталонів та вимірювального обладнання, яке використовується під час проведення калібрування і випробувань у лабораторіях підприємства у відповідності з вимогами національних та міжнародних стандартів.

A method for installation and adjustment of intercalibration intervals of standards and measurement equipment used during calibration and testing laboratories in the company in accordance with the requirements of national and international standards.

Ключові слова: калібрування, інтервал, коригування, вимірювальне обладнання.

Keywords: calibration, interval, adjustment, measurement equipment.

Важливим аспектом підтримання спроможності калібрувальної лабораторії отримувати простежувані та надійні результати вимірювань є визначення максимального періоду, який має пройти між двома періодичними калібруваннями еталонів, вимірювального та випробувального обладнання (обладнання). Різні національні та міжнародні стандарти враховують цей аспект та містять такі вимоги, наприклад:

* «...вимірювальне обладнання повинно бути: а) відкаліброваним чи перевіреном, або і те та інше, через конкретні інтервали...», пункт 7.1.5.2 [1];

* «Коли це можна практично здійснити, все обладнання, що перебуває під контролем лабораторії й потребує калібрування, повинно бути марковано, закодовано або яким-небудь іншим чином ідентифіковано (позначено статус калібрування, зокрема, дату проведення останнього калібрування і дату та критерії необхідності проведення повторного калібрування)», пункт 5.5.8 [2];

* «Методи, використовувані для визначення чи змінювання періодичності метрологічного підтвердження, потрібно описати в задокументованих методиках. Періодичність потрібно аналізувати і, за потреби, коригувати для забезпечення постійної відповідності встановленим метрологічним вимогам», пункт 7.1.1 [3].

Міжнародний стандарт *ILAC-G 24/OIML D 10*, містить лише загальне описання вимог до вибору можливих методів встановлення та коригування міжкалібрувальних інтервалів і не дає простих та однозначних рекомендацій щодо їх розрахунку. Тому основна частина цієї статті дає обґрунтування і приклад розрахунку міжкалібрувальних інтервалів обладнання, яке застосовується у калібрувальній та випробувальній лабораторіях ПАТ «ФЕД».



О. Косарева



О. Дзябенко

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Визначення міжкалібрувальних інтервалів — це комплекс математичних і статистичних процесів, який потребує точних і повних даних, отриманих під час калібрування.

Загальні цілі періодичного калібрування:

- удосконалити визначення оцінки відхилення між еталонним значенням і значенням, отриманим із використанням обладнання, та невизначеності в межах цього відхилення під час використання обладнання;
- виявити, чи були якісь зміни в обладнанні, які б поставили під сумнів результати вимірювання, отримані за допомогою цього обладнання за певний період.

Найважливішими чинниками в процесі коригування міжкалібрувальних інтервалів є [4]:

- ризик перевищення границі максимально допустимої похибки обладнання під час застосування;
- тенденція до зносу та дрейфу;
- рекомендації виробника;
- умови експлуатації;
- дані щодо тенденції, отримані з попередніх звітів стосовно калібрування;
- кваліфікація персоналу.

Початкове рішення щодо визначення міжкалібрувального інтервалу базовано на таких чинниках:

- ♦ рекомендації виробника обладнання;
- ♦ міжкалібрувальні інтервали, рекомендовані метрологічними центрами під час проведення первинного калібрування.

Після встановлення первинних інтервалів калібрування має проводитися можливим коригування міжкалібрувальних інтервалів для оптимізації балансу ризиків і вартості.

Методика розрахунку коригування міжкалібрувальних інтервалів є варіацією методів 1 і 2, викладених у [4].

Суть методики:

- ▶ вибрати основні точки калібрування обладнання;
- ▶ визначити відхилення від номінального значення у кожній точці калібрування, згідно зі сертифікатом калібрування, за два або декілька калібрувань (X_i — значення відхилення за першого, другого та наступних калібрувань);
- ▶ провести оцінку середнього значення відхилення вимірюваної величини (X_{cp}) у точці калібрування,

Протокол коригування міжкалібрувального інтервалу												№ 2 від 6 4 2017					
Набор ПКМД				из 121 меры				№ 6888		Належить: Лабораторії калібрувки ЗВТ ПАТ "ФЕД"							
Характеристики																	
Межа вимірювання			(0,5-100) мм			Розряд			3			Допустима похибка			Згідно ДСТУ 3741		
Еталон, що використовувався при калібруванні						ВЕТУ 01-03-09-02 (каліброван на ДЕТУ 01-03-98)						U=		(20+0,2L)мм			
Попередньо встановлений міжкалібрувальний інтервал												12		місяців			
Точка калібрування (мм)	Відхилення від номінального значення			U	Розрахункові значення				КРИТЕРІЙ КОРИГУВАННЯ				Допуск Δ (мм)				
	X_1	X_2	X_k		X_{cp}	D	S	X_i	W1	W2	W3	W4					
0,500	-0,00008	-0,00007	-0,00008	0,00002	-0,000077	0,00000	0,00001	0,00009	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
1,000	0,00002	0,00002	0,00001	0,00002	0,000017	0,00000	0,00001	0,00002	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
1,005	0,00008	0,00008	0,00008	0,00002	0,000080	0,00000	0,00000	0,00008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
2,0	-0,00002	-0,00002	-0,00005	0,00002	-0,000030	0,00000	0,00002	0,00007	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
3,0	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,000020	0,00000	0,00000	0,00002	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
4,0	0,00004	0,00004	0,00004	0,00002	0,000040	0,00000	0,00000	0,00004	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
5,0	-0,00008	-0,00008	-0,00008	0,00002	-0,000080	0,00000	0,00000	0,00008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
6,0	0,00004	0,00004	0,00004	0,00002	0,000040	0,00000	0,00000	0,00004	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
7,0	0,00004	0,00004	0,00002	0,00002	0,000033	0,00000	0,00001	0,00003	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
8,0	-0,00005	-0,00005	-0,00005	0,00002	-0,000050	0,00000	0,00000	0,00005	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
9,0	0,00001	0,00001	0,00000	0,00002	0,000007	0,00000	0,00001	0,00001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
10,0	0,00003	0,00003	0,00003	0,00002	0,000030	0,00000	0,00000	0,00003	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00011				
20,0	0,00005	0,00005	0,00005	0,00002	0,000050	0,00000	0,00000	0,00005	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00012				
25,0	0,00002	0,00002	0,00002	0,00003	0,000020	0,00000	0,00000	0,00002	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00012				
30,0	0,00005	0,00005	0,00005	0,00003	0,000050	0,00000	0,00000	0,00005	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00015				
40,0	-0,00009	-0,00008	-0,00009	0,00003	-0,000087	0,00000	0,00001	0,00010	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00015				
50,0	0,00010	0,00010	0,00010	0,00003	0,000100	0,00000	0,00000	0,00010	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00015				
60,0	0,00013	0,00013	0,00012	0,00003	0,000127	0,00000	0,00001	0,00013	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00018				
70,0	-0,00002	-0,00002	-0,00003	0,00003	-0,000023	0,00000	0,00001	0,00004	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00018				
75,0	-0,00007	-0,00007	-0,00009	0,00004	-0,000077	0,00000	0,00001	0,00011	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00018				
80,0	-0,00001	-0,00001	-0,00000	0,00004	-0,000027	0,00000	0,00003	0,00009	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00020				
90,0	0,00000	0,00000	-0,00005	0,00004	-0,000017	0,00000	0,00003	0,00008	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00020				
100,0	-0,00008	-0,00008	-0,00011	0,00004	-0,000090	0,00000	0,00002	0,00013	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00020				

Висновок: встановити калібрувальний інтервал: для набору № 6888 15 місяців
 Розрахунок виконав О. Шевченко

*Електронний протокол коригування міжкалібрувального інтервалу
 Electronic protocol regulation of calibration intervals*

за яку приймають середнє арифметичне значення результатів відхилень протягом декількох (n) калібрувань, за формулою:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad (1)$$

► провести розрахунок дисперсії (D) та середньоквадратичного відхилення (S) у кожній точці калібрування за формулами:

$$D = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2, \quad (2)$$

$$S = \sqrt{D}. \quad (3)$$

► на основі математичних і статистичних опрацювань результатів калібрувань провести розрахунок імовірного відхилення від номінального значення (X_p) за формулою:

$$X_p = |X_k| + S + U, \quad (4)$$

де U — розширена невизначеність вимірювання, вказана у сертифікаті калібрування за останнього калібрування обладнання; X_k — відхилення від номінального значення, вказане у сертифікаті калібрування за останнього калібрування обладнання.

Кожного разу, коли обладнання пройшло калібрування через установлений інтервал, наступний інтервал збільшується, якщо визначено, що похибка міститься у границях максимально допустимої похибки або зменшується, якщо визначено, що похибка виходить за границі максимально допустимої похибки. Для прийняття обґрунтованого рішення застосовується критерій W :

$W1 - X_p \leq 0,5 \times \Delta$ — міжкалібрувальний інтервал збільшується на 6 місяців;

$W2 - 0,5 \times \Delta < X_p \leq 0,8 \times \Delta$ — міжкалібрувальний інтервал збільшується на 3 місяці;

$W3 - 0,8 \times \Delta < X_p \leq \Delta$ — міжкалібрувальний інтервал не змінюється;

$W4 - X_p > \Delta$ — міжкалібрувальний інтервал зменшується на 3 місяці,

де Δ — максимально допустима похибка обладнання, яка встановлена підприємством-виробником у специфікації або нормативному документі для цього обладнання та задовольняє вимогам, викладеним у методиках калібрування (випробування).


Результати розрахунків коригування міжкалібрувальних інтервалів, для кожного обладнання, оформлюються «Протоколом коригування міжкалібрувальних інтервалів». Рішення щодо коригування міжкалібрувальних інтервалів приймає начальник лабораторії (менеджер з якості). Протокол допускається оформляти в електронному виді.

На ПАТ «ФЕД» розроблено та використовують програму розрахунку міжкалібрувальних інтервалів у *Microsoft Office Excel*. Форму електронного протоколу, виконаного за допомогою зазначеної програми, наведено на рисунку.

ВИСНОВОК

Наявність та застосування представленої методики встановлення і коригування міжкалібрувальних інтервалів, яка є складовою підтвердження простежуваності своїх еталонів до національних еталонів, забезпечує виконання лабораторією вимог національних та міжнародних стандартів [1—3] та обов'язкових умов для проходження акредитації в Національному органі України з акредитації на відповідність ДСТУ ISO/IEC 17025.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements (ISO 9001:2015).
2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (DSTU ISO/IEC 17025:2006 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories) (ISO/IEC 17025:2005, IDT).
3. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи управління вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального оснащення (DSTU ISO 10012:2005, Measurement management systems — Requirements for measurement processes and measuring equipment) (ISO 10012:2003, IDT).
4. ДСТУ ILAC-G 24/OIML D 10:2013 Метрологія. Наставови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (DSTU ILAC-G 24/OIML D 10:2013 Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments) (ILAC-G 24/OIML D 10:2010, IDT). 

Отримано / received: 20.04.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.Ф. Павленком (Україна).

Prof. Yu. F. Pavlenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 681.121.89.082.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ЗА УМОВ СПОТВОРЕНОЇ СТРУКТУРИ ПОТОКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОДНОЯДЕРНИХ ФУНКЦІЙ SALAMI

Ф. Матіко, доктор технічних наук, доцент,

В. Роман, кандидат технічних наук, старший викладач,
Національний університет «Львівська політехніка»

Досліджено додаткову похибку ультразвукових витратомірів, зумовлену спотворенням структури потоку. Як джерело спотворень застосовано аналітичні формули однопікових функцій Salami. При цьому вперше запропоновано визначити калібрувальний коефіцієнт ультразвукових витратомірів із використанням неспотвореної складової функцій Salami. У результаті визначено необхідну кількість акустичних каналів ультразвукових витратомірів, які дозволяють зменшити досліджувану похибку до регламентованих стандартами меж.

Paper is devoted to the issue of improve the accuracy of flow measurement ultrasonic flowmeters in conditions other than the conditions of their calibration. In the introductory part the authors actualized high sensitivity of ultrasonic flowmeters to distortions of flow structure and proposed reduce the additional error that arises while by increasing the number of acoustic paths. To determine the minimum number of chordal acoustic paths ultrasonic flowmeters proposed use computer simulations using empirically-derived

analytical functions distorted flow velocity of professor L.A. Salami [2]. Analysing the scientific and technical sources [3—11], the authors proposed a number of completions to fuller use of one peak functions of professor L.A. Salami in determining the minimum number of acoustic paths ultrasonic flowmeters. The main part of the article the authors initially calculated location coordinates and weights chordal acoustic paths ultrasonic flowmeters (Table 1) for the four most common methods [13]. Then, based on mathematical apparatus functions Salami (2—5, 9) and the principles of flow measurement multi-paths ultrasonic flowmeters (1) developed a method of estimation of additional error due to distortion of the flow structure. At that, in method first proposed to determine the calibration factor ultrasonic flowmeters (6) using undistorted component functions Salami (3). Using developed method and one peak functions Salami (Table 2) authors determined the required minimum number of acoustic paths ultrasonic flowmeters that investigated further reduce the error limits to regulated standards (10).

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

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

Завдяки ряду переваг (мінімальні втрати тиску, відсутність рухомих частин у потоці, широкий діапазон вимірювання) ультразвукові витратоміри (УЗВ) набули широкого застосування для промислових вимірювань витрати та кількості газоподібних середовищ. Проте, серед їх недоліків потрібно виділити високу чутливість до відхилень умов вимірювання (параметрів потоку) під час експлуатації від умов за їх калібрування, зокрема, високу чутливість до спотворень структури потоку. Цей недолік має значний вплив на похибку вимірювання витрати за допомогою УЗВ [1].

Зменшення похибки вимірювання витрати спотворених потоків досягають декількома способами: встановленням перед УЗВ прямолінійної ділянки вимірювального трубопроводу (ВТ) достатньої довжини, застосуванням спеціальних пристроїв підготовки потоку (ППП) та пристроїв кондиціонування потоку (кондиціонерів потоку) перед витратоміром, збільшення кількості акустичних каналів (АК) УЗВ. У цій роботі розглядаються лише хордові АК — звукові коливання по чергово рухаються між електроакустичними перетворювачами (ЕАП) УЗВ лише за прямолінійними неламаними траєкторіями [1].



Ф. Матіко



В. Роман

Збільшення кількості хордових АК (АК, які містяться у площині, віддаленій від центра ВТ) дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання витрати спотворених потоків, але при цьому конструкція такого УЗВ ускладнюється, а вартість — суттєво зростає [1]. Тому постає питання вибору мінімальної кількості хордових АК, достатньої для досягнення заданої точності вимірювання витрати.

Проведення таких досліджень експериментальним шляхом потребує наявності експериментальної установки, УЗВ з можливістю зміни кількості АК та схем їх розташування, що значно збільшує вартість досліджень. Отже, доцільним є дослідження впливу кількості АК на похибку вимірювання витрати за допомогою УЗВ на основі моделювання із застосуванням комп'ютерних технологій, вартість якого є суттєво меншою від експериментів. Моделювання дозволяє відібрати ефективні схеми розташування АК УЗВ, зменшити перелік схем для їх експериментальних досліджень, а отже, зменшити час і вартість проведення експериментів.

У цій роботі поставлено за мету дослідити похибку багатоканальних УЗВ за умов спотворень структури потоку, на основі чого визначити необхідну кількість АК, яка б задовольняла вимогам наявних стандартів із ультразвукової витратометрії. Для цього пропонується застосувати емпірично отримані аналітичні функції швидкості спотвореного потоку професора *L.A. Salami*, які описують структуру потоку на виході із типових місцевих опорів (МО) [2].

Застосування функцій швидкості *Salami* для розв'язання задач ультразвукової витратометрії розглянуто у багатьох вітчизняних [3—5] та закордонних [6—11] наукових працях. Зокрема, у [7—11] на базі функцій *Salami* проведено аналітичні дослідження похибки та деяких характеристик УЗВ залежно від кількості, типу та методу розташування АК. Однак, у наведених працях виявлені недоліки, які потребують доопрацювання, зокрема:

1. Необхідно порівняти класичні та удосконалені методи визначення координат розташування хордових АК УЗВ, оскільки розташування АК впливає на похибку вимірювання витрати: зокрема, у [6, 7] досліджено лише два класичні методи, побудовані на базі числових методів інтегрування (ЧМІ) Гауса і Чебишева; в [9, 10] досліджено класичний метод, побудований на базі ЧМІ Гауса-Якобі, та застосовано його для апробації нових методів — *OWICS* [10] та метод *Zheng-Zhao-Mei* [9].

2. Необхідно дослідити вплив кількості АК на характеристики УЗВ для широкого діапазону зміни кількості каналів: у роботі [8] серед досліджених

схем розташування АК УЗВ представлено лише одну двоканальну хордову схему; в [6] досліджено лише чотириканальну хордову схему розташування АК УЗВ, у [9] — дво- та чотириканальну.

3. Необхідно провести дослідження похибки УЗВ для більшої кількості функцій *Salami*: в [9] досліджено лише дві функції *Salami* (P01 та P09); у [6] — лише функцію *Salami* (P09), в [10] — лише функцію *Salami* (P01), а в [11] — лише функцію *Salami* (P08). У наведених працях не обґрунтовано вибору саме цих функцій для дослідження похибки УЗВ.

4. Необхідно дослідити саме відносну похибку вимірювання витрати УЗВ, зумовлену спотворенням структури потоку: у [8] оцінено лише параметри чутливості конфігурацій УЗВ до асиметричності потоку (коефіцієнти гідродинамічний, чутливості орієнтації, діапазону орієнтації); в [11] використовується наближена формула оцінення діапазону значень похибки без детального описання методики визначення цієї похибки.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

Для обчислення об'ємної витрати багатоканального УЗВ з хордовим розташуванням АК застосовують рівняння [10]:

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

де q_{USM} — об'ємна витрата; R — внутрішній радіус корпусу УЗВ; $x(i)$, $w(i)$ — координата розташування та ваговий коефіцієнт i -го хордового АК УЗВ; $u_n(i)$ — середня швидкість потоку вздовж i -го хордового АК УЗВ; N — кількість хордових АК УЗВ. Для реалізації рівняння (1) необхідно визначити умовно-постійні для кожного УЗВ параметри $x(i)$ та $w(i)$, а також значення середньої швидкості потоку $u_n(i)$ вздовж кожного хордового АК.

Згідно з [12] значення $w(i)$ можуть бути постійними або змінними. У цій роботі ми розглядаємо випадок застосування багатоканальних УЗВ, коли $x(i)$ та $w(i)$ є константами. Для вибору постійних значень $x(i)$ та $w(i)$ у практиці розроблення УЗВ використовують методи, побудовані на базі класичних [12] та удосконалених ЧМІ [10]. Для повноти досліджень доцільно порівняти три класичні та один удосконалений методи визначення координат розташування та вагових коефіцієнтів хордових АК УЗВ, а саме:

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

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

Таблиця 1. Координати розташування $x(i)$ та вагові коефіцієнти $w(i)$ АК УЗВTable 1. Location coordinates $x(i)$ and the weights $w(i)$ AP USM

N	Чебишева [14]		Гауса [14]		Гауса-Якобі [14]		OWICS [10]	
	$x(i)$	$w(i)$	$x(i)$	$w(i)$	$x(i)$	$w(i)$	$x(i)$	$w(i)$
2	$\pm 0,5774$	1	$\pm 0,5774$	1	$\pm 0,5$	0,9069	$\pm 0,4880$	0,8908
3	$\pm 0,7071$	2/3	$\pm 0,7746$	0,5555	$\pm 0,7071$	0,5554	$\pm 0,6956$	0,5537
	0	2/3	0	0,8888	0	0,7854	0	0,7687
4	$\pm 0,7947$	0,5	$\pm 0,8610$	0,3479	$\pm 0,8090$	0,3693	$\pm 0,7996$	0,3719
	$\pm 0,1876$	0,5	$\pm 0,3400$	0,6521	$\pm 0,3090$	0,5976	$\pm 0,3038$	0,5882
5	$\pm 0,8325$	2/5	$\pm 0,9062$	0,2369	$\pm 0,8660$	0,2618	$\pm 0,8585$	0,2654
	$\pm 0,3745$	2/5	$\pm 0,5385$	0,4786	$\pm 0,5$	0,4535	$\pm 0,4933$	0,4489
	0	2/5	0	0,5688	0	0,5236	0	0,5158
6	$\pm 0,8662$	2/6	$\pm 0,9325$	0,1713	$\pm 0,9010$	0,1947	$\pm 0,8949$	0,1984
	$\pm 0,4225$	2/6	$\pm 0,6610$	0,3608	$\pm 0,6235$	0,3509	$\pm 0,6167$	0,3489
	$\pm 0,2666$	2/6	$\pm 0,2386$	0,4679	$\pm 0,2225$	0,4375	$\pm 0,2197$	0,4321

3. Класичний метод на базі ЧМІ Гауса-Якобі (Гауса-Чебишева 2-го порядку). В закордонній літературі цей метод інколи називають метод *Westinghouse* [6].

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

Детальну методикою розрахунку $x(i)$ та $w(i)$ на базі класичних та удосконаленого методів із використанням ЧМІ наведено в [10, 13]. Значення $x(i)$ та $w(i)$, обчислені за методикою [13] для кількості АК $N = 1 \dots 6$ для перелічених вище методів, наведено в таблиці 1. Наявність таблиці 1 дає можливість реалізувати рівняння (1) для УЗВ з кількістю каналів від 2 до 6-ти.

Значення середньої швидкості потоку $u_h(i)$ вздовж кожного хордового АК може бути визначено на основі профілю швидкості потоку в поперечному перерізі ВТ. Як зазначено вище, для побудови профілю швидкості потоку пропонується застосувати емпірично отримані аналітичні функції розподілу швидкості спотвореного потоку в перерізі ВТ — функції швидкості *Salami*. Ці функції отримано за такою методикою [2]:

1. Будь-який профіль швидкості спотвореного потоку, що протікає через ВТ циліндричної форми, представлено як суму двох компонент — основної (симетричної, u_{sym}) та поліноміальної (асиметричної, u_{asym}):

$$u_{SAL} = u_{sym} + u_{asym}. \quad (2)$$

2. Симетричну складову швидкості u_{sym} за турбулентного режиму течії визначено за спрощеним степеним законом розподілу:

$$u_{sym} = (1 - r(j))^n, \quad (3)$$

де n — показник степеня, як один із чинників, що характеризує профіль швидкості потоку і залежить від

числа Рейнольдса; $r(j)$ — радіальна координата j -тої точки поперечного перерізу ВТ.

3. Для описання поліноміальної компоненти швидкості u_{asym} застосовують різні вирази, зокрема, у цій роботі застосовано вираз:

$$u_{asym} = mr(1 - r(j))^{\frac{1}{n}} f(\theta(j)), \quad (4)$$

де m — чинник форми профілю; f — певна модельна функція; $\theta(j)$ — кутова координата j -тої точки поперечного перерізу ВТ. Формула (4) описує лише одноядерний (*one peak*) тип функцій швидкості *Salami*, хоча серед них зустрічаються також двоядерні (*two peaks*) та багатоядерні (*more complex*) [2, 8]. Вибір у цій роботі саме одноядерних функцій швидкості *Salami* зумовлений тим, що вони описують спотворення структури потоку, що виникають після одиночних колін та їх комбінацій, найбільш розповсюджені МО.

За наведеною вище методикою отримано функції швидкості *Salami* [2], які описують кінематичну структуру спотвореного потоку після найпоширеніших типів МО (коліна, групи колін, завихрювачі тощо). Кожна функція *Salami* є залежністю відносної швидкості u/u_{max} від відносного радіуса r/r_{max} ($r_{max} = R$) та кутової координати θ , а отже, дає можливість обчислити значення швидкості у довільній точці перерізу ВТ, зокрема, і вздовж АК.

На основі значень швидкості потоку вздовж АК можна обчислити середню швидкість потоку вздовж i -го хордового АК УЗВ за формулою [5]:

$$u_h(i) = \frac{1}{T_h(i)} \left[\int_0^{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} u_{SAL}(\sqrt{x(i)^2 + l^2}, \alpha + \arctg(l/x(i))) dl + \int_0^{\sqrt{R^2 - x(i)^2}} u_{SAL}(\sqrt{x(i)^2 + l^2}, \alpha - \arctg(l/x(i))) dl \right], \quad (5)$$

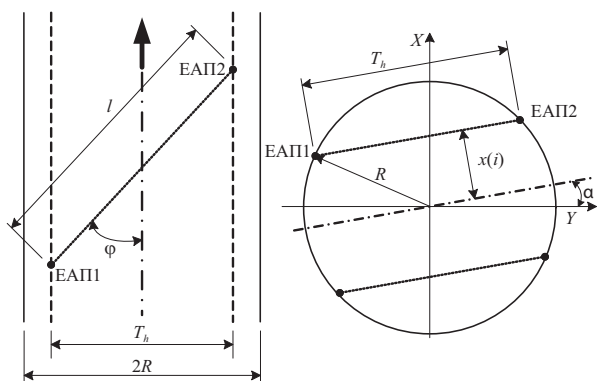


Рис.1. Спрощена схема розташування хордових АК УЗВ
Fig.1. Simplified scheme location chordal AP USM

де u_{SAL} — одна із 24 аналітичних функцій швидкості *Salami*; $T_h(i) = 2\sqrt{R^2 - x(i)^2}$ — ширина площини, в якій проходить i -тий хордовий АК УЗВ; l — довжина хордового АК УЗВ; α — кут повороту площини, в якій проходить хордовий АК УЗВ, відносно горизонтальної площини (рис. 1). У цій роботі кут $\alpha = 0^\circ$, оскільки це найбільш типове розташування хордових УЗВ [12].

Формулу (5) отримано на основі схеми розташування АК УЗВ, зображеної на рис. 1.

Результати обчислення витрати за рівнянням (1) на основі значень $x(i)$ та $w(i)$, наведених у таблиці 1, та середніх значень швидкості за кожним АК, отриманих за формулою (5), відрізняться від витрати, обчисленої прямим інтегруванням профілю швидкості неспотвореного потоку. Це спричинено похибкою інтегрування профілю швидкості за обмеженим числом точок (швидкостей потоку за кожним АК). Під час виготовлення УЗВ цей ефект усувається шляхом визначення калібрувальної кривої — залежності калібрувального коефіцієнта від витрати (або числа Рейнольдса) [12]. У цій статті авторами пропонується визначити аналогічний до реальних УЗВ калібрувальний коефіцієнт як додатковий множник у рівнянні об'ємної витрати УЗВ (1). Визначення калібрувального коефіцієнта k_{cal} пропонується виконувати для умов неспотвореного потоку за формулою:

$$k_{cal} = \frac{q}{q_{USM}} = \frac{2\pi \cdot \int_0^l (r \cdot u_{sym}) dr}{\pi R^2 \sum_{i=1}^N \left((2\sqrt{R^2 - x(i)^2} / \pi R) w(i) u_h(i) \right)}, \quad (6)$$

де q — точне значення об'ємної витрати, отримане прямим інтегруванням профілю швидкості неспотвореного потоку [2].

Зважаючи на те, що формулу (6) застосовуємо для неспотвореного потоку, для якого асиметрична складова швидкості відсутня, точне значення витрати у чисельнику формули (6) обчислене шля-

хом інтегрування симетричної складової швидкості у функції *Salami*. Швидкість $u_h(i)$ у формулі (6) визначається за формулою (2) із урахуванням того, що $u_{asym} = 0$, тобто $u_{SAL} = u_{sym}$. Із урахуванням калібрувального коефіцієнта рівняння (1) приймає вид:

$$q_{USM} = \pi R^2 k_{cal} \sum_{i=1}^N \left((2\sqrt{R^2 - x(i)^2} / \pi R) w(i) u_h(i) \right). \quad (7)$$

Уведення у формулу (1) калібрувального коефіцієнта k_{cal} дає можливість усунути похибку інтегрування неспотвореного профілю швидкості потоку, сформованого складовою u_{sym} . Отже, застосовуючи рівняння (7) для обчислення витрати спотвореного потоку, маємо можливість оцінити додаткову похибку, яка власне виникає внаслідок спотворення кінематичної структури потоку. Додаткову відносну похибку вимірювання витрати, зумовлену спотворенням структури потоку, обчислено за формулою:

$$\delta_A = ((q_{USM} - q_{SAL}) / q_{SAL}) \cdot 100, \quad (8)$$

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

$$q_{SAL} = \int_0^{2\pi} \left(\int_0^1 r \cdot u_{SAL}(r, \theta) dr \right) d\theta. \quad (9)$$

Для досліджень похибки δ_A у цій роботі використано лише одноядерні функції швидкості *Salami*, а саме P01, P06, P08, P09, P12, P13, P17 [2, 8]. Ці функції відтворюють профілі спотвореного потоку після місцевих опорів, зокрема, таких, які складаються із різних комбінацій колін. Аналітичні вирази цих функцій та безрозмірні значення витрати q_{SAL} , обчислені за формулою (9) для кожної з них, наведено у таблиці 2.

Дослідження додаткової похибки вимірювання витрати, зумовленої спотворенням структури потоку, виконано для багатоканальних УЗВ за такою методикою:

1) застосовуючи отримані значення координат розташування АК $x(i)$ та їх вагових коефіцієнтів $w(i)$ (табл. 1) із узагальненого рівняння (1) отримано рівняння витрати для фіксованого значення кількості каналів N ;

2) для цього рівняння за формулою (6) обчислено значення калібрувального коефіцієнта, що відповідає умовам неспотвореного потоку; за розрахунком k_{cal} за формулою (6) необхідно враховувати: тип функції швидкості *Salami*, який впливає на значення величини n (для одноядерних функцій *Salami* n дорівнює 7 і 9 [2, 8]); кількість АК УЗВ N ; метод розрахунку $x(i)$ та $w(i)$ АК УЗВ згідно з табл.1. Результат розрахунку k_{cal} для різних вхідних даних наведено у таблиці 3.

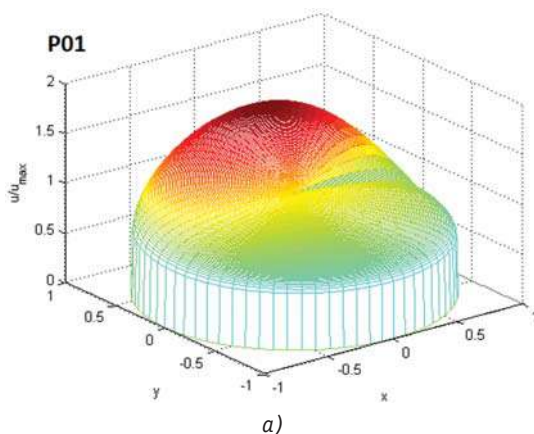
Таблиця 2. Одноядерні функції швидкості Salami
Table 2. Salami one-peak functions of speed

Функція	Аналитичний вираз функції	q_{SAL}
P01	$u = (1-r)^{\frac{1}{9}} + 3,317r(1-r)^{0,5} e^{-0,5\theta} \sin \theta$	3,0655
P06	$u = (1-r)^{\frac{1}{9}} - \frac{0,5}{\pi} r(1-r)^{\frac{1}{4}} \theta \sin \theta$	2,8974
P08	$u = (1-r)^{\frac{1}{9}} + \frac{0,04}{\pi} r(1-r)^{\frac{1}{4}} (\theta^2 - 1)(1 - \cos \theta)^2$	2,9322
P09	$u = (1-r)^{\frac{1}{9}} + \frac{2}{\pi^5} r(1-r)^{\frac{1}{4}} \theta^2 (2\pi - \theta)^2$	3,1454
P12	$u = (1-r)^{\frac{1}{7}} + \frac{e^{0,1\pi}}{2} r(1-r)^{\frac{1}{9}} e^{-0,2\theta} \theta \sin \theta$	2,6948
P13	$u = (1-r)^{\frac{1}{7}} - \frac{e^{0,1\pi}}{2} r(1-r)^{\frac{1}{9}} e^{-0,2\theta} \theta \sin \theta$	2,4366
P17	$u = (1-r)^{\frac{1}{7}} - \frac{0,4}{\pi} r(1-r)^{\frac{1}{9}} \theta \sin \theta$	2,7849

Таблиця 3. Значення калібрувального коефіцієнта k_{cal}
Table 3. Value of the calibration coefficient k_{cal}

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

3) для функції Salami, яку вибрано для дослідження (табл. 2), обчислено значення середньої швидкості потоку вздовж i-го хордового АК УЗВ $u_h(i)$



за формулою (5), та за формулою (7) обчислено значення витрати газу, вимірюваної УЗВ;

4) за формулою (8) обчислено значення відносної похибки вимірювання витрати для УЗВ із різною кількістю та різним розташуванням АК (за застосування різних методів обчислення $x(i)$ та $w(i)$);

5) на основі залежностей додаткової похибки вимірювання витрати від кількості АК УЗВ зроблено висновок щодо мінімальної кількості АК. За умову визначення мінімальної кількості АК УЗВ прийнято вимоги ISO 17089-1 [13, пп. 5.9.3.2] стосовно того, що максимальна додаткова похибка, зумовлена спотворенням структури потоку, не повинна перевищувати значення 0,3 %:

$$|\delta_{A(N)}^{\max} - \delta_{A(N+1)}^{\max}| < 0,3\% \quad (10)$$

Результати дослідження додаткової похибки δ_A наведено на рис. 2—4.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- Основними факторами впливу на додаткову похибку δ_A є: тип спотворень структури потоку, кількість АК, їх розташування. Збільшення кількості АК та їх правильне розташування дають можливість зменшити вплив спотворень структури потоку на значення похибки δ_A .
- Для розглянутих семи профілів спотвореного потоку (семи одноядерних функцій швидкості

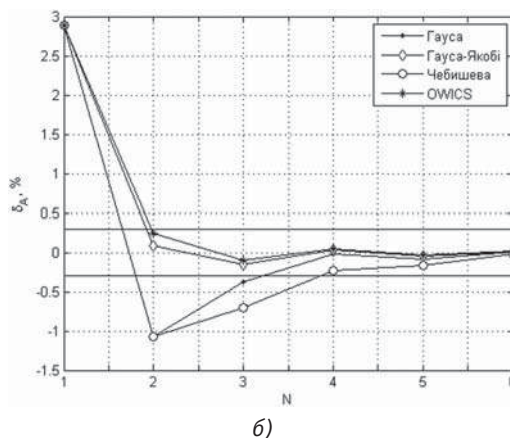


Рис. 2. Результати дослідження додаткової похибки δ_A для функції P01:
а) 3D профіль функції P01; б) залежність похибки δ_A від N ($\alpha = 0^\circ$)
Fig. 2. Research results of additional error δ_A for function P01:
а) 3D profile functions P01; б) dependence δ_A error from N ($\alpha = 0^\circ$)

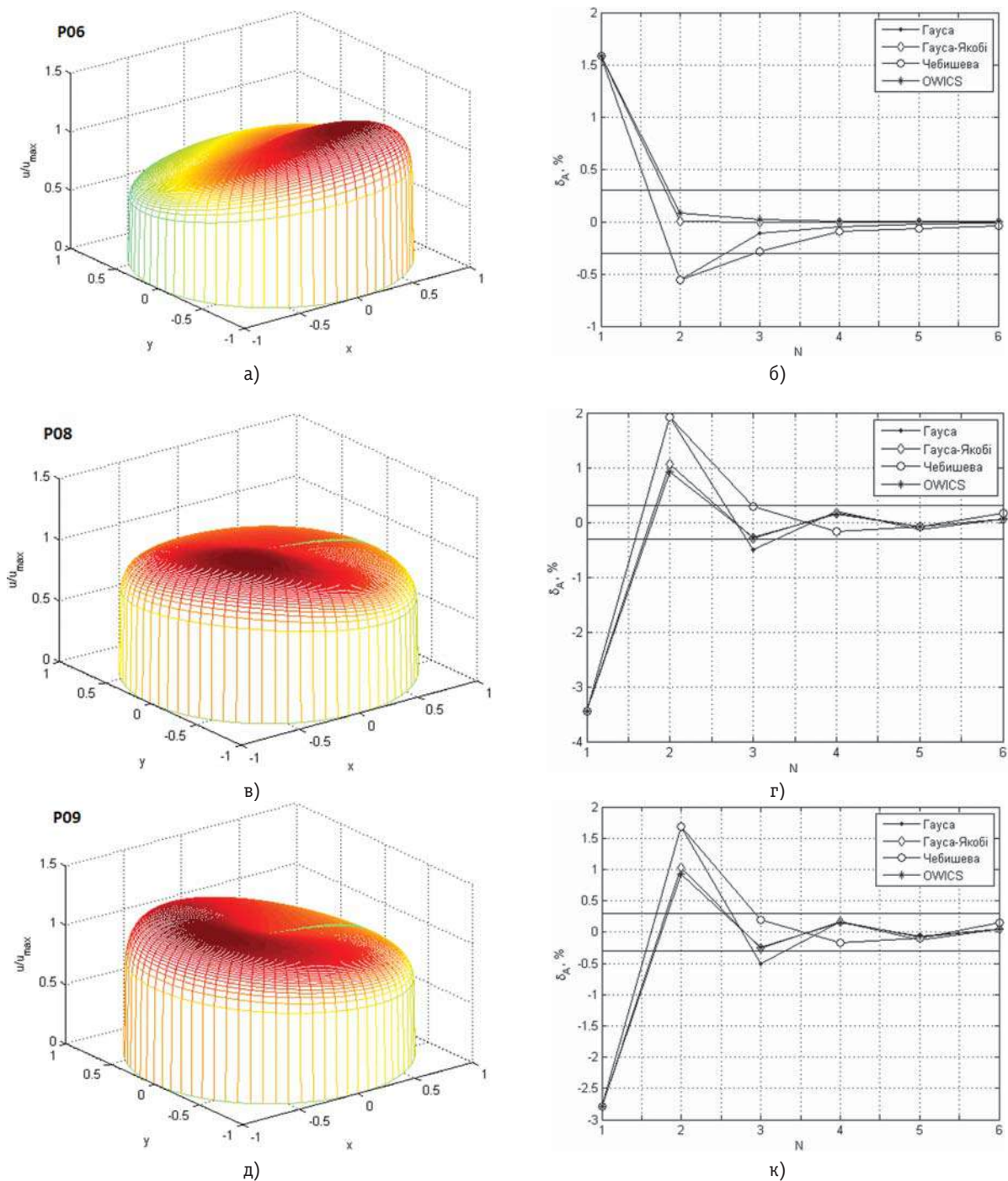


Рис. 3. Результати дослідження додаткової похибки δ_A для функцій P06, P08, P09:

a), в), д) 3D профілі відповідних функцій; б), г), к) залежність похибки δ_A від N ($\alpha = 0^\circ$) для відповідної функції

Fig. 3. Research results of additional error δ_A for functions P06, P08, P09:

a), в), д) 3D profiles corresponding functions; б), г), к) dependence δ_A error from N ($\alpha = 0^\circ$) for corresponding functions

Salami) лише УЗВ із кількістю АК $N \geq 4$ задовольнятимуть вимогу (10) щодо додаткової похибки δ_A . Для таких УЗВ вибір методу визначення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК незначно впливає на результат вимірювання витрати за умов спотвореного потоку. Для більшості практичних задач збільшення кількості АК до значень, більших за 4, не є доцільним, оскільки ускладнює конструк-

цію, але при цьому значення похибки δ_A порівняно з $N = 4$ зменшується незначно ($\pm 0,1\%$).

3. За кількості АК $N < 4$ вибір методу визначення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК значною мірою впливає на значення похибки δ_A . За результатами дослідження похибки δ_A за $N < 4$, її найменші значення вдалося отримати за застосування методів визначення координат розташування

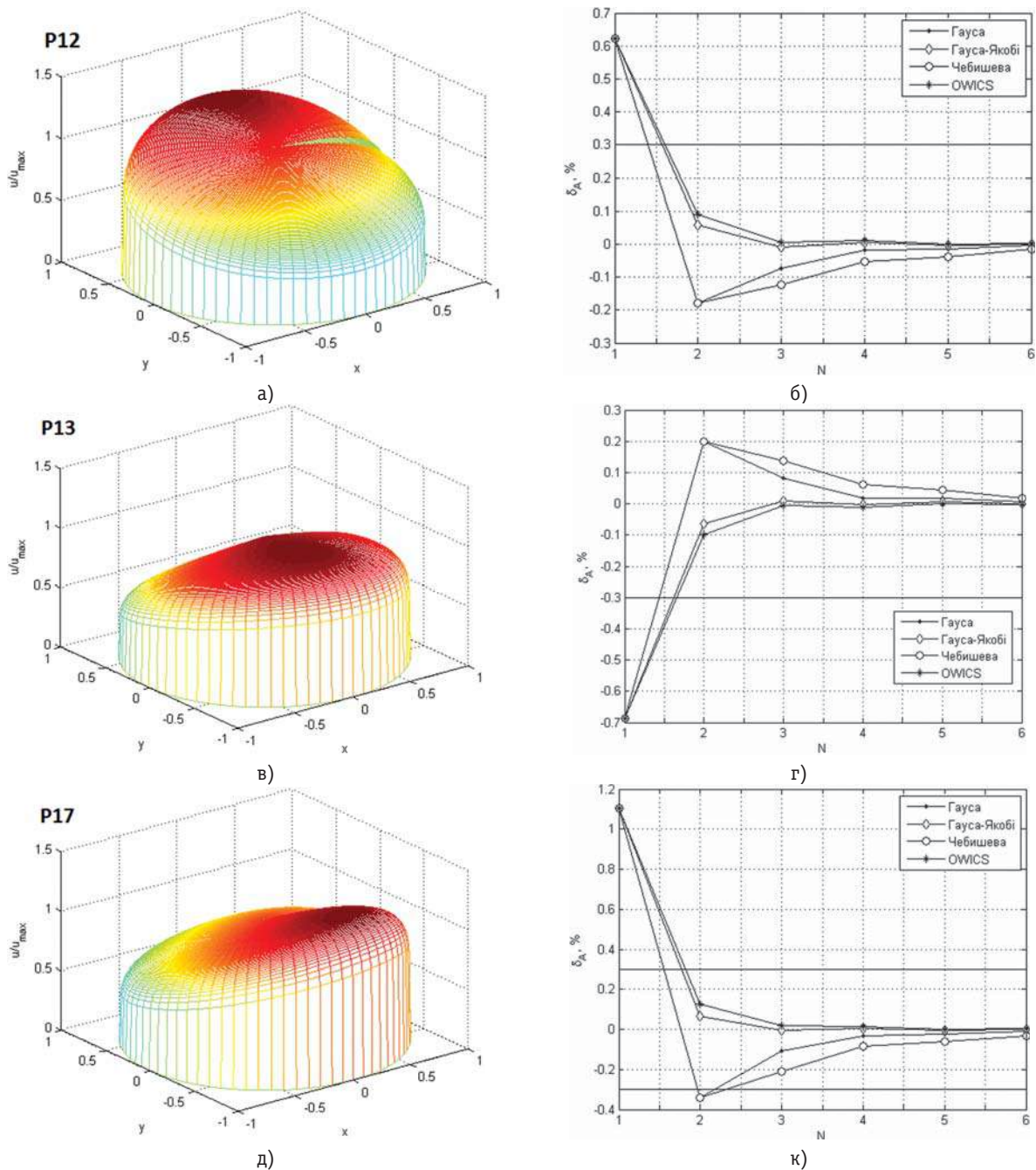


Рис. 4. Результати дослідження додаткової похибки δ_A для функцій P12, P13, P17:

а), в), д) 3D профілі відповідних функцій; б), в), к) залежність похибки δ_A від N ($\alpha = 0^\circ$) для відповідної функції

Fig. 4. Research results of additional error δ_A for functions P12, P13, P17:

а), в), д) 3D profiles corresponding functions; б), в), к) dependence δ_A error from N ($\alpha = 0^\circ$) for corresponding functions

та вагових коефіцієнтів АК на базі ЧМІ Гауса-Якобі та удосконаленого методу OWICS. Застосування цих двох методів дає можливість задовольняти вимоги (10) щодо похибки УЗВ, навіть для кількості АК $N = 3$.


У подальшому доцільним є дослідження похиб-

ки δ_A для дво- та багатоядерних функції швидкості *Salami*. Виконання таких досліджень дає можливість удосконалити конструкцію УЗВ на стадії їх проектування для зменшення додаткової похибки вимірювання витрати за умов спотвореної структури потоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества : справочник / П.П. Кремлевский;

[гл. ред. Е. А. Шорников]. — Изд. 5-е. — СПб. : Политехника (Kremlevskii P.P. Flow and volume meters

- for fluids: Handbook / P.P. Kremlevskii; [gl. red. E.A. Shchornikov]. — Izd. 5-e. — SPb.: Politekhnik, 2004. — 412 с/р (Russian).
2. Salami, L.A. (1984). Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes. *Trans. Inst. Meas. Control*, 6, 197—206.
 3. Дорожовець М.М. Теоретичний аналіз просторового розподілу швидкості руху рідини за допомогою функцій Саламі для багатоканального ультразвукового витратоміра / М.М. Дорожовець, А.В. Семенистий // Вісник НУ«ЛП»: Автоматика, вимірювання та керування (Dorozhovets M.M. Theoretical analysis of the spatial distribution of the fluid velocity using functions Salami for multi-path ultrasonic flowmeter / M.M. Dorozhovets, A.V. Semenystyi // *Bulletin of LPNU : Automation, measurement and control*). — 2004. — № 500. — С/Р. 131—134 (Ukrainian).
 4. Коробко І.В. Оцінка асиметрії потоку рідини при вимірюванні її витрати та кількості / І.В. Коробко, Я.В. Волинська // Вісник НТУУ «КПІ»: Серія «Приладобудування» (Korobko I.V. Assessment of fluid flow asymmetry in the measurement of flow rate and volume / I.V. Korobko, Ya.V. Volynska // *Bulletin of NTUU «KPI»: Series of «Instrument engineering»*). — 2013. — № 45. — С/Р. 91—98 (Ukrainian).
 5. Маслобоев Ю.П. Характеризация возмущенных потоков на основе данных ультразвуковых измерений с использованием набора базисных функций Салами / Ю.П. Маслобоев, С.В. Ручкин, М.Н. Рычагов // Труды Нижегородской акустической научной сессии: ННГУ (Masloboev Ju.P. Characterization of perturbed streams based on ultrasonic measurements using a set of basis functions Salami / Ju.P. Masloboev, S.V. Ruchkin, M.N. Rychagov // *Proceedings of the Nizhny Novgorod acoustic scientific session: UNN*). — 2002. — С/Р. 388—390 (Russian).
 6. Zanker, K.J. (1999, 25-28 October). The effects of Reynolds number, wall roughness, and profile asymmetry on single- and multi-path ultrasonic meters. Paper presented at the Proceedings of XVII International North Sea Flow Measurement Workshop, Oslo, Norway, 117—129.
 7. Демідов І. Вимірювання витрати води багатоканальними ультразвуковими витратомірами / І. Демідов, В. Поджаренко // Вісник НУ«ЛП»: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація (Demidov I. Measuring of water flow multipath ultrasonic flowmeters / I. Demidov, V. Podzharenko // *Bulletin of LPNU: Heat Power Engineering. Environmental Engineering. Automation*). — 2003. — № 476. — С/Р. 76—81 (Ukrainian).
 8. Moore, P.L., Brown, G.J., and Stimpson, B.P. (2000). Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology. *Meas. Sci. Technol.*, 11, 1802—1811.
 9. Dandan Zheng, Dan Zhao, and Jianqiang Mei. (2015). Improved numerical integration method for flowrate of ultrasonic flowmeter based on Gauss quadrature for non-ideal flow fields. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 28—35.
 10. Tresch, T., Gruber, P., & Staubli, T. (2006, July 30 — August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA.
 11. Duffell, C.J., Brown, G.J., Barton, N.A., and Stimpson, B.P. (2003, 25-28 March). Using optimization algorithms and CFD to improve performance of ultrasonic flowmeters. Paper presented at the Proceedings of II International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, Kuala Lumpur, Malaysia.
 12. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
 13. Роман В.І. Визначення вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів / В. І. Роман, Ф. Д. Матіко // Метрологія та прилади (Roman V.I. Definition of weighting coefficients of acoustic channels for ultrasonic flowmeters / V.I. Roman, F.D. Matiko // *Metrology and devices*). — 2014. — № 3(47). — С/Р. 11—20 (Ukrainian).
 14. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). Handbook of mathematical function. New York, NY: NBS. 

Отримано: 06.04.2017.

Стаття рекомендована д.т.н., проф. Є.П. Пістунюм, Україна
 Prof. E.P. Pistun, D. Sc. (Techn.) has recommended this article, Ukraine.

УДК 681.2.08:53.088; УДК 620.179.14

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПОХИБКУ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АПАРАТУ FUZZY-LOGIC

С. Григоренко, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних і радіоелектронних систем контролю та діагностики,

І. Григоренко, кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Розглянуто методи розв'язання науково-практичної задачі підвищення точності виявлення дефектів металевих виробів за допомогою апарату FUZZY-logic. Проаналізовано фактори, що впливають на точність виявлення дефектів та доведено можливість застосування апарату теорії нечітких множин для визначення таких параметрів вихрострумowego перетворювача, які нададуть можливість мінімізувати похибку за визначення дефекту. Проведено комп'ютерне моделювання, яке підтвердило практичні дані, отримані на реальному вихрострумowego перетворювачі.

The paper considers methods for solving scientific and practical tasks of increasing the accuracy of detecting of metal products through vehicle fuzzy-logic. Factors affecting the accuracy of defects of metal products and proved the applicability of the apparatus of

fuzzy sets to determine parameters such eddy current transducer that will minimize the possibility of error in determining the defect. Computer simulation, which confirmed the practical data received in real-eddy-current converters, which led to the conclusion about the possibility of using fuzzy-logic under development and design of eddy current transducers to create the necessary accuracy characteristics.

In practical applications of the eddy current flow detector, an important parameter is the signal-to-noise ratio. In addition to the amplitude of the useful signal from an eddy current transducer, this characteristic is due to industrial electromagnetic interference, the characteristics of the measurement schemes, the losses in the cable that connects the sensor and the device. Therefore, research and development of methods and means of increasing the signal-to-noise ratio in eddy current flow detection is an urgent task.

Ключові слова: вихрострумовой перетворювач, похибка, нечітка логіка, вимірювальна обмотка, дефектоскопія, точність.
Keywords: test eddy current transducer, error, FUZZY-logic, measuring winding, inspection, precision.

Особливе місце серед методів неруйнівного контролю металевих виробів посідають вихроструміві методи для вирішення різнопланових задач дефектоскопії, товщиномерії [1]. Для здійснення сучасної вихрострумовой дефектоскопії застосовують широку номенклатуру серійних приладів.

За практичного застосування вихрострумowego дефектоскопа важливим параметром є значення відношення сигнал-шум. Окрім амплітуди корисного сигналу з вихрострумowego перетворювача, ця характеристика зумовлена індустріальними електромагнітними завадами, характеристиками схем вимірення, втратами у кабелі, що з'єднує датчик і прилад. Тому дослідження й розроблення методів і засобів підвищення співвідношення сигнал-шум за вихрострумовой дефектоскопії є актуальним завданням [2]. Для вирішення завдання пропонується використовувати апарат теорії нечітких множин (системи *FUZZY-logic*) [3].

У роботах [4—7] зазначено, що на сьогодні у промисловості за проведення контролю металевих виробів за допомогою вихрострумowych перетворювачів (ВСП) виконують сканування поверхні за різними схемами і з різним кроком, які регламентуються технічною документацією. Вихідний сигнал ВСП вимірявся за послідовного переміщення датчика відносно дефекту, а координата *x* визначається за місцем розташування центра вихрострумowego перетворювача. Зазор підтримується постійним.



С. Григоренко



І. Григоренко

Для впевненості у тому, що дефект виявлятиметься із заданою точністю, потрібно визначити допуск на параметри контролю, а також на параметри поля ВСП.

Наявність мінімальних та максимальних значень параметрів контролю надає можливість, для підвищення вірогідності виявлення дефекту металевих виробів, використовувати апарат теорії нечітких розмитих множин (системи *FUZZY-logic*) для побудови системи ситуаційного реагування, що стежить за метрологічною ситуацією [8, 9]. Нечіткий аналіз визначається у часовій області й не має ніяких обмежень, тоді як традиційний аналіз придатний лише в межах певних частотних границь.

Отже, є можливим розв'язати задачу визначення таких параметрів вихрострумів перетворювачів, та умов їх використання, що дадуть мінімальне значення похибки за визначення дефекту саме за допомогою апарату *FUZZY-logic* [3]. Такими параметрами вважатимемо струм вихрострумів перетворювача та кут розміщення вимірювальної обмотки датчика відносно поверхні з дефектом.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ

У роботі [4] досліджено залежність вихідного сигналу ВСП від координати переміщення x за поверхнею об'єкта контролю (ОК). На рис. 1 представлено схему переміщення ВСП за поверхнею ОК щодо дефекту.

Сигнал вимірюється за послідовного переміщення датчика щодо дефекту, а координата x визначалася за місцем розташування центра ВСП. Зазор підтримувався постійним. Вимірення проведено за частоти збудивого струму 100 кГц. Експерименти проводилися на плоскому зразку із вуглецевої сталі зі штучним дефектом у виді пазу, виконаного електроерозійним способом.

Дефект мав такі параметри: довжина — 100 мм, розкриття — 0,4 мм, глибина — 3 мм.

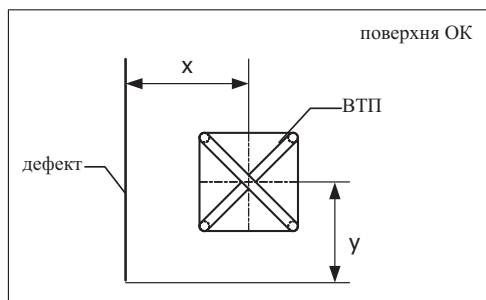


Рис. 1. Схема переміщення ВСП за поверхнею ОК відносно дефекту

Fig. 1. Scheme for the displacement of an eddy current transducer on the surface of a controlled object with a defect



Рис. 2. Зовнішній вид вихрострумівого дефектоскопа
Fig. 2. Appearance of the eddy current flaw detector

На рис. 2 подано зовнішній вид розробленого вихрострумівого дефектоскопа [4]. Прилад складається з електронного блоку й підключеного до нього ВСП. Електронний блок дефектоскопа виконано у виді приладу переносного типу.

Для проведення моделювання впливу обраних факторів на похибку визначення дефекту у системі *FUZZY-logic* задаємося діапазонами їх зміни: для кута розміщення вимірювальної обмотки датчика відносно поверхні з дефектом — від 0 до 90 °; для струму вихрострумівого перетворювача — від 0 до 10 А, для амплітудного значення похибки вихідного сигналу — від 2 до 10 мВ. У процесі проведення контролю неможливо зовсім виключити похибку, але можливо підібрати такі параметри й умови, за яких отримаємо мінімальне значення похибки.

Нечіткі змінні: вхідна x і вихідна y , — суб'єктивно характеризуються функціями належності $\mu_x(x)$ і $\mu_y(y)$. Щоби характеризувати величину відхилення від бажаного значення за моделювання розкиду параметрів перетворювача введемо функцію належності (ФН). Діапазони зміни струму вихрострумівого перетворювача та кута розміщення обмоток датчика відносно поверхні з дефектом характеризуються відповідно ФН $\mu_I(I)$ й $\mu_\alpha(\alpha)$, які утворюють векторну ФН. Нечітка зміна на виході $y(\Delta)$ характеризується ФН $\mu_y(y, \Delta)$, що може бути функцією від t , інтервалом або просто скалярною функцією. Процедура прийняття рішення за допомогою теорії нечітких множин складається із трьох етапів: фазифікації, обчислення правил і дефазифікації. Результат роботи блока фазифікації — масив нечітких виходів, які є набором пар: лінгвістичних термів (ЛТ) та їх значень вірогідності. Наступний етап — обчислення правил. Дефазифікація — це заключний крок в алгоритмі нечіткої логіки (НЛ), за якого відбувається перетворення нечіткої інформації, що утримується у виді значень вірогідності ЛТ, у чітко певне

значення. Дефазіфікація виробляється за фігурою, отриманою шляхом додавання всіх ФН термів вихідної лінгвістичної змінної (ЛЗ). У результаті отримаємо фігуру, центр ваги якої дає оптимальні параметри I та α для визначення амплітудного значення похибки вихідного сигналу.

Для побудови системи ситуаційного реагування використаємо інтерфейс користувача системи FUZZY-logic. У моделі повинні бути два входи і один вихід. Як перший вхід обираємо кут розміщення вимірювальної обмотки датчика відносно поверхні з дефектом (*angle*), а другий вхід — це струм вихрострумowego перетворювача (*current*). Як вихідну величину обираємо амплітудне значення похибки вихідного сигналу (*error signal*) (рис. 3).

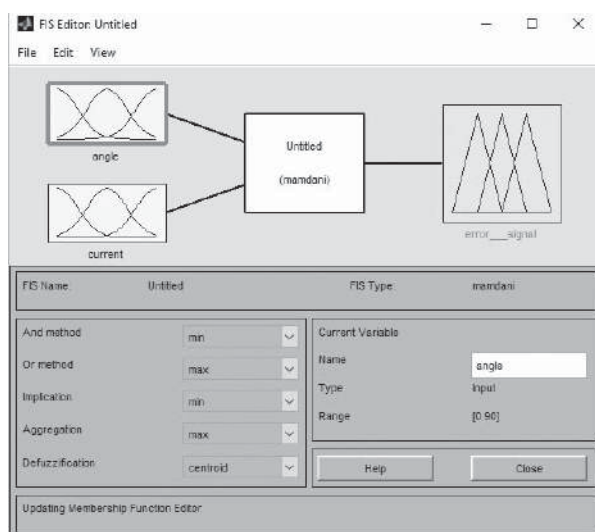


Рис. 3. Вікно задання вхідних та вихідних параметрів
Fig. 3. Input and output parameters window

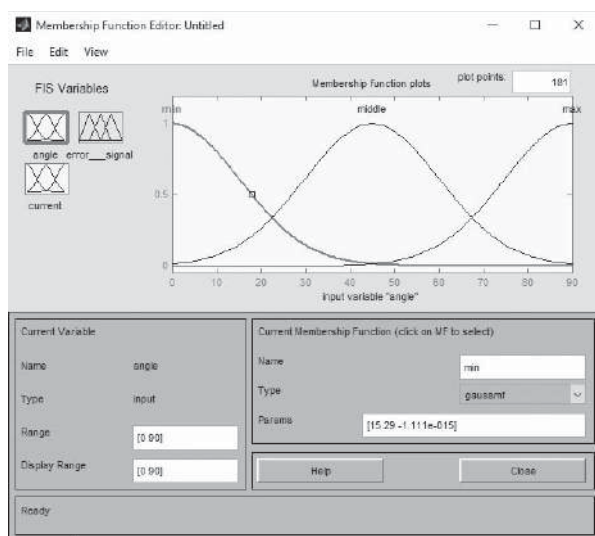


Рис. 4. Вікно задання параметрів кута розміщення вимірювальної обмотки датчика відносно поверхні з дефектом

Fig. 4. Window for specifying the angle angle of the measuring sensor winding relative to the defect surface

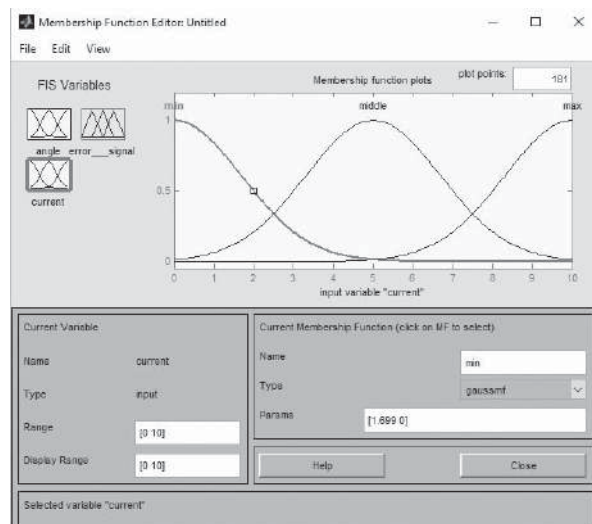


Рис. 5. Вікно задання параметрів струму вихрострумowego перетворювача
Fig. 5. Window for setting the parameters of the converter

Задаємо ФН для обраної змінної — кут розміщення вимірювальної обмотки датчика відносно поверхні з дефектом. У пункті *Range* встановимо діапазон, у якому змінюється функція (від 0 до 90 °). Задаємо тип ФН у графі *Type*: для трьох ФН, а саме, мінімальної (*min*), середньої (*middle*) та максимальної (*max*) обираємо розподіл Гауса (рис. 4).

Задаємо ФН для обраної змінної — струм вихрострумowego перетворювача. У пункті *Range* встановимо діапазон, у якому змінюється функція (від 0 до 10 А). Задаємо тип ФН у графі *Type*: для трьох ФН, а саме мінімальної (*min*), середньої (*middle*) та максимальної (*max*) обираємо розподіл Гауса (рис. 5).

Задаємо ФН для обраної змінної — амплітудне значення похибки вихідного сигналу. У пункті *Range* встановимо діапазон, у якому змінюється функція (від 2 до 10 мВ). Задаємо тип ФН у графі *Type*: для трьох функцій належності, а саме, мінімальної (*min*), середньої (*middle*) та максимальної (*max*) обираємо розподіл Гауса (рис. 6).

Задаємо правила, за якими діятиме модель.

Правила складаються за моделлю:

$$\begin{aligned}
 n_1 &: \text{ЯКЩО } [x \in A_1] \text{ ТА } [y \in B_1], \text{ ТО } [z \in C_1], \\
 n_2 &: \text{ЯКЩО } [x \in A_2] \text{ ТА } [y \in B_2], \text{ ТО } [z \in C_2], \\
 n_3 &: \text{ЯКЩО } [x \in A_3] \text{ ТА } [y \in B_3], \text{ ТО } [z \in C_3],
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де x, y, z — іменні вхідні (вихідні) лінгвістичні змінні, $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ — деякі нечіткі множини, що описуються своїми ФН.

1. Якщо кут «мінімальний» та струм «максимальний», то похибка сигналу «максимальна».
2. Якщо кут «середній» та струм «середній», то похибка сигналу «середня».

3. Якщо кут «максимальний» та струм «мінімальний», то похибка сигналу «мінімальна» (рис. 7).

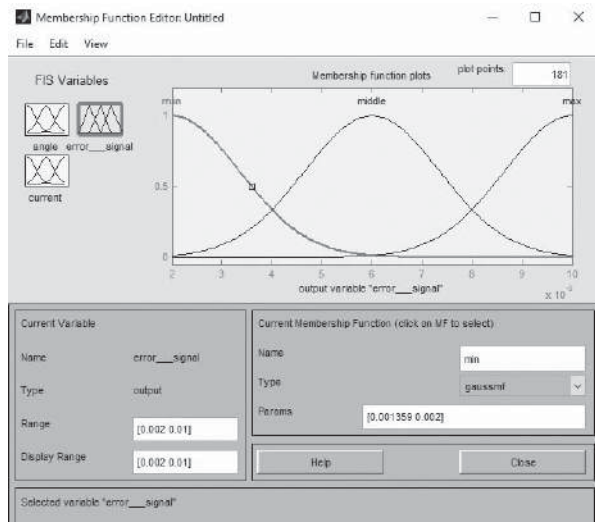


Рис. 6. Вікно завдання параметрів амплітудного значення похибки вихідного сигналу
Fig. 6. Window for setting the parameters of the amplitude value of the error of the output signal

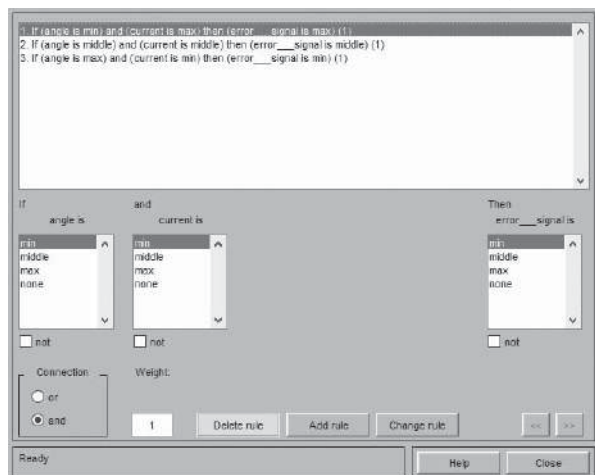


Рис. 7. Вікно редактора правил
Fig. 7. Rule editor window

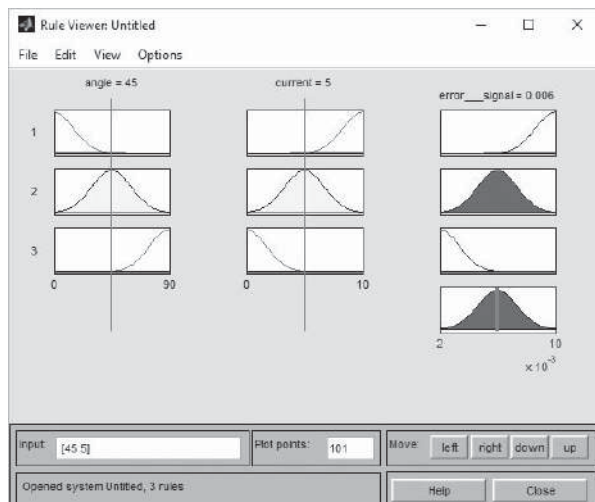


Рис. 8. Вікно значень змінних
Fig. 8. Window for setting variables

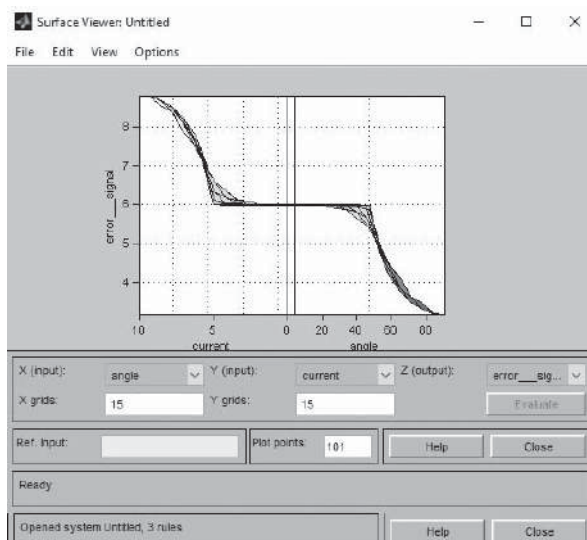


Рис. 9. Графічне зображення значень змінних
Fig. 9. Graphical representation of values of variables

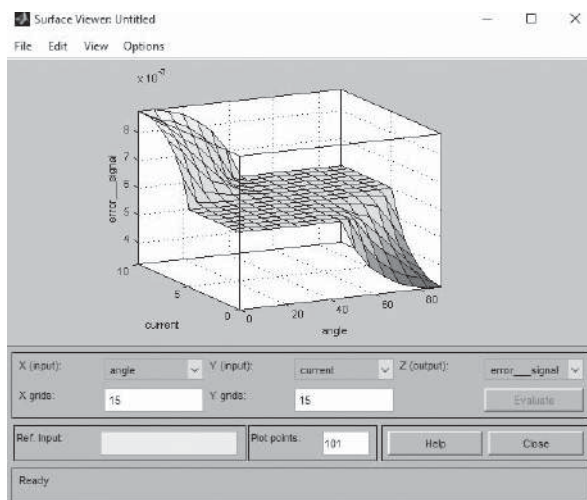


Рис. 10. Поверхня відгуку
Fig. 10. Response surface

Із рис. 8 видно, що мінімального значення похибки вихідного сигналу можна отримати за кута розміщення вимірювальної обмотки датчика відносно поверхні з дефектом, який дорівнює 45°, та струму вихрострумовевого перетворювача 5 А.

Графічне зображення значень змінних та поверхню відгуку наведено на рис. 9 та 10 відповідно.

ВИСНОВОК

За допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити, які повинні бути параметри вихрострумовевого перетворювача та його розміщення над дефектом, щоби амплітудне значення похибки вихідного сигналу було мінімальним.

Математичне моделювання підтвердило результати, отримані у роботі [7], а саме, що сканування

поверхні виробу повинно здійснюватися з поворотом перетворювача на кут у діапазоні $(45 \pm 5)^\circ$ щодо напрямку вектора порушеного струму, потім реєструвати реакцію виробу за максимальною величиною прийнятого сигналу, а наявність дефектів у виробі та їхні розміри визначати за максимальною величиною амплітуди прийнятого сигналу.

Запропонований підхід надає можливість урахувати й інші параметри вихрострумове перетворювача, а саме, величину магнітної індукції, напруженості поля та глибину дефекту для визначення оптимальних співвідношень між ними. Критерієм оптимальності є виявлення дефекту з максимальною точністю визначення його параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн 2: Вихретоковый контроль. — М.: Машиностроение (Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik: V 8 t. / Pod obsch. red. V.V. Klyueva. T. 2: V 2 kn. Kn 2: Vihretokoviy kontrol. — М.: Mashinostroenie), — 2006. — 688 с/s.
2. Хомяк Ю.В. Вихрострумовий дефектоскоп з компенсацією впливу стану поверхні феромагнітних металовиробів: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.11.13 / Ю.В. Хомяк. — Харків: НТУ «ХПІ» (Номуак Yu.V. Vihrostrumoviy defektoskop z kompensatsieyu vplivu stanu poverhni feromagnetnih metalovirobiv: disertatsiya na zdobuttya naukovoogo stupenya kandidata tehnicnih nauk: 05.11.13 / Yu.V. Nomyak. — Harkiv: NTU «HPI»), — 2013. — 168 с/s.
3. Ціделко В. Інформаційні технології на базі нечіткої логіки (FUZZY LOGIC). / В. Ціделко, В. Хандоняк // Вимірювальна техніка та метрологія: Зб. наук. праць НУ «Львівська політехніка». — Львів (Tsidelko V. Informatsiyni tehnologiyi na bazi nechitkoj logiki (FUZZY LOGIC). / V. Tsidelko, V. Handonyak // Vimiryuvalna tehnika ta metrologiya: Zb. nauk. prats NU «Lvivska politehnika». — Lviv), — 2001. — № 58. — С/С. 3—15.
4. Глоба Светлана. Особенности построения портативного вихретокового дефектоскопа / Светлана Глоба, Григорий Сучков, Юрий Хомяк, Антон Слободчук (Hloba Svetlana. Osobennosti postroeniya portativnogo vihretokovogo defektoskopa) // Proceeding of 24th National Scientific Symposium with International Participation «Metrology and metrology assurance 2015», September 07—11, 2015, Sozopol, Bulgaria. — PP. 195—199.
5. Глоба Светлана. Повышение точности обнаружения дефектов экранированным ортогональным вихретоковым преобразователем / Светлана Глоба, Григорий Сучков, Юрий Хомяк, Игорь Григоренко, Антон Слободчук, Юрий Хорошайло (Hloba Svetlana. Povyishenie tochnosti obnaruzheniya defektov ekranirovannym ortogonalnyim vihretokovym preobrazovatelem) // Proceeding of 26th National Scientific Symposium with International Participation «Metrology and metrology assurance 2016», September 07—11, 2016, Sozopol, Bulgaria. — PP. 149—154.
6. Глоба С.Н. Высокостабильный вихретоковый преобразователь для контроля толщины диэлектрических покрытий на металлоизделиях / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк, С.Н. Глоба, Ле Чи Хиеу // Измерительная техника (Hloba S.N. Vyisokostabilnyiy vihretokoviy preobrazovatel dlya kontrolya tolschiny dielektricheskikh pokrytity na metalloizdeliyah / G.M. Suchkov, Yu.V. Nomyak, S.N. Hloba, Le Chi Hieu // Izmeritelnaya tehnika). — 2016. — № 4. — С/С. 19—21.
7. Глоба С.М. Комп'ютерне моделювання накладного вихрострумове перетворювача / С.М. Глоба // Український метрологічний журнал. — Харків: Національний науковий центр «Інститут метрології» (Hloba S.M. Komp'yuterne modelyuvannya nakladnogo vihrostrumovogo peretvoryuvacha / S.M. Hloba // Ukrayinskiy metrologichniy zhurnal. — Harkiv: Natsionalniy naukoviy tsentr «Institut metrologiyi»). — № 1, 2016. — С/С. 48—52.
8. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман — М.: Радио и связь (Kofman A. Vvedenie v teoriyu nechetkih mnozhestv / A. Kofman. — М.: Radio i svyaz), — 1982. — 432 с.
9. Jerry M. Mendel. Designing fuzzy logic systems / Jerry M. Mendel, George C. Mouzouris // IEEE Transactions on circuits and systems. — Vol.44. — No.11. — November, 1977. ☒

Отримано: 21.03.2017.

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

УДК 53.088.23

EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT OF NONLINEAR DYNAMIC VARIABLES

ПРЕДСТАВЛЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ ЗМІННИХ

Yu. Machekhin, Doctor of Technical Science, Professor,
Head of Photonics and Laser Engineering Department,
Yu. Kurskoy, Candidate of Technical Science,
Associate Professor,
Kharkov National University of Radioelectronics,

Ю. Мачехін, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри фотоніки та лазерної інженерії,
Ю. Курський, кандидат технічних наук, доцент кафедри,
Харківський національний університет
радіоелектроніки

We show a way for estimation and expression of uncertainty in measurement of nonlinear dynamic variables. The measurement results are represented by number of interval variables with not canonical distribution laws. Each interval is represented by the minimum and maximum values of dynamic variables with their measurement uncertainties. Within the intervals the dynamical variables are displayed by the histograms of measurement results values. The most and least probable values of dynamic variables with their uncertainties and probabilities are presented too. The measurement results are added with the fractal dimension, Shannon entropy and forecasting horizon time. The described set of measurement results is a measurement portrait.

У роботі наведено спосіб оцінювання та представлення невизначеності вимірювання динамічних змінних нелінійних динамічних систем. Результатом вимірювання є ряд інтервальних величин із неканонічними законами розподілу. Кожен інтервал подається мінімальним і максимальним значеннями динамічних змінних із урахуванням невизначеностей їх вимірювання. Значення динамічних змінних усередині інтервалу відображаються у вигляді гістограм значень результатів вимірювання. Наводяться найбільш і найменш імовірні значення динамічних змінних з їх невизначеностями та ймовірностями появи. Для надання максимально можливого обсягу інформації щодо динамічних змінних вирази невизначеності результатів вимірювання доповнюються значеннями фрактальної розмірності, ентропії й часу передбачення. Наведена сукупність результатів вимірювання є портретом вимірювання.

Keywords: Measurement Uncertainty, Metrology of Nonlinear Dynamic Systems, Fractal Dimension, Shannon Entropy

Ключові слова: невизначеність вимірювання, метрологія нелінійних динамічних систем, фрактальна розмірність, ентропія Шеннона.

INTRODUCTION

There is a difficult, urgent metrological task — a measurement of dynamic variables (DV) $[X_1(t), \dots, X_n(t)]$ of nonlinear dynamical systems (NDS). For solving this problem the authors develop a new direction in Theoretical Metrology, that was named Metrology of Nonlinear Dynamical Systems or Nonlinear Metrology [1]—[8].

The DVs of NDS as a rule demonstrate a complex, nonlinear and often chaotic dynamic. From the Classical Theoretical Metrology point of view the measurement of DV values is a multi-factor experiment [9]. It's difficult task because we need take into account a number of factors. Also we can't correct describe the real DVs dynamic and their correlation using the classical mathematical models and equations. And besides, the task of multifactor experiment isn't only a presentation of measurement results in an error or uncertainty form. We need a maximum information about a system [9], which can be expressed by such characteristics as a fractal dimension, Shannon entropy, forecasting horizon time et al.

In the works [1]—[8] and others the authors presented the actuality and main research results for building a new theory. For measurement and analysis of the measurement results the theoretical approaches, measurement model [1] and model of measurement results analysis [2] were created. As the analysis tools it's proposed to use the



Yu. Machekhin



Yu. Kurskoy

fractal and entropy scale of NDS state [3, 4]. For analysis of an evolving NDS, biological systems for example, it's proposed to use a time that system revert to a previous state [5], For ensure the principle of maximum information content of measurement results it's proposed a new tool — a measurement portrait [7].

By the logic of theory construction now we need develop a method for expression of uncertainty in measurement of nonlinear dynamic variables. This new method should not contradict the essential requirements of GUM [10]. When DV change a dynamic mode to static mode the new method should be completely transformed in the classical method [10]. So, a creation of a way for an expression of uncertainty in measurement of dynamic variables of nonlinear dynamic systems is the task of this work.

Research results

Let's consider the basic properties of NDS and its DV. Such systems are described by number n of DVs X_i . The DV X_i is an interval value and $X_i \in [X_i^{\min}; X_i^{\max}]$. Within the boundaries of its interval the X_i values change by unknown law. It can be random, chaotic, or deterministic dynamics. It should be remembered that in the measurement of NDS DV the uncertainties budget involves as the measurement uncertainty so the NDS dynamics uncertainty, herewith the contribution of the last factor can be prevailed.

According to [10] a number of X_i are input variables, the results of their simultaneous measurements can be denoted as a number of x_i . The m time series of n DVs measurements can be presented by the next measurement matrix:

$$\begin{pmatrix} x_{1,1} \dots x_{1,m} \\ \dots \\ x_{n,1} \dots x_{n,m} \end{pmatrix}. \tag{1}$$

The output values Y_i associated with the input values X_i by the measurement equation $Y_i = f(X_i, \dots, X_n)$. The output values Y_i are the interval variables too, and their values locate in the frame of the interval $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$. According to [11]:

$$Y_i = y_i \pm U_i, p, \tag{2}$$

here y_i — a measurement evaluation; U_i — an expanded measurement uncertainty; p — a trust level

As a result, the measurement matrix (1) is converted to the measurement results matrix:

$$\begin{pmatrix} Y_{1,1} \dots Y_{1,m} \\ \dots \\ Y_{n,1} \dots Y_{n,m} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

The measurement results matrix (3) encloses a necessary data for obtaining maximum information about NDS. Using (3) we can calculate a fractal dimension D of a system at least. It allows us to classify the process as deterministic, random or chaotic [4] and to choose a method for expression of measurement results uncertainty.

The fractal dimension D of measurement results time series (3) is calculated by Hurst method [1]. The D value allows us to classify the process and choose an tools for an analyze of measurement results/ If $D = 1$ a process is regular without any random component, if $D = 1,5$ a process is random, if $1 < D < 1,5$, $1,5 < D < 2$ a process is chaotic.

If a process is random the expression of measurement uncertainty should base on the method for expression of the interval values that was proposed in [11]. According this method if an interval value $Y_i \in [Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$ has the uniform distribution so Y_i is represented by mathematical expectations of the intervals middles m_i^{mid} , interval boundaries m_i^{\min}, m_i^{\max} and their standard deviation $\sigma_i^{mid}, \sigma_i^{\min}, \sigma_i^{\max}$ in the next form:

$$Y_i = m_i^{mid} \pm k\sigma_i^{mid}, \tag{4}$$

$$\text{где } m_i^{mid} = \frac{1}{2}[(m_i^{\min} - k\sigma_i^{\min}) + (m_i^{\max} + k\sigma_i^{\max})],$$

$$\sigma_i^{mid} = \frac{1}{2}[(m_i^{\max} + k\sigma_i^{\max}) - (m_i^{\min} - k\sigma_i^{\min})].$$

The described method (4) is correct when NDS has a random dynamics. But in case of measurement of real NDS DVs we should remember that DVs are the interval variables with an unknown distribution. Therefore, we need to solve two problems.

First, we need to define the minimum and maximum values of DV and calculate their measurement uncertainties:

$$Y_i^{\min} = y_i^{\min} \pm U_i^{\min}, Y_i^{\max} = y_i^{\max} \pm U_i^{\max}, p. \tag{5}$$

Second, we need to build the values Y_i histograms, calculate the most Y_i^{oft} and least Y_i^{ofl} probable values of DV, their measurement uncertainties U_i^{oft}, U_i^{seld} , and probabilities of their occurrences $P(Y_i^{oft}), P(Y_i^{seld})$:

$$Y_i^{oft} = y_i^{oft} \pm U_i^{oft}, p, P(Y_i^{oft}); Y_i^{seld} = y_i^{seld} \pm U_i^{seld}, p, P(Y_i^{seld}). \tag{6}$$

The formulas (5), (6) and the values Y_i histograms represent the expression of uncertainty of NDS DVs measurement results. For achievement of the maximum possible information content about DVs and NDS the formulas (5), (6) should be complemented by the values of fractal dimension D [4], Shannon entropy H [6] and forecasting horizon time T_f [2] in the next form:

$$D_i = d_i \pm U_i, p; H_i = h_i \pm U_i, p; T_{fi} = t_{fi} \pm U_i, p, \tag{7}$$

here d_i, h_i, t_{fi} — the measurement evaluations of

fractal dimension D , entropy H and forecasting horizon time T_f


Thus, the formulas of measurement results uncertainty (5), (6), measurement results histograms, fractal dimension, entropy and forecasting horizon time (7) is a measurement portrait of a single DV. The main principles for building a complete measurement portrait for all of DVs was introduced in [7].

CONCLUSIONS

We show a way for estimation and expression of uncertainty in measurement of nonlinear dynamic

variables. The measurement results are represented by number of interval variables with not canonical distribution laws. Each interval is represented by the dynamic variables minimum and maximum values with their measurement uncertainties. Within the intervals the dynamical variables are displayed by the histograms of the measurement results values. The most and least probable values of dynamic variables with their uncertainties and probabilities are presented too. The measurement results are added with the fractal dimension, Shannon entropy and forecasting horizon time. The described set of measurement results is a measurement portrait.

REFERENCES / СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Measurement model of nonlinear dynamic systems parameters // Systems of information processing (Мачехин Ю., Курской Ю. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем // Системы обработки информации). — 2012. — № 01 (99). — P./C. 169—175.
2. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Measurements analysis in nonlinear dynamical systems // Systems of information processing (Мачехин Ю., Курской Ю. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Системы обработки информации. — 2012. — Вып. 07 (105)). — 2012. — P./C. 117—122.
3. Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской. Модель измерения здоровья человека. Метрологический подход // Метрологія та прилади (Yu. Machekhin Model' izmereniya zdorov'ya cheloveka. Metrologicheskii podkhod [Tekst] / Yu. Machekhin, Yu. Kurskoy // Metrologiya ta priladi). — 2014 — Вып. 02 (46). — С./Р. 40—44.
4. Мачехин Ю.П. Фрактальная шкала для временных рядов результатов измерений // Измерительная техника (Machekhin Yu. Fraktal'naya shkala dlya vremennykh ryadov rezul'tatov izmereniy [Tekst] / Yu. Machekhin // Izmeritel'naya tekhnika). 2008. № 8. С. 40—43;
5. Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Фрактально-энтропийный анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Измерительная техника. 2014. № 06. С. 18—21.
6. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. The compilation of the equations of the measurement of the Shannon entropy of nonlinear dynamical systems using interval analysis methods // Instrumentation and measurement methods. — 2015. — Vol. 6, N 2 (Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской. Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа // Приборы и методы измерений. — 2015. — Т. 6, № 2). — P./C. 257—263.
7. Yu. Machekhin, Yu. Kurskoy, E. Prisich The measurement portrait of dynamic variables // Метрологія та прилади. — 2016 — № 05 (60). — С./Р. 46—51.
8. Machekhin Yu.P., Kurskoy Y.S. Fundamentals of nonlinear metrology. // LAP Lambert Academic Publishing (Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Монография «Основы нелинейной метрологии» Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN: 978-3-65957-401-6). — 2014. — 240 p./c.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ленинград: Издательство Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. — 304 с.
10. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML 1995 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2nd edn.
11. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений: физические и математические основы [Элек-тронный ресурс] / И.И. Горбань. — К.: Наукова думка, 2011. — 318 с. — Режим доступа: http://www.immsp.kiev.ua/perspages/gorban_i_i/index.html. 

Отримано: 07.05.2017.

Стаття рекомендована д.ф.-м.н., проф. М.І. Дзюбенком, Україна.
Prof. M.I. Dzyubenko, D. Sc. (Phys.-Math.) has recommended this article, Ukraine.

УДК 621.1.002.56

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ НЕМЕТРИЧНИХ ШКАЛ ВИМІРЮВАННЯ В ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ВУГІЛЬНИХ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС

В. Промоскаль, кандидат технічних наук, доцент,
В. Заруба, кандидат технічних наук,
О. Близниченко, кандидат технічних наук, доцент,
В. Будко, доктор філософських наук, професор,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

Розглянуто способи виявлення якісних властивостей об'єктів енерготехнологій у відношеннях еквівалентності й порядку, їх класифікації за альтернативними ознаками та визначення чисельності об'єктів еквівалентних класів неметричних шкал.

Ways of identifying high quality properties of objects in energy technologies in relations of equivalence and order, their classification by alternative characters and definition of number of objects of equivalent classes of non-metric scales.

Ключові слова:

Keywords: Non-metric nominal scales, non-metric ordinal scales, metric difference scales, metric relation scales, absolute scale, power units, equivalence, equivalence classes, estimate scale, flying dust.

Сучасна метрологія збагачує свої методи, до засад яких разом із методами вимірювання, вимірювального перетворення, відтворення величин із заданими розмірами та порівняння величин долучені шкали вимірювання [1]. Такими шкалами вимірюються як кількісні властивості об'єктів (метричні шкали), так й якісні властивості (неметричні шкали) і не лише фізичних, а й нефізичних об'єктів (біологічних, психологічних, соціальних, економічних тощо).

Незважаючи на технологічну досконалість сучасних устатковань і енерготехнологій перетворення хімічної енергії вугілля в механічну та електричну енергію на ТЕС, високий рівень їх механізації, автоматизації та метрологічного забезпечення, окремі їх технологічні елементи та операції не контролюються технічними вимірюваннями. Це зумовлено складними фізичними основами формування та перетворення відповідних інформативних параметрів, що унеможлиблює виконання вимірювання (не виділені фізичні величини (ФВ) як величини, взаємопов'язані формулами фізики, не визначені одиниці їх вимірювання) [2]. Тому у таких випадках застосовуються періодичні лабораторні вимірювання із використанням, зо-

крема, і неметричних шкал вимірювання. Їх використання в енерготехнології вугільних ТЕС відповідає сучасним базовим поняттям як метрології, так і матеріалістичної філософії. Зокрема, положення філософії щодо неметричних шкал базується на відмінностях сутності від явища, коли останнє перетворюється у знак сутності. За таких умов об'єктивно доступними виявляються вимірювальні властивості, якими заправляються або лише відносність знаків (класифікація) множини індивідуумів з повторними властивостями (шкала назв), або їх розподіл за ранжиrom якої-небудь властивості (шкала порядку (ранжирування)) чи за входженням до відповідної фракції (шкала порядку (фракціонування)) [3].

У рекомендаціях [1, 2] більш детально визначено типи шкал як результат їх класифікації вибіркою ознак, які характеризують сукупність притаманним шкалам логічних відношень між різними проявами вимірюваної властивості. Такими логічними відношеннями є:

- відношення еквівалентності $R(\approx)$ або відмінності й рівності для різних якісних виявлень властивостей об'єктів, які вимірюються *неметричними шкалами назв*;

- відношення $R(\approx)$ і порядку $R(<)$ за зростанням чи убаванням деякого кількісного виявлення властивості, що притаманно якісним властивостям, які вимірюються *неметричними шкалами порядку*;
- відношення $R(\approx)$, $R(<)$, пропорційності $R(/)$ інтервалів (різниць) або адитивності $R(+)$ між кількісними виявленнями властивостей, які вимірюються *метричними шкалами різниць (інтервалів)*;
- відношення $R(\approx)$, $R(<)$, $R(+)$ і $R(/)$ між різними кількісними виявленнями властивостей, які вимірюються *метричними шкалами відношень (набо-*

ром відношень $R(\approx)$, $R(<)$, $R(/)$ — пропорційна шкала відношень (1-го роду), а набором відношень $R(\approx)$, $R(<)$, $R(+)$ — адитивна шкала відношень (2-го роду)). Зокрема, шкала відношень (пропорційна чи адитивна) безрозмірнісної величини [1, 4] — це *абсолютна шкала*.

Виявлення (реалізація) якісних властивостей об'єктів у відношенні еквівалентності проводяться такими способами.

Органами почуттів людини виявляються органолептичні (від орган + греч. *lèptikos*– здібний брати,

Таблиця 1. Деякі об'єкти енерготехнології, властивості яких виявляються у відношенні еквівалентності [5].

Table 1. Some objects of energy technology, whose properties are manifested in relation to equivalence [5].

Об'єкти діяльності	Класифікаційна ознака об'єкта	Назви класів еквівалентності
Енергоблоки	Номінальна потужність енергоблоків	Енергоблоки потужністю 200 та 300 МВт
	Число котлів в енергоблоці	Моно- та дубльблоки
	Стан енергоблоків	Робочі та резервні енергоблоки
	Режим роботи енергоблоків	Базові та змінні режими
Парові турбіни	Є чи ні теплофікаційний відбір пари з турбін	Теплофікаційні та конденсаційні турбіни
Лопатки турбін	Рухомі чи ні лопатки турбіни	Робочі та напрямні лопатки
Ступені турбін	Кут установки відносно осі турбіни профілю робочих лопаток ступені	Активні та реактивні ступені парової турбіни
Котли	Функціональне призначення котла	Парові та водогрійні котли
	Вид палива	Вугільні та газові котли
	Вид циркуляції води у контурі котла	Котли з природною та вимушеною циркуляцією
Топки котлів	У розплавленому чи твердому стані шлак видаляється із топки	Топки з рідким та твердим шлаковидаленням
Регенеративні підігрівачі низького тиску (ПНТ)	Наявність чи відсутність стінки між середовищами теплообміну	ПНТ поверхневі та змішувальні
Золоуловлювачі (ЗУ)	Використовується чи ні вода в ЗУ	Мокрі та сухі ЗУ
	Природа сил механізму уловлення частинок золи в ЗУ	Механічні та електричні ЗУ
Куски вугілля	Розмірна характеристика кусків вугілля після дробарки	Крупність та мілкість кусків вугілля
Вугільний пил після вугільного млина	Розмірна характеристика частинок вугільного пилу після млина	Грубість та тонкість вугільного пилу
Зола на виході із топки котла	Стан золи, яка видаляється із топки	Донна зола (шлак) та летюча зола (винос)
Частинки летючої золи (ЛЗ) після ЗУ	Вид частинок золи, які залишають ЗУ	Уловлені та неуловлені частинки летючої золи
Частинки золошлакового матеріалу (ЗШМ)	Форма частинок ЗШМ	Нескруглені та округлені частинки ЗШМ
Процеси виробництва, транспортування та перетворення теплоти спаленого палива (ТСП)	Використовується чи втрачається складова ТСП в енергоблоці та його елементах (котлі, паропроводи, турбіни)	Використана та втрачена складова ТСП в енергоблоці та його елементах

сприймати) властивості об'єктів. Це, перш за все, властивості, доступні зору людини, яка має знання з основ енерготехнологічних процесів та відповідних устатковань (обладнань). Так розпізнаються і розрізняються (класифікуються) енергоблоки та їхнє основне й допоміжне устаткування (енергоблоки, котельні установки (КУ), турбінні установки (ТУ), підігрівачі, вугільні млини, дробарки, золоуловлювачі (ЗУ) тощо). У таблиці 1 наведено технологічні процеси, встаткування та інші об'єкти, властивості яких виявляються у відношенні еквівалентності; значна частина властивостей таких об'єктів органолептичні.

Конструктивно-технологічним способом пізнаються та класифікуються якісні властивості об'єктів у всіх технологічних трактах вугільного енергоблока (рис. 1):

а) тракт підготовки вугілля до спалення (рис. 1а) складається із технологічного обладнання, яким реалізуються енерговитратні технології виробництва вугільного пилу. Основними серед них є процеси подрібнення дробарками кусків вугілля та їх розміл у вугільних млинах. Перед дробаркою та після млина у потоках кусків вугілля/частинок його пилу встановлені грохот/сепаратор, якими із потоків вилучаються великі/крупні куски вугілля/частинки вугільного пилу. Так утворюються два класи

еквівалентності: клас великих-малих кусків вугілля та клас крупних-дрібних частинок його пилу. Великі/крупні куски/частинки направляються до дробарки/млина, де подрібнюються/розмелюються до нормованих розмірних характеристик. Подрібнені куски вугілля потрапляють до бункера сирого вугілля (на рис. не показано), а з нього — до млина. Отриманий вугільний пил зберігається у бункері вугільного пилу (на рис. не показано), із якого потрапляє до пальників КУ.

б) тракт золи спаленого палива ЗСП (рис. 1б) починається із топки КУ, конструкція якої та її режимно-технологічні параметри забезпечують факельне спалювання вугілля у виді полідисперсного вугільного пилу. За таких умов негорючі мінеральні домішки вугілля (їх масова частка позначається як A' і визначається лабораторними технічними аналізами палива за ДСТУ ГОСТ 11022-95 (ISO 1171-81)) зазнають термічних перетворень переважно окислювального характеру, утворюючи золу. Остання видаляється із топки двома способами. Частина золи розплавляється і опиняється внизу (на «дні») топки, утворюючи еквівалентний клас шлаку (донної золи), який після охолодження і подрібнення дробаркою направляється системою гідрошлаковидалення (ГШВ) через багерну помпову (БП) до шлакозоловідвалу (літосфери). Інша частина золи у виді суспендованих

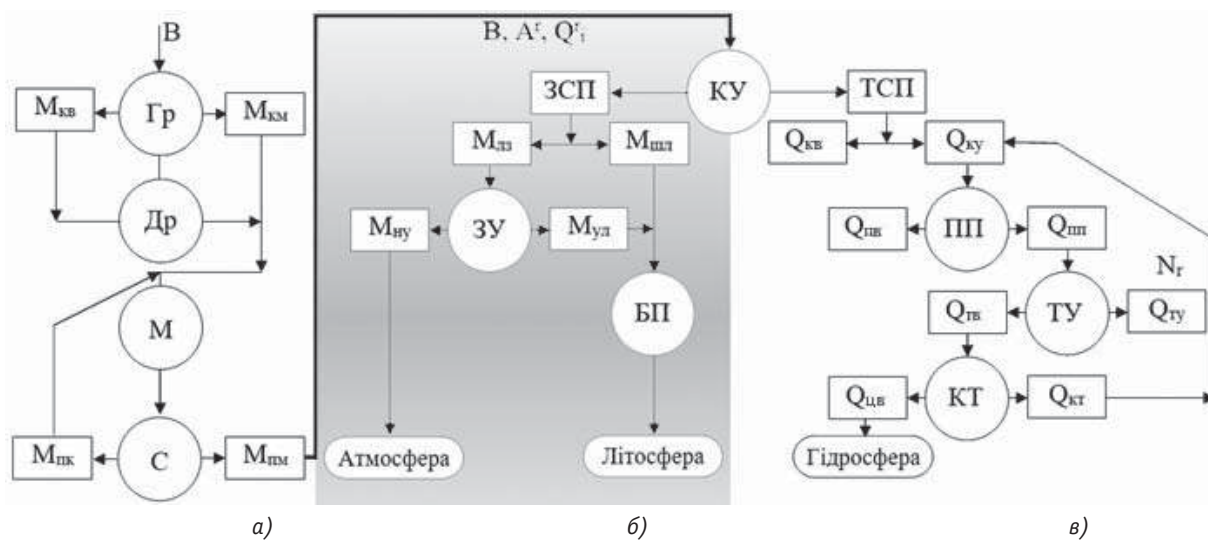


Рис. 1. Схеми технологічних класифікацій якісних властивостей об'єктів енергоблока а) тракт кусків/частинок вугілля/вугільного пилу, б) тракт видалення золи спаленого палива (ЗСП), в) тракт теплоти спаленого палива (ТСП).

Умовні позначення: кружками – технологічне обладнання (Гр – грохот, Др – дробарка, М – млин, С – сепаратор, ЗУ – золоуловлювач, БП – багерна помпа, КУ – котельна установка, ПП – паропровід, ТУ – турбоустановка, КТ – конденсатор турбіни); прямокутниками – еквівалентні класи: куски вугілля ($M_{кв}$ – $M_{км}$), частинки пилу ($M_{лз}$ – $M_{лнл}$), продуктів спаленого палива (ТСП – ЗСП); ЗСП ($M_{лз}$ – $M_{шл}$); $M_{лз}$ ($M_{ул}$ – $M_{чу}$), ТСП ($Q_{ку}$ – $Q_{вкч}$), $Q_{ку}$ ($Q_{лн}$ – $Q_{впл}$), $Q_{лн}$ ($Q_{ту}$ – $Q_{вту}$), $Q_{тв}$ ($Q_{кт}$ – $Q_{вкт}$), B , A' , Q'_i – масова витрата вугілля, кг/с, його зольність, %, та питома теплота згорання, МДж/кг

Fig. 1. Scheme of the technologic classification of the quality properties of power unit objects а) a path of pieces / coal parts / coal dust, б) fuel ash extraction path, в) fuel heat path

частинок виносяться із топки (вгору) димовими газами (ДГ), утворюючи еквівалентний клас частинок (виносу) летючої золи (ЛЗ). Золоочищення ДГ від частинок ЛЗ відбувається у ЗУ; найчастіше це електрофільтр, у якому електричними силами заздалегідь заряджені частинки ЛЗ видаляються з потоку ЛЗ та осаджуються на осаджувальних електродах і періодичними струшуваннями останніх скидаються до золотого бункера, утворюючи еквівалентний клас уловлених частинок ЛЗ, які теж потрапляють до системи ГШВ. Дрібні частинки ЛЗ уловлюються електрофільтром із меншою ефективністю, тому неуловлені частинки виносяться ДГ через димову трубу до атмосфери, утворюючи клас неуловлених частинок ЛЗ.

в) тракт теплоти спаленого палива ТСП (рис. 1в) починається в КУ класифікацією продуктів спаленого палива за ознакою «корисний — безкорисний» двома класами еквівалентності: класом теплоти спаленого палива (ТСП) та класом золи спаленого палива (ЗСП), розглянутому в попередньому тракті. Природа та поведінка теплоти (досягнення термодинамічної рівноваги системи через передавання теплоти від гарячого до холодного тіла та термодинамічна неможливість повного (цілковитого) перетворення теплоти в роботу без втрат у холодильнику [6]) зумовлює в теплових процесах її самочинний поділ (за ознакою «корисність — безкорисність») на два еквівалентні класи: використаної та втраченої теплоти процесу. Трактом реалізується термодинамічний цикл Ренкіна перетворення теплоти в механічну енергію [7]. Як видно із рис. 1в, він є послідовністю технологічних процесів виробництва в КУ перегрітої пари, яка називається робочим тілом — термодинамічним середовищем, що використовується в теплових машинах; транспортування її основним паропроводом (ПП) до ТУ; перетворення в ТУ енергії пари в механічну енергію обертання ротора турбіни, з'єданого з ротором електрогенератора (останній генерує потік електричної енергії потужністю N_e). Кінцевий процес циклу — конденсація відпрацьованої пари в конденсаторі турбіни (КТ); отриманий конденсат повертається до КУ, замикаючи цикл та утворюючи еквівалентний клас повернутої теплоти процесу. Відібрана циркуляційною водою теплота пароутворення складає клас втраченої теплоти процесу, що скидається до ставу охолодника (гідросфери).

Спрощена схема (рис. 1в, без системи регенерації СП та проміжного перегрівання пари) ілюструє технологічну класифікацію ТСП на виході із кожного обладнання циклу за ознакою «використана —

втрачена» двома класами еквівалентності, відповідно із: КУ $Q_{ку} - Q_{кв}$, ПП $Q_{пп} - Q_{пв}$, ТУ $Q_{ту} - Q_{тв}$, КТ $Q_{кт} - Q_{цв}$.

Наступний спосіб виявлення емпіричних відношень реалізується за допомогою сит із визначеними розмірами чарунок. Сито — це технічних засіб для просіювання сипких матеріалів (кусків вугілля, шлаку, вугільного пилу, летючої золи) і візуалізації процесу просіювання проби з метою вимірювального контролю якості дроблення кусків дробаркою та помелу їх вугільним млином, а також фракційного складу вугільного пилу і летючої золи. Просіювання сипкого матеріалу через одне сито розділяє (класифікує) матеріал двома класами еквівалентності за ознаками, розглянутими вище в процесах грохочення та сепарації. Але грохоти та сепаратори вмонтовані в технологічний тракт підготовки вугілля до спалення. Сита ж вживаються для лабораторних ситових аналізів відібраних проб сипкого матеріалу, які використовуються для оптимізації роботи грохотів, сепараторів, млинів та ЗУ. Повний ситовий аналіз вугільного пилу проводиться шляхом просіювання відібраних проб через $n = (4-5)$ сит з монотонно зменшуваними розмірами вічок (ДСТУ 4082-2002). Результатом аналізу є $(n+1)$ класів еквівалентності $(n$ -класів надRESHITного (за лишки) на кожному ситі та один клас підRESHITного матеріалу (прохід) останнього сита). Отже, розмірні характеристики частинок виявляються не лише у відношеннях еквівалентності після кожного сита, а й у відношеннях порядку в наборі сит.

Експериментальний спосіб виявлення емпіричних відношень якісних властивостей використовується з метою визначення температурних характеристик золи. Зола суттєво ускладнює процес спалювання вугілля (золошлакування поверхонь нагрівання КУ). Запобігання ускладненням базується на контролі температурних характеристик золи. Для цього в котельній техніці використовується поняття «температура плавкості золи» (сама температура плавкості, а не температура плавлення, що є характеристикою чистих речовин, до яких зола не належить). Зола — це суміш оксидів різних металів, температура плавлення яких міститься в широкому діапазоні від 900 до 1800 °С. Унаслідок цього плавлення золи відбувається в певному температурному інтервалі. У вітчизняній практиці великого поширення отримав стандартний прямий візуальний метод визначення плавкості золи (ДСТУ ГОСТ 2057-94), згідно з яким плавкість визначається експериментально за лабораторних умов. Відповідно до нього зразок золи у виді пірамідки, сформованої із

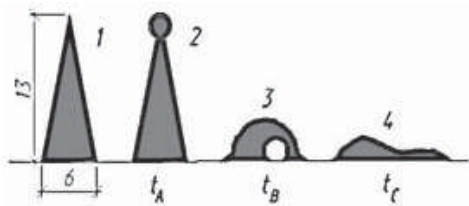


Рис. 2. До визначення плавкості золи за формою та станом зразка золи:

1 — до нагрівання, 2 — початкова деформація,
3 — розм'якшення; 4 — рідкоплавкий стан

Fig. 2. Identifying ash fusibility by shape and state:

1 — before heating, 2 — initial deformation,
3 — ash softening, 4 — fluid state

дрібноподрібненої проби золи, нагрівається у спеціальній печі з напіввідновним газовим середовищем. Під час нагрівання візуально спостерігають за змінами форми та стану зразка і вимірюють відповідні таким змінам температури. Температурні характеристики плавкості золи, залежні від її складу та складу газового середовища, оцінюються за трьома характерними формами та станом зразка золи (рис. 2), які він приймає у процесі послідовного зростання температури до:

t_A — температури початку деформації (спостерігаються перші ознаки розм'якшення зразка золи — зміна його поверхні, закруглення країв чи нахил взірця); t_B — температури на півсфери (зразок приймає форму напівсфери чи вигинається так, що його вершина торкається підставки); t_C — температури рідкоплавкого стану (зразок золи розтікається за підставкою).

Отже, відповідно до умов оцінення плавкості золи, безперервність та упорядкованість за схожістю (близькістю) змін органолептичних властивостей (форми та стану) золової пірамідки зумовлені упорядкованістю змін її температури.

Залежно від рівня температури рідкоплавкого стану зола енергетичного вугілля поділяється на: середньоплавку ($1200^\circ\text{C} \leq t_C \leq 1425^\circ\text{C}$), легкоплавку, ($t_C < 1200^\circ\text{C}$) та тугоплавку ($t_C > 1425^\circ\text{C}$) [8].

Стандартизований атлас різних форм, частинок золи і шлаку виконує роль своєрідного еталона оцінок їх скругленості. Частинки за формою розташовані в бальній системі зростання їх органолептичної властивості (скругленості): від нескруглених (1—4 бали) — до скруглених (5—8 балів). Це груба класифікація об'єктів двома класами, якою за формою частинки виявляють у відношенні еквівалентності. Більш детальна класифікація досягається внаслідок виявлення форм частинок зразка у відношеннях еквівалентності й порядку через монотонне зростання змін форм.

Шкала оцінок скругленості частинок золошлакових матеріалів (ЗШМ) застосовується на ТЕС для оцінювання фізико-механічних властивостей золи і шлаку, прогнозування стирання поверхонь нагрівання котлоагрегатів, каналів та стінок трубопроводів гідрозоловидалення; вона дозволяє оцінити поведінки частинок ЗШМ на золівдвалах та під час використання таких матеріалів у інших галузях.

Вимірювання за шкалою скругленості виконується шляхом візуального порівняння скругленості зразків із атласу зі скругленостями частинок відібраної проби ЗШМ.

На рис. 3 наведено 8-бальну візуальну шкалу для оцінювання скругленості частинок ЗШМ [9], згідно з якою за якісною властивістю (формами частинок) сукупність частинок розділено на два класи еквівалентності: класи нескруглених та скруглених частинок. Кожна група за бальною системою відтворює сукупність послідовностей (рядів) частинок зі змінними формами, що монотонно зростають:

- нескруглених частинок (від частинок із рівними краями (1 бал), із гранями, що виступають (2 бали) до частинок з гострими (3 бали) та зі згладженими ребрами (4 бали);
- скруглених частинок (від частинок зі згладженими ребрами (5 балів), добре (6 балів) та ідеально (7 балів) скруглених частинок до частинок кулевидної форми (8 балів).

Для визначення бала скругленості досліджуються (50—150) частинок кожної фракції золи чи шлаку. Крупні частинки шлаку оцінюються візуальним оглядом, частинки фракцій розмірами (40—250) мкм — за мікрофотографіями, а менші від 40 мкм — за електронними мікрофотографіями. Середній бал округленості частинок певної фракції B_{ϕ} , а також усіх фракцій проби B_{cp} за умов визначеності її гранулометричного складу розраховуються за такими формулами [9]:

$$B_{\phi} = (n_1 + 2n_2 + \dots + 8n_8) / \sum_1^8 n_i; \quad (1)$$

$B_{cp} = (B_{\phi 1} P_1 + B_{\phi 2} P_2 + \dots + B_{\phi k} P_k) / 100$, (2)
де n_1, n_2, \dots, n_8 , — число частинок певної фракції досліджуваного матеріалу, бал скругленості яких дорівнює 1, 2, ..., 8, відповідно;

P_1, P_2, \dots, P_k — масова частка відповідної фракції ($\sum_1^k P_i = 1$), бал скругленості якої, відповідно, дорівнює $B_{\phi 1}, B_{\phi 2}, \dots, B_{\phi k}$ (тут k — число фракцій).

У кінцевому підсумку розгляду виявлень емпіричних відношень якісних властивостей об'єктів енерготехнологій потрібно зазначити, що найбільш поширеними способами є виявлення за допомогою

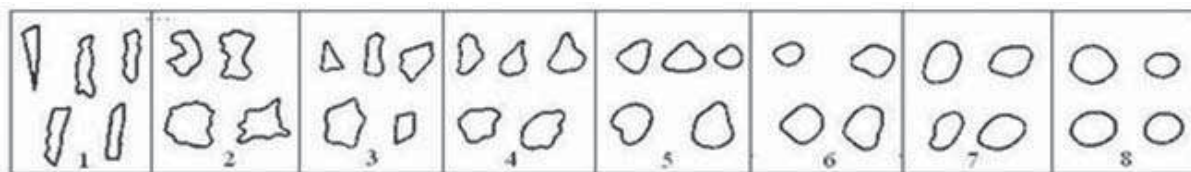


Рис. 3. 8-бальна візуальна шкала для оцінювання скругленості частинок золи і шлаку та їх органолептичні властивості (форми):

1 — скибковидні частинки з рваними краями (відношення довжини до ширини більше трьох); 2 — цілком нескруглені частинки із гранями та кавернами, що виступають; 3 — нескруглені частинки з гострими ребрами; 4 — нескруглені частинки зі згладженими ребрами; 5 — скруглені частинки зі згладженими ребрами; 6 — добре округлені частинки; 7 — ідеально скруглені частинки з гладкою поверхнею; 8 — кулевидні частинки

Fig. 3. 8 point scale for ash and molten ash roundness and their organoleptic properties (forms):

органів почуттів людини. Це енергоблоки та їхнє основне та допоміжне обладнання. Деякі серед них наведено у таблиці 1. На другому місті перебувають технологічні способи виявлення (табл. 1 та рис. 1): це, перш за все, процеси енерготехнології (підготування вугілля до спалення, його спалення та видалення золи із топки, виробництво перегрітої пари, її транспортування та перетворення енергії в механічну енергію, конденсація відпрацьованої пари та газоочищення димових газів). При цьому виявлення досягається або завдяки конструкції обладнання (топки КУ, ТУ), або конструкцією і принципом його роботи (електрофільтрів, конденсаторів, сепараторів), або використанням спеціальних пристроїв, які або вмонтовані безпосередньо у технологічну схему (грохот, сепаратор), або використовуються за лабораторних умов (сито, ситова машина).

Характерним для підмножин виявлень (реалізації) класифікаційних ознак (класів еквівалентності) об'єктів є те, що у відповідності з постулатом дихотомії (від гр. *dichotomia* < *dicho* на дві частини + *tome* переріз) усі вони виявлені на альтернативній основі — шляхом класифікації наявності чи відсутності властивості та присвоєння їм імен (найменувань, назв) — антонімів (від гр. *anti* — проти + *onoma* — ім'я), тобто слів із протилежним змістом (значенням).

Відомо, що логічну основу антономії створюють протилежні видові поняття. Вони входять в об'єм родового поняття, яке віддзеркалює єдину і разом з тим диференційовану «роздвоєну» сутність: білий — чорний (колір), крупні — дрібні (частинки), гаряча — холодна (вода), робочий — резервний (енергоблок) тощо.

Розрізняють два види протилежностей: контрарну (від *contrarius* — протилежний чи лат. *contra* — проти) та комплементарну (від лат. *complementum* — доповненість (додаток)) [10].

Контрарна протилежність виражається видовими поняттями A_T та A_H , між якими можливе третє, середнє A_C , і які не лише заперечують одне одно-

му, але й характеризуються своїм позитивним змістом. Реалізують контрарну протилежність слова, які дають уявлення стосовно поступової зміни якості властивості: крупні — середні — дрібні (частинки), гаряча — тепла — холодна (вода) тощо.

Комплементарна протилежність виражається також видовими поняттями A_T та A_H , які (на відміну від контрарної) доповнюють одне одного до родового так, що між ними неможливе ніяке третє, середнє, поняття: моно — дубль (енергоблок), водогрійний — паровий (котел), уловлена — неуловлена (частинка) тощо.

Таке широке використання антонімічних назв класів зумовили автора [11] назвати теорію вимірювання логікою антонімів. Додамо, що така логіка по-різному впливає на розвиток теорії. Антоніми з комплементарною протилежністю обмежують її розвиток лише шкалами назв, якими визначаються якісні властивості виключно у відношенні еквівалентності (крупні–дрібні частинки). На відміну антоніми з контрарною протилежністю уможливають визначення якісних властивостей більш детально, тобто з деякими ознаками порядку (крупні–середні–дрібні), такими, що виявляються у відношенні й еквівалентності, й порядку.

Після виявлення якісних властивостей об'єктів у відношенні еквівалентності та їх класифікації двома еквівалентними класами отримуємо шкалу назв, яка дозволяє лише розрізняти об'єкти. У багатьох випадках лише це від шкали назв і вимагається. Основним інформативним параметром сукупності об'єктів, властивості яких виявляються лише у відношенні еквівалентності, є їхня кількість або чисельність, що визначається шляхом лічби. Отже, за такою шкалою кількісно оцінюються не властивості об'єктів (це неможливо через відсутність одиниць вимірювання), а чисельність (загальна кількість, кількісний склад) A та кількість об'єктів у класах еквівалентності з протилежними назвами A_T та A_H .

Приклад 1. Основу парку енергоблоків енергосистеми складають енергоблоки номінальною потужністю $N_e = 300$ МВт, загальною чисельністю $A = 37$ блоків, із яких $A_T = 20$ дубльблоків (із двома котлами на кожну турбіну), $A_H = 17$ моноблоків (з однокорпусним котлом на кожному блоці). Визначити шкалу назв для енергоблоків системи.

Рішення: значення часток енергоблоків енергосистеми такі:

- ♦ для класу дубльблоків $a_T = \frac{A_T}{A} = 20/37 = 0,54$,
- ♦ для класу моноблоків $a_H = \frac{A_H}{A} = 17/37 = 0,46$.

Отже, неметрична шкала назв енергоблоків системи складається із двох класів еквівалентності: класу дубльблоків та класу моноблоків, із частками 0,54 та 0,46 відповідно.

Більш частіше повторюється назва дубльблоку, тому клас еквівалентності цих блоків є модальним або найбільш багаточисельним класом. Отже, виявлення властивості енергоблоків лише у відношенні еквівалентності дає змогу провести їх класифікацію за якісною ознакою, присвоїти назви класам еквівалентності (дубльблоків, моноблоків), визначити кількісну характеристику кожного класу і модальний клас, тобто отримати важливу інформацію стосовно складу парку енергоблоків системи.

Отож, без особливих зусиль рахуються елементи об'єктів, що складають множину добре розрізнених індивідуальних елементів таких об'єктів, явищ, процесів, множини таких об'єктів, з якими можна поводитися як із дискретними. Але, якщо таких елементів велика кількість і вони рухомі (на потоці) або дрібні як куски, частинки вугілля, вугільного пилу чи летючої золи, визначення кількості таких елементів їх лічбою — задача практично нездійсненна за своєю трудомісткістю. Особливо проблематичні труднощі виникають у процесі підрахунку, наприклад, лічби крапель води — неперервного середовища, яке самочинно не поділяється на частини, — поки немає домовленості відносно того, що ми розумітимемо під «краплею води», і не використаємо, наприклад, піпетку, яка дозволить масу води розділити на відносно однакові краплі [3].

Наведемо деякі думки щодо усунення таких труднощів:

* автор [12] наводить приклад вимірювання розумової здібності людини, за якого вимірюється час, потрібний для вирішення будь-якої задачі. Хоча фізичний час вимірюється метричною шкалою інтервалів, але час, який використовується як міра ро-

зумової здібності, належить неметричній шкалі порядку. Він наголошує, що цей приклад є типовим для будь-якого широкоживаного феномена: властивості вимірювані шкалою інтервалів, приймаються як показники для інших властивостей, монотонно пов'язаних із наданими. Застосовані для вимірювання пов'язаних властивостей шкали інтервалів стають усього лише неметричною шкалою порядку. Подібний випадок, розглянутий вище стосовно визначень температур плавкості золи: виявлені органолептичні властивості золлової пірамідки у відношеннях еквівалентності й порядку співставленні їх температурним рівням, отриманим за метричною шкалою інтервалів;

* цю думку узагальнює автор [13] виразом відносно того, що метричні шкали мають властивості неметричних шкал. Це уможливило роботу з результатами вимірювання за метричною шкалою так, якби вони були отримані за неметричною шкалою;

* автор [3] наголошує, що вимірювання зводиться до лічби, тобто до підрахунку чисельного складу одиниць вимірювання, які складають його результат (входять до значення ФВ). Шляхом підрахунку визначається чисельність індивідуалізованих елементів певної сукупності, і тому вони можуть бути застосованими до дискретних сутностей, до окремих елементів. Розділяючи за допомогою одиниць вимірювання вимірювану величину на послідовність індивідуалізованих та однакових за розміром елементів, ми уможливуємо застосування лічби і до цього специфічного виду дискретних об'єктів. Це відповідає міжнародному словнику з метрології [14], в одній із приміток якого стверджується, що «вимірювання передбачає порівняння величини і включає лічбу об'єктів»;

* нарешті, у стандарті ДСТУ 2681-94 запроваджено складову похибки результату вимірювання, названу «похибкою перервності (квантування)». Вона визначена як методична похибка методу відображення (під час вимірювання) неперервної ФВ її перервним значенням. Там же визначено квантовану ФВ як ФВ, поділену на рівні за розміром частини, кванти. Найбільш пристосовані до квантування адитивні ФВ. Природно квантованою ФВ (поділеною на кванти від природи) є електричний заряд. Штучно квантованою ФВ, поділеною штучно на кванти або інтервали, є, наприклад, довжина лінійки з нанесеними на ній рівновіддаленими позначками.

Наведеними думками зумовлена усталена практика використання, за умов вугільних ТЕС, результатів прямих вимірювань маси кусків вугілля,

шлаку/частинок вугільного пилу, летючої золи у виді квантованих значень ФВ, пов'язаних із визначеними шкалами назв якісними властивостями крупних-дрібних кусків/частинок відповідних еквівалентних класів. Отже, недосяжний за своєю трудомісткістю результат лічби кусків/частинок ототожнюється чисельністю сукупності індивідуалізованих елементів, рівною числовому значенню результату прямого вимірювання їх маси метричною шкалою відношень.

Отже, після просіювання через окреме сито відібраної проби матеріалу та вимірювань мас утворених класів еквівалентності, загальну кількість індивідуалізованих елементів проби можна виразити як:

$$\begin{aligned} \text{в абсолютній формі: } M &= M_R + M_D, \\ \text{у відносній формі: } 1 &= R + D, \end{aligned} \quad (3)$$

де M_R та M_D — числові значення результатів вимірювання маси відповідно надрешітного (крупних фракцій) та підрешітного (мільких фракцій) матеріалу еквівалентних класів;

$R = M_R/M$ та $D = M_D/M$ — частоти зустрічності індивідуалізованих елементів відповідно надситового (від нім. *Rückstand* — залишок) та підситового (від нім. *Durchgang* — прохід) матеріалу.

У табл. 2 наведено шкали назв вугільного енергоблока, якими визначаються процеси підготовки вугілля до спалення, видалення золи із топки, золоочищення димових газів та теплота процесів виробництва, передавання та перетворення енергії робочого тіла в механічну енергію.

Розглянемо приклад такого просіювання, який використовується на ТЕС для контролю роботи дробарок та вугільних млинів у технологічному процесі підготовки вугілля до спалення [16].

Контроль є різновидом процедури розпізнання стану об'єкта, коли він перебуває в одному із трьох станів: нижче норми, норма, вище норми. Контролем називається процедура установлення відповідності між станом об'єкта та нормою. Для реалізації процедури найпростішого однопараметрового контролю необхідні еталонні об'єкти, характерні параметри яких дорівнюють відповідно x_n — нижній межі норми і x_g — верхній межі норми, та засіб порівняння. Результатом контролю є характеристика відносно перебування об'єкта в нормі чи поза нею, яка виражається нерівностями: вище норми $x > x_B$, норма $x_n < x < x_B$, нижче норми $x_n > x$.

Після просіювання, наприклад, проби вугільного пилу через два сита з чарунками розміром 200 мкм (δ_{200}) та 90 мкм (δ_{90}) залишок на кожному ситі називається фракційним (або фракцією) і позначається F_{200} та F_{90} . Прохід через друге сито (D_{90}) називається дном. Фракційний залишок на цьому ситі, складений із залишком на першому ситі, називається повним залишком, тобто $R_{90} = F_{200} + F_{90}$. Залишок на першому ситі є і фракційним, і повним, тобто $F_{200} = R_{200}$. Отже, після просіювання відібраної проби вугільного пилу через два сита загальна кількість індивідуалізованих елементів проби така:

$$\text{в абсолютній формі: } M = M_{F_{200}} + M_{F_{90}} + M_{D_{90}},$$

Таблиця 2. Шкали назв в енерготехнології вугільного енергоблока [15].

Table 2. The nameplates in the energy technology of the coal power unit [15].

№	Назва шкали	Чисельність індивідуалізованих елементів		Частота зустрічності елементів класу	
		абсолютна	відносна	клас «так»	клас «ні»
1	Шкала кусків вугілля чи частинок його пилу	$M = M_R + M_D$	$1 = R + D$	$R = M_R/M$	$D = M_D/M$
2	Шкала ЗСП (після топки)	$ЗСП = M_{лз} + M_{шл}$	$1 = a_{вин} + a_{шл}$	$a_{вин} = M_{лз}/ЗСП$	$a_{шл} = M_{шл}/ЗСП$
3	Шкала летючої золи (після ЗУ)	$M_{лз} = M_{ул} + M_{ну}$	$1 = \eta_{зу} + \varepsilon_{зу}$	$\eta_{зу} = M_{ул}/M_{лз}$	$\varepsilon_{зу} = M_{ну}/M_{лз}$
4	Шкала ТСП у процесі: ▲ виробництва КУ	$ТСП = Q_{ку} + Q_{кв}$	$1 = \eta_{ку} + \varepsilon_{ку}$	$\eta_{ку} = Q_{ку}/ТСП$	$\varepsilon_{ку} = Q_{кв}/ТСП$
5	▲ транспортування ПП	$Q_{ку} = Q_{пп} + Q_{пв}$	$1 = \eta_{пп} + \varepsilon_{пп}$	$\eta_{пп} = Q_{пп}/Q_{ку}$	$\varepsilon_{пп} = Q_{пв}/Q_{ку}$
6	▲ перетворення ТУ	$Q_{пп} = N_e + Q_{тв}$	$1 = \eta_{ту} + \varepsilon_{ту}$	$\eta_{ту} = N_e/Q_{пп}$	$\varepsilon_{ту} = Q_{тв}/Q_{пп}$
7	▲ конденсації в КО відпрацьованої пари	$Q_{тв} = Q_{кк} + Q_{пв}$	$1 = \eta_{ко} + \varepsilon_{ко}$	$\eta_{ко} = Q_{кк}/Q_{тв}$	$\varepsilon_{ко} = Q_{пв}/Q_{тв}$
8	▲ використання блоком	$ТСП = N_e + Q_{бл}$	$1 = \eta_{бл} + \varepsilon_{бл}$	$\eta_{бл} = N_e/ТСП$	$\varepsilon_{бл} = Q_{бл}/ТСП$

$$\begin{aligned} \text{у відносній формі: } 1 &= F_{200} + F_{90} + D_{90}, \quad (4) \\ \text{або } 1 &= R_{90} + D_{90}, \end{aligned}$$

де $F_{200} = M_{F_{200}}/M$, $F_{90} = M_{F_{90}}/M$ та $D_{90} = M_{D_{90}}/M$ — частоти зустрічності індивідуалізованих елементів відповідно надситового (фракційних залишків $F_{200} = R_{200}$, F_{90}) та підситового (проходу D_{90}) вугільного пилу.

Отже, просіювання пилу через два сита зумовило його поділ за розміром на три сукупності частинок:

- крупних (залишок на першому ситі F_{200}) розміром $\delta_{F_{200}} > \delta_{200}$,
- середніх (фракційний залишок на другому ситі F_{90}) розміром $\delta_{90} < \delta_{F_{90}} < \delta_{200}$,
- дрібних (прохід через друге сито D_{90}) розміром $\delta_{D_{90}} < \delta_{90}$.

Постулат транзитивності з інтенсивності властивості об'єднує розміри частинок сукупностей нерівностями $\delta_{F_{200}} > \delta_{F_{90}} > \delta_{D_{90}}$, які виражають властивість упорядкування їх розмірів. Якщо прийняти, що розмір частинок фракційного залишку на ситі $\delta_{F_{90}}$ є нормальним розміром цієї сукупностей частинок, то отримані нерівності розмірів частинок після просіювання пилу через два сита збігаються з нерівностями, отриманими вище із загальних уявлень щодо контролю як метрологічної процедури.

Параметр R_{90} є важливим режимно-технологічним показником, за допомогою якого запроваджується контроль тонкості вугільного пилу. Оптимальне значення його під час спалювання вугілля міститься на рівні $R_{90} = (7-10)\%$. Оптимальним значенням показника крупності вугільної дробенки, яка просіюється через два сита з розмірами чарунок (5×5) та (10×15) мм, є $R_5 = (19-27)\%$.

Окрім контролю крупності вугілля та тонкості його пилу, ситовий аналіз за умов ТЕС застосовується для визначення фракційного (гранулометричного) складу вугілля (ДСТУ 4082-2002), вугільного пилу та золошлакових матеріалів (ISO 2591-73). Результати таких аналізів використовуються для вибору та експлуатації паливопідготовчих засобів, дріблення та помелу вугілля, оптимізації виробництва вугільного пилу та його спалення, а також для визначення рівня золоочищення димових газів, оптимізації режимів роботи золоуловлювачів та оцінювань екологічної безпеки за умов викиду в довкілля золошлакових матеріалів.

Гранулометричний склад вугілля, вугільного пилу, шлаку та летючої золи визначається за результатами просіювання відібраних проб матеріалу через набір (комплект) із (4—5) сит із розмірами чарунок, що послідовно убувають. Результатом, наприклад, просіювання проби вугільного пилу кількістю

M через 4 сита з розмірами чарунок 200, 125, 90, 71 мкм загальна кількість індивідуалізованих елементів така:

$$\text{в абсолютній формі: } M = M_{F_{200}} + M_{F_{125}} + M_{F_{90}} + M_{F_{71}} + M_{D_{71}}, \quad (5)$$

$$\text{у відносній формі: } 1 = F_{200} + F_{125} + F_{90} + F_{71} + D_{71},$$

де $F_{200} = M_{F_{200}}/M$, $F_{125} = M_{F_{125}}/M$, $F_{90} = M_{F_{90}}/M$, $F_{71} = M_{F_{71}}/M$ та $D_{71} = M_{D_{71}}/M$ — частоти зустрічності індивідуалізованих елементів відповідно надситового (фракційних залишків F_{200} , F_{125} , F_{90} , F_{71}) та підситового (проходу D_{71}) вугільного пилу.

Сумарна кількість пилу на ситі заданого розміру чарунки й усіх інших, розміщених у наборі над ним із розмірами чарунок, більших за заданий, називається *повним залишком* і становить:

для сита з чарунками:

$$71 \text{ мкм} \text{ — } R_{71} = F_{71} + F_{90} + F_{125} + F_{200},$$

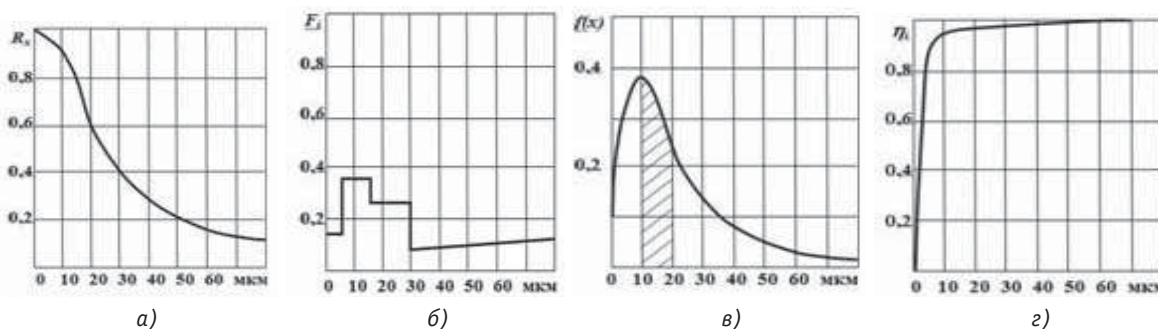
$$90 \text{ мкм} \text{ — } R_{90} = F_{90} + F_{125} + F_{200},$$

$$125 \text{ мкм} \text{ — } R_{125} = F_{125} + F_{200},$$

$$200 \text{ мкм} \text{ — } R_{200} = F_{200}.$$

Результати ситового аналізу оформлюються у виді таблиць або графіків. На рис. 4 наведено характеристики фракційного складу летючої золи перед золоуловлювачем (ЗУ) у виді графіків, за віссю абсцис яких відкладено розміри частинок золи, а за віссю ординат — повні чи фракційні її залишки, або фракційні залишки золи, віднесені до величини інтервалу розмірів, чи фракційна ефективність ЗУ. Отже, виявлення сукупності летючої золи перед ЗУ у відношеннях еквівалентності $R(\approx)$ і порядку $R(<)$, окрім класифікації її за дихотомічною ознакою (класами крупних та дрібних частинок), уможливило упорядкування частинок кожного класу еквівалентності за ознакою розмірів, що монотонно зростають чи убувають, окремих фракцій класу (фракційного складу золи). Потрібно зауважити, що майже всі фізичні механізми вилучення частинок летючої золи із димових газів реалізуються з різною ефективністю: більш ефективно вилучаються крупні частинки порівняно з дрібними. Тому в техніці пилозолоочищення, разом із повними ефективностями η_{zy} та проскоками ε_{zy} , використовуються фракційні ефективності η_i та проскоки ε_i (ефективності та проскоки летючої золи i -ої фракції).

Складніше визначається чисельність еквівалентних класів ТСП. По-перше, існує принципова відмінність у поняттях теплоти процесу в термодинаміці й теплоти у молекулярній фізиці. Остання розуміється звичайно як енергія безладного (теплого) руху мікроструктурних елементів тіла. Лише у найпростіших і окремих випадках кількість відданої тілом



а) повні залишки золи, крива яких відбиває інтегральний розподіл золи. Ним користуються, коли треба визначити частки пилу, які складають частинки з розмірами, більшими чи меншими за визначене значення. Окрім того, він уможливує визначення частки пилу, що припадає на частинки з визначеними інтервалами, наприклад, від $x_1 = 10$ мкм до $x_2 = 20$ мкм. Згідно з рисунком ця частка дорівнює різниці двох повних залишків:

$$F_{x_1/x_2} = R_{x_1} - R_{x_2} = 0,88 - 0,58 = 0,3$$

б) фракційні залишки золи, ступінчаста крива яких називається гістограмою і побудована за умови постійної частки частинок усередині певного інтервалу розмірів; є вихідними даними для розрахунку системи золоочищення димових газів ТЕС;

в) фракційні залишки золи, віднесені до величини інтервалу розмірів, крива яких називається диференційною кривою, оскільки гранично це відношення відповідає похідній:

$$F_x(x + \Delta x) / \Delta x = \Delta R_x / \Delta x = dR_x / dx.$$

Тоді для інтервалу $\Delta x = (20 - 10)$ мкм $f(x) = \frac{F_{x_2} - F_{x_1}}{\Delta x} = \frac{0,3}{10} = 0,03$ й імовірність потрапляння розмірів частинок в інтервал Δx така (заштрихована зона):

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \approx 0,03 \cdot 10 = 0,3.$$

г) ефективність уловлення частинок i -ої фракції золоуловлювачем (електрофільтром) крива яких називається фракційною ефективністю ЗУ (поля), є вихідними даними для розрахунку золоочищення димових газів ТЕС.

Рис. 4. Характеристики фракційного складу летючої золи та ефективності електрофільтра:

- а) інтегральний розподіл летючої золи; б) гістограма фракційного складу (фракційних залишків); в) диференційна крива розподілу летючої золи; г) крива фракційної ефективності електрофільтра

Fig. 4. Characteristics of the fractional composition of fly ash and the efficiency of the electrostatic precipitator: а) integral distribution of fly ash; б) histogram of fractional composition (fractional residues); в) differential distribution curve of fly ash; д) fracture efficiency curve of the electrostatic precipitator

теплоти дорівнює зменшенню енергії теплового руху молекул. Це має місце для ідеального газу за умов незмінного його об'єму. Однак у загальному випадку теплота процесу залежить ще й від інших складових внутрішньої енергії тіла (в процесах змін агрегатного стану, передавання теплоти випромінюванням, у хімічних реакціях тощо), а також від усієї картини енергетичних взаємодій тіла з довкіллям [17]. По-друге, теплота процесу — це похідна величина, визначальне рівняння якої (для КУ за умов незмінного тиску робочого тіла) має вид [7]:

$$Q_{1-2} = D(h_2 - h_1), \quad (6)$$

де D — витрата водяної перегрітої пари; вимірюється метричною шкалою відношень; h_1 і h_2 — ентальпії робочого тіла на вході в КУ і на виході із нього відповідно, є функціями термодинамічних параметрів (тиску та температури) робочого тіла (живильної води (на вході), перегрітої пари (на виході) та визначаються за таблицями термодинамічних властивостей води і водяної пари за результатами їх вимірювань).

Числове значення результату розрахунку теплоти за формулою (6) приймається як чисельність індивідуалізованих елементів використаної теплоти еквівалентного класу.

ВИСНОВКИ

1. Дивно, що сучасне наукоємне, технічно та технологічно складне енерговиробництво на ТЕС контролюється неметричними шкалами і, зокрема, найбільш низькоінформативними шкалами назв. Це зумовлено, по-перше, поширеним за умов сучасних ТЕС факельним спалюванням вугілля, яке потребує його подрібнення та помелу, а також видалення із топки утвореної золи. Контроль таких процесів виконується через визначені якісні властивості крупно-дрібних кусків вугілля, шлаку/частинок вугільного пилу летючої золи. По-друге, процес перетворення теплоти в механічну енергію реалізується циклом Ренкіна, який базується на основних законах термодинаміки. Термодинамічні процеси виробництва, транспортування та перетворення теплоти також контролюються

якісними властивостями використаної–втраченої теплоти кожного процесу. Отже, властивості крупно–дрібних кусків/частинок вугілля та використаної–втраченої теплоти процесу виявляються у відношенні еквівалентності, класифікуються двома еквівалентними класами, утворюючи відповідні шкали назв.

2. Частоти зустрічності назв донної золи (шлаку) $a_{\text{шл}}$ та летючої золи виносу $a_{\text{вин}}$ класів еквівалентності неметричної шкали золи — важливі технологічні показники факельного спалювання вугілля в КУ вугільних енергоблоків. Разом з тим вони є результатом успадкування тривалої історичної практики використання вогнищ та видалення їх залишків від первісної людини до наших днів. У цьому аспекті теплоенергетика випереджала і наразі випереджає метрологію у розвитку неметричних шкал вимірювання, збагачуючи їх теорію прикладними аспектами. Адже метрологія лише сьогодні запроваджує такі шкали, тоді коли в теплоенергетиці вони здавна мали поширене використання, щоправда, свідомо технологічно, але несвідомо метрологічно.

3. Частоти зустрічності назв об'єктів класів еквівалентності неметричних шкал кусків R_5 вугілля/частинок R_{90} вугільного пилу, золи $a_{\text{шл}}$, $a_{\text{вин}}$, летючої золи $\eta_{\text{зу}}$, $\varepsilon_{\text{зу}}$ та теплоти спаленого палива у процесах виробництва в КУ $\eta_{\text{ку}}$, $\varepsilon_{\text{ку}}$, її транспортування ПП $\eta_{\text{пп}}$, $\varepsilon_{\text{пп}}$ та перетворення в ТУ $\eta_{\text{ту}}$, $\varepsilon_{\text{ту}}$ і в цілому використаної теплоти енергоблоком $\eta_{\text{бл}}$ — важливі технологічні, техніко-економічні та екологічні показники енергоблока. Деякі з них мають спеціальні назви ($\eta_{\text{ку}}$ — коефіцієнт корисної дії (ККД) КУ, $\eta_{\text{зу}}$ — ефективність ЗУ). Їх сукупне використання разом із результатами технічного аналізу вугілля A^r , Q_i^r та прямих вимірювань витрати вугілля (B) і потужності енергоблока (N_e) уможливує запровадження комплексного контролю використання вугілля за певний період часу та забруднення золошлаковими матеріалами (ЗШМ) доквілля за допомогою таких базових залежностей [15]:

$$\begin{aligned} \text{паливо} - \text{ТСП: } BQ_i^r &= \frac{N_e}{\eta_{\text{бл}}} = \frac{N_e}{\eta_{\text{ку}} \eta_{\text{пп}} \eta_{\text{ту}}^*} = \\ &= \frac{N_e}{(1-\varepsilon_{\text{ку}})(1-\varepsilon_{\text{пп}})(1-\varepsilon_{\text{ту}}^*)} \end{aligned} \quad (7)$$

паливо — ЗСП:


$$\frac{BA^r}{100} = [a_{\text{вин}} \varepsilon_{\text{зу}} + (a_{\text{шл}} + a_{\text{вин}} \eta_{\text{зу}})] \text{ЗСП}, \quad (8)$$

де — ККД турбінної установки з урахуванням ККД електрогенератора.

4. Відсутність єдності у назвах відносних чисельностей індивідуалізованих елементів (об'єктів) еквівалентних класів (частки, масові та відсоткові частки, частоти зустрічності [13], коефіцієнти корисної дії [7], ефективність [9], просок тощо). На нашу думку, правильно назвати такі відношення *частотністю події*, яка дорівнює відношенню числа спостережень певної події до загального числа спостережуваних одиничних подій [18], що збігається з визначенням частоти події в теорії ймовірностей [19] та спонукає залучення до теорії шкал таких відносно нових сутностей як подія, її частотність та ймовірність. Це логічно, оскільки масові операції, елементи технологічних процесів енерготехнології складаються із великого числа подібних між собою одиничних випадкових подій (утворення крупних/дрібних кусків у процесі подрібнення та помелу вугілля, донної золи та золи виносу в процесах перетворення негорючих домішків вугілля, корисної та безкорисної теплоти в процесах її виробництва, транспортування та перетворення). І взагалі, якщо виходить із сучасних фізичних уявлень, то основне джерело випадковості — квантовий характер явищ мікросвіту. Випадковими є переходи атомів і молекул із одних енергетичних станів у інші. Такі переходи супроводжується поглинанням та випромінюванням енергії, що має місце в процесах спалювання вугілля [20]. Але це вже питання теоретичної та законодавчої метрології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. РМГ 83-2007 (Рекомендации по межгосударственной стандартизации). Шкалы измерений. Термины и определения. — М.: Стандартинформ (RMG 83-2007 (Recommendations on interstate standardization). Scales of measurements. Terms and Definitions. — Moscow: Standartinform), 2008. — 49 с/р.
2. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. — М.: ВНИИФТРИ (Bryanskiy L.N., Doinikov A.S., Krupin B.N. Metrology. Scales, standards, practice. — М.: VNIIFTRI). — 2004. — 222 с/р.
3. Карел Берка. Измерения. Понятия, теоремы, проблемы: Пер. с чешск. — М.: Прогресс (Karel Berka. Measurements. Concepts, theorems, problems: Per. With Czech. — Moscow: Progress), — 1987. — 320 с/р.
4. Промоскаль В.І., Будко В.В., Заруба В.К. Щодо окремих метрологічних термінів в Україні // Стандартизація сертифікація якості (Promoskal V.I., Budko V.V., Zaruba V.K. Shodo окремих metrologichnyh terminov in Ukraine // Standardization of the certification of yakist). — 2015. — № 6.
5. Промоскаль В.І. Метрологічні основи теплоенергетики. — Харків: «Друкарня Мадрид» (Promoskal V.I.

- Metrological bases of heat energy. — Kharkiv: «Drukar-nya Madrid»), — 2016. — 257 с/р.
6. Ястржембский А.С. Термодинамика и история ее развития. — М. — Л. «Энергия» (A.S Yastrzhembsky, Thermodynamics and the history of its development. — М. — Л. «Energy»). — 1966. — 668 с/р.
 7. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: Учебник для вузов/ Под ред. В.Я. Гиршфельда. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат (Ryzhkin V.Ya. Thermal power plants: Textbook for universities / Ed. V.Ya. Hirschfeld. — 3rd ed., Pererab. And additional. — Moscow: Energoatomizdat). — 1987. — 328 с/р.
 8. Ковалев А.П. и др. Парогенераторы: Учебник для вузов / А.П. Ковалев, Н.С. Лелеев, Т.В. Виленский; Под общ. ред. А.П. Ковалева. — М.: Энергоатомиздат (Kovalev A.P. et al. Steam generators: A Textbook for Universities / A.P. Kovalev, N.S. Leleev, T.V. Vilensky; Under the Society. Ed. A.P. Kovalev. — Moscow: Energoatomizdat). — 1985. — 376 с/р.
 9. Гаврилов Е.И. Топливо-транспортное хозяйство и золошлакоудаление на ТЭС: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат (Gavrilov E.I. Fuel and transport economy and ash and slag removal at TPP: Proc. Manual for universities. — Moscow: Energoatomizdat). — 1987. — 169 с/р.
 10. Львов М.Р. Словарь антонимов русского языка: более 2000 антоним. пар/Под ред. Л.А. Новикова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Рус. яз. (Lvov M.R. Dictionary of the antonyms of the Russian language: more than 2000 antonym. Pairs / Ed. L.A. Novikova. — 2-nd ed., Rev. And additional. — М.: Rus. Lang.), — 1984. — 384 с/р.
 11. Голота Я.Я. Логико-антонимический подход к формированию оценок. Измерительная техника (Golota Ya.Ya. Logico-antonymic approach to the formation of estimates. Measuring technique). — 1992, — № 6.
 12. Пфанцагль И. Теория измерений | Пер. с англ. — М.: Мир (Pfanzagl I. Theory of Measurement | Trans. With the English. — Moscow: The World), — 1976.
 13. Тюменева Ю.А. Психологическое измерение: Учеб. пособие для студентов вузов / Ю.А. Тюменева. — М.: Аспект Пресс (Tyumeneva Yu.A. Psychological Measurement: Proc. Allowance for students / Yu.A. Tyumeneva. — Moscow: Aspect Press). — 2007. — 192 с/р.
 14. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Беларус. гос. ин-т метрологи. Изд. 2-е, испр. — СПб.: НПО «Профессионал» (International Dictionary of Metrology: basic and community concepts and relevant terms: trans. English. and Fr./Vsegor. Scientific-issled.Institute of Metrology. D.I. Mendeleyev, Belarus. State.In-t metrologists. Ed. 2 nd, Rev. — SPb.: NPO «Professional»), — 2010. — 82 с/р.
 15. Промоскаль В.И., Заруба В.К., Будко В.В., Близначенко О.М. Наметричні шкали в енерготехнології ТЕС. Енергетика та електрифікація (Promoskal V.I., Zaruba V.K., Budko V.V., Bliznichenko O.M. Non-metric scales in energy technologic TES), — 2016. — № 3.
 16. Белосельский Б.С., Вдовченко В.С. Контроль твердого топлива на электростанциях. — М.: Энергоатомиздат (Belosel'skii BS, Vdovchenko V.S. Control of solid fuels in power plants. — Moscow: Energoatomizdat), 1987. — 176 с/р.
 17. Жуковский В.С. Термодинамика/ Под ред. А.А. Гухмана. М.: Энергоатомиздат (Zhukovsky, V.S., Thermodynamics, Ed. A.A. Gukhman. Moscow: Energoatomizdat), — 1983. — 304 с/р.
 18. Корнеева Т.В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины: около 7000 терминов. — М.: Рус. яз (Korneeva, T.V. Explanatory dictionary on metrology, measuring technology and quality management. Basic terms: about 7000 terms. — Moscow: Rus. Yaz). — 1990. — 464 с.
 19. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и инженерное приложение. — М.: Наука. Гл. ред. физ. — мат. лит (Venttsel E.S., Ovcharov L.A. Theory of probability and engineering application. — Moscow: Science. Ch. Ed. Fiz. — Lit). — 1988. — 480 с/р.
 20. Скороход А.В. Вероятность вокруг нас. Киев, изд. «Наукова думка» (Skorokhod A.V. The probability around us. Kiev, «Naukova Dumka»). — 1980. — 198 с/р. 

Отримано / received: 20.04.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Р.М. Трищем (Україна).
Prof. R.M. Trisch, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 656.61.052

ГАРАНТУВАННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ ШЛЯХОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕРТИФІКОВАНИХ СИСТЕМ

Р. Габрук, кандидат технічних наук, докторант,
Національний університет «Одеська морська академія»

Сформовано метод гарантування безпеки мореплавання внаслідок забезпечення достовірної вірогідності надійного функціонування відповідних цільових комплексів рухомого об'єкта водного транспорту, сертифікованих класифікаційним товариством. Процес практичної реалізації гарантування безпеки мореплавання базується на розрахунку складених методами системного підходу та аналізу складних інтегрованих систем алгебраїчних виразів, які характеризують надійність функціонування відповідних компонентів, систем та комплексів.

In this article it was generated a method to guarantee the safety of navigation by providing reliable probability of reliable operation the respective complexes of the mobile water transport object, which are certified by the classification society. The practical implementation of ensuring safety of navigation is based on the calculation of complex integrated systems of algebraic expressions, which are formed by methods of the system approach and analysis that characterize the reliability of relevant components, systems and complexes.

Ключові слова: водний транспорт, безпека мореплавання, надійність систем, теорія ймовірності.
Keywords: water transport, safety of navigation, system reliability, probability theory.

Інтенсифікація промислового видобутку вуглеводнів пов'язана з розвідкою й освоєнням перспективних шельфових районів України, де пріоритетними є рухомі об'єкти водного транспорту (РОВТ) із системами динамічного позиціонування (СДП). Процес динамічного позиціонування (ДП) пов'язаний із виконанням конкретної технологічної роботи у локально обмеженому просторі. При цьому виникає необхідність забезпечення мореплавання і запобігання забрудненню навколишнього середовища. Діяльність усіх структур Міжнародної морської організації та морських адміністрацій спрямовано на встановлення причин аварій, їх аналіз і розроблення заходів щодо їх недопущення у майбутньому. Постановою Верховної Ради України № 3938-ХІІ від 04.02.1994 Україна приєдналася до Конвенції про Міжнародну морську організацію. В Україні створено єдину систему управління безпекою на морському і річковому транспорті [1]. Саме тому увагу вчених і організацій морської галузі України спрямовано на забезпечення мореплавання.

Автори [2] безпеку мореплавання пропонують розділити на три основні складові: навігаційна безпека, морехідна безпека, пожежна і вибухобезпека. Пошуку шляхів підвищення безпеки мореплавання присвячено цілий ряд робіт вітчизняних та закордонних вчених. Проте всі шляхи вирішують проблему частково. Тобто, це роботи, присвячені навігаційній безпеці, морехідній або пожежній безпеці. Це зумовлює необхідність на базі системного підходу [3] провести комплексну оцінку безпеки мореплавання РОВТ.

Мета статті — пошук шляхів комплексного гарантування безпеки мореплавання рухомих об'єктів водного транспорту методом системного підходу та аналізу систем й їх складових частин.



© Габрук Р., 2017

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОБҐРУНТУВАННЯМ ОТРИМАНИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як було зазначено вище, проблема безпеки мореплавання — комплексна проблема, складові частини якої пов'язані між собою. Використовуючи методи системного підходу та аналізу систем, можна виділити характерну особливість — РОВТ складається із цільових комплексів, вихід з ладу яких призводить до загрози безпеці мореплавання (зокрема, складової безпеки мореплавання). Цільові комплекси складаються із систем. Функціональні якості систем мають відповідати вимогам класифікаційних товариств (КТ), зокрема, Регістра судноплавства України (РУ).

РУ — національне класифікаційне товариство, яке здійснює технічний нагляд і класифікацію цивільних морських суден, суден змішаного і внутрішнього плавання та малих суден. Регістр є членом Міжнародної асоціації органів технічного нагляду і класифікації (ОТНК) та враховує у своїй діяльності рішення і норми етики ОТНК. Регістр має систему управління якістю, яка відповідає застосовним вимогам стандарту України ДСТУ ISO 9001, що підтверджується відповідним сертифікатом. Окрім того, Регістр за дорученням і від імені Уряду України або за дорученням урядів інших країн здійснює в межах своєї компетенції огляди відповідно до вимог міжнародних конвенцій, угод і договорів, у яких беруть участь ці країни [4].

Отже, для гарантування безпеки мореплавання та якісного виконання технологічної роботи необхідно забезпечити надійність функціонування цільових комплексів РОВТ. Під терміном надійність цільового комплексу розумітимемо його властивість зберігати в часі й в установлених межах значення всіх параметрів, що визначають його здатність виконувати необхідні функції у заданих режимах і умовах застосування. Надійність розглядається як випадкова подія. Інженерний підхід до надійності розглядає ймовірність безвідмовної роботи як оцінку на певному статистичному довірчому рівні.

Для реалізації алгоритмів оцінки безвідмовної роботи треба провести декомпозицію РОВТ як складної ТС на цільові комплекси. У свою чергу, цільові комплекси можна поділити на системи, системи — на компоненти або на інші підсистеми. Потрібно зазначити, що компоненти — це найпростіші, нерозкладні елементи системи.

Надійність компонента позначимо \tilde{p}_{HK} . Вона зумовлює властивість компонента зберігати працездатний стан та виконувати потрібні функції до настання граничного стану за встановленої КТ систе-

ми якісного технічного обслуговування і ремонту. Надійність змінюється з часом експлуатації, показником якого є технічний ресурс або термін служби — сумарний наробіток компонента, у разі досягнення якого експлуатація має бути припинена незалежно від його стану. Термін служби визначається у сертифікованих документах.

Для зручності подання інформації стосовно надійності систем і компонентів розробимо спосіб представлення у виді схем з такими позначеннями. На схемах компоненти, без яких робота системи неможлива, зобразимо як ланки, з'єднані послідовно. А ті, що дублюють один одного, відобразимо ланками, з'єднаними паралельно. Припустимо, що надійність усіх n компонентів така ж, тобто:

$$\tilde{p}_{\text{HK1}} = \tilde{p}_{\text{HK2}} = \dots = \tilde{p}_{\text{HK}i} = \dots = \tilde{p}_{\text{HK}n}.$$

Розглянемо систему, що складається із двох однакових компонентів. Відмова системи станеться за відмови обох компонентів. І в іншому випадку відмова системи станеться за відмови будь-якого з цих компонентів. Схематично це можна зобразити у такий спосіб (рис. 1).

Використовуючи алгебру подій, надійність системи \tilde{p}_C визначимо за формулою:

$$\tilde{p}_C = 1 - (1 - \tilde{p}_{\text{HK}})^2. \quad (2)$$

За дублювання $n - 1$ такими ж компонентами ймовірнісна безпека визначається за такою формулою:

$$\tilde{p}_C = 1 - (1 - \tilde{p}_{\text{HK}})^n. \quad (3)$$

У разі, якщо відмова системи станеться за відмови будь-якого із n компонентів, то безпека функціонування системи без резервування визначається у такий спосіб:

$$\tilde{p}_C = \tilde{p}_{\text{HK}}^n. \quad (4)$$

Розглянемо безперервну випадкову величину T — тривалість часу безвідмовної роботи компонента системи. Позначимо прийняті її значення через t , $0 \leq t \leq \infty$. Інтегральна функція розподілу має вид:

$$F(t) = p(T < t). \quad (5)$$

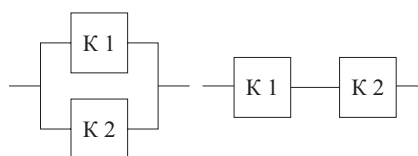


Рис. 1. Наочний спосіб представлення інформації стосовно надійності.

- a) — компоненти резервують один одного;
б) — компоненти, без яких робота системи неможлива

Fig. 1. An illustrative way to present information about the reliability.

- a) — the components that reserve each other;
b) — the components without which the operation of the system is impossible

Функція (5) визначає ймовірність відмови компонента за час тривалістю t . Отже, ймовірність безвідмовної роботи за цей же час тривалістю t , тобто ймовірність протилежної події $T > t$, дорівнює:

$$\tilde{p}_{\text{НК}}(t) = p(T > t) = 1 - F(t). \quad (6)$$

Функцією надійності $\tilde{p}_{\text{НК}}(t)$ називають функцію, що визначає ймовірність безвідмовної роботи компонента за час тривалістю t . Якщо тривалість часу безвідмовної роботи компонента має показниковий розподіл, то функція надійності в цьому випадку запишеться у виді:

$$\tilde{p}_{\text{НК}}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t}) = e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

де λ — інтенсивність відмов.

Отже, показниковим законом надійності називають функцію надійності, яка визначається (7). Надійність цільового комплексу визначається після розрахунку надійності систем:

$$\tilde{p}_{\text{ЦК}} = \tilde{p}_{\text{C1}} \cdot \tilde{p}_{\text{C2}} \cdot \dots \cdot \tilde{p}_{\text{Cn}}. \quad (8)$$

Безпека мореплавання визначається гарантованим штатним функціонуванням всіх цільових комплексів РОВТ. Отже:

$$\tilde{p}_{\text{БМ}} = \tilde{p}_{\text{ЦК1}} \cdot \tilde{p}_{\text{ЦК2}} \cdot \dots \cdot \tilde{p}_{\text{ЦКn}}. \quad (9)$$

Ураховуючи, що нормальний закон розподілу є граничним законом для інших законів розподілу, можна записати умову достовірного гарантування безпеки мореплавання:

$$\tilde{p}_{\text{БМ}} \geq 0,9973. \quad (10)$$

Аналізуючи (10) можна зробити висновок, що ймовірність того, що абсолютна величина від-


хилення перевищить потрібне середньоквадратичне відхилення (а саме це є умовою вибраної достовірної вірогідності) дуже мала, а саме, дорівнює 0,0027. Такі події, зважаючи на принцип неможливості малоімовірних подій, можна вважати практично неможливими. Саме завдяки (10) досягається практичний ефект гарантування безпеки мореплавання.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВА ПОДАЛЬШОЇ РОБОТИ ЗА ЗАЗНАЧЕНИМ НАПРЯМОМ.

У статті сформовано метод гарантування безпеки мореплавання внаслідок забезпечення достовірної вірогідності надійного функціонування відповідних цільових комплексів, які є складовими ТС РОВТ. Процес практичної реалізації гарантування безпеки мореплавання базується на складених методах системного підходу та аналізу алгебраїчних виразах, які характеризують надійність функціонування компонентів, систем та комплексів. Розроблено зручний наочний спосіб представлення інформації у виді схем щодо резервування компонентів та встановлення їх зав'язків.

Перспективою у подальшому напрямку досліджень є дослідження зв'язків між цільовими комплексами та системами РОВТ. Убачається необхідність математичного описання людини-оператора під час виконання керування цільовими комплексами у процесі експлуатації РОВТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Наказ № 904 МТУ від 20.11.2003. «Про затвердження Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті». — Київ: Офіційний вісник України (Order number 904 from 20.11.2003 MTU. «Approval of Regulations on safety management system of navigation for sea and river transport». — Kyiv, Ukraine Official Herald), 2004. — № 52 (09.01.2004) (Частина/ Part 2), — 2004. — № 52 (09.01.2004) — С/Р. 2844.
2. Бондар В.М. Наукова спрямованість кафедри — проблема безпеки мореплавання / В.М. Бондар, В.Г. Сізов // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасне судноплавство і морська освіта» Частина I. — Одеса (Bondar V.M. The scientific direction of the department is the problem of maritime security / V.M. Bondar, V.G. Sizov // Materials of international scientific conference «Modern shipping and maritime education» Part I. — Odessa): — 2004. — С/Р. 114—118.
3. Ван Гиг Дж. Прикладная общая теория систем / В.Д. Гиг. — Москва: Мир (Van Gig J. Applied general system theory/ V.D. Gig — Moscow.: Mir), — 1981. — 732 с/р.
4. Загальні положення про діяльність при технічному нагляді. Правила класифікації та побудови суден. Частина I «Класифікація». Том 1 / Регістр судноплавства України. — Київ.: РСУ (General provisions on the activities with technical supervision. Rules for classification and construction of vessels. Part I «Classification». Volume 1 / Shipping Register of Ukraine. — Kyiv.: SRU), — 2014. — 205 с/р. 

Отримано / received: 25.04.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Г.Л. Барановим (Україна).
Prof. G.L. Baranov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 534.014.4

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛ ШУМУ ТА ЕМП У ВИРОБНИЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

О. Мамонтов, старший викладач кафедри охорони праці,

Ю. Колтун, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-мережної інженерії,

О. Мамонтов, студент факультету інфокомунікацій,

Харківський національний університет радіоелектроніки

Запропоновано метод оптимального розміщення джерел постійного шуму у виробничому приміщенні. Метод також застосовується до розміщення джерел постійного електромагнітного поля діапазону надвисоких частот. Цей метод може бути застосований для атестації й сертифікації робочих місць. Розглядається постановка, алгоритм і приклади розв'язання оптимізаційної задачі розміщення джерел, за якими досягається мінімальний шкідливий вплив на людей. Наводиться цільова функція й обмеження. Метод засновано на випадковому пошуку (методі Монте-Карло). У ході пошуку генерується безліч варіантів рішення, заснованих на випадкових значеннях координат джерел у межах приміщення. У результаті пошуку залишається те рішення, за яким цільова функція сягає мінімуму і виконуються задані обмеження. Результати розрахунку свідчать стосовно ефективності запропонованого методу та можливості зниження шкідливого впливу зазначених чинників на людей.

A method of optimum placement of persistent noise sources in a working area is suggested. The method is also applicable to placement of sources of a constant electromagnetic field of microwave range. This method can be applied for the attestation and certification of workplaces. The paper considers a statement of the optimization problem of placing the sources, an algorithm and examples of its solution. This solution minimizes an adverse noise effect on people. The objective function and constraints are given. The method is based on random search (Monte Carlo method). In the course of the search a set of solution variants are generated that are based on the random values of the sources coordinates within the working area. Only that solution is retained by the search at which the objective function reaches minimum value and the given constraints are realized. The calculation results are evidence of the efficiency of the method proposed and possibility of minimizing the effect of the mentioned adverse factors on people.

Ключові слова: шум, електромагнітне поле, надвисока частота, оптимізація, шкідливий вплив, координата, випадкова величина, цільова функція.

Keywords: noise, electromagnetic field, microwave range, optimization, adverse factors, coordinate, random value, objective function.

Підвищені рівні акустичного шуму й електромагнітних полів (ЕМП) на робочих місцях — це небезпечні та шкідливі виробничі чинники, які характеризуються кумулятивною дією на людей [1—3]. Тривалий вплив цих чинників на людину в процесі трудової діяльності призводить до погіршення самопочуття, професійної патології та зниження працездатності.

Наявні принципи, методи і відповідні технічні засоби захисту [2, 3] не завжди ефективні з різних причин. Захист часом здійснюється шляхом скорочення тривалості робочої зміни. При цьому доза шкідливого впливу на людину не повинна перевищувати допустимої величини. Для здійснення виробничого процесу за таких умов потрібне збільшення чисельності працівників, що спричинить додаткові фінансові витрати підприємства.

Екранування, застосування різних відбивальних і поглинальних покриттів стін, перекриттів й інших поверхонь приміщення часто ускладнено з технологічних причин, міркувань пожежної безпеки, естетики тощо.



О. Мамонтов



Ю. Колтун



О. Мамонтов

Застосування засобів індивідуального захисту (вкладок у вушні раковини, навушників, шоломів, захисних окулярів, костюмів тощо) часто ускладнює роботу людей, викликає дискомфорт, необхідність додаткових технологічних перерв та дотримання заходів гігієнічного характеру.

Архітектурно-планувальні рішення, спрямовані на зниження зазначених шкідливих факторів, зазвичай приймаються в процесі проектування, модернізації виробництва і також пов'язані зі значними фінансовими витратами, тривалими термінами будівництва.

Аналіз літератури та нормативно-технічних документів [4—8] засвідчив, що на сьогодні розміщення джерел шуму (ДШ) всередині виробничого приміщення, що реалізує принцип захисту відстанню, не розглядається як оптимізаційна задача. Наявний інженерний досвід засновано на директивних вказівках та рекомендаціях із розміщення технологічного встаткування і робочих місць під час проектування виробничих процесів. За такого підходу неможливо досягти максимального позитивного ефекту від реалізації цього принципу, внаслідок чого люди за виробничих умов піддаються додатковим і необґрунтованим шкідливим впливам. Цим і пояснюється *актуальність завдання*.

Очевидна доцільність розроблення методу оптимального розміщення та орієнтації джерел шуму (або ЕМП), що дозволяє мінімізувати шкідливий вплив на людей у процесі трудової діяльності.

Мета статті — доказ можливості мінімізації шкідливого впливу на людей від джерел шуму (або ЕМП). Мінімізація шкідливого впливу досягається шляхом розрахунку оптимальних координат джерел та їх розміщення всередині виробничого приміщення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ ШУМУ У ВИРОБНИЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

Визначення оптимальних координат джерел із заданим кроком відліку відноситься до дискретної оптимізації і може вирішуватися різними методами, описаними в [9]. Як цільова функція в процесі визначення оптимальних координат ДШ пропонується розглядати середнє енергетичне навантаження на людину протягом робочої зміни:

$$F_{\text{ш}} = EH_{\text{ср ш}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^8 (I_{Aji} \cdot t_j) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $EH_{\text{ср ш}}$ — середнє енергетичне навантаження шуму на людину протягом робочої зміни, Вт×год/м²; I_{Aji} — ефективне значення інтенсивності звуку на j -му робочому місці в октавній смузі i з урахуван-

ням характеристики «А» вимірювачів шуму [10—12], Вт/м²; t_j — тривалість шумового впливу протягом робочої зміни, год; n — кількість робочих місць (осіб) всередині приміщення; j — номер робочого місця.

Обмеженнями у цій задачі є:

- максимально допустимі рівні звукового тиску на середньгеометричних частотах октавних смуг (граничний спектр);
- габарити приміщення, які накладаються на координати ДШ (ДШ не можуть перебувати за межами приміщення);
- умови розбіжності координат ДШ (різні ДШ не можуть перебувати одночасно в одному місці).

Обмеження на координати ДШ, зумовлені розмірами приміщення, записуються у такий спосіб:

$$\begin{aligned} X_1 < A; X_2 < A; \dots; X_m < A; \\ Y_1 < B; Y_2 < B; \dots; Y_m < B; \\ Z_1 < H; Z_2 < H; \dots; Z_m < H, \end{aligned} \quad (2)$$

де $X_p; Y_p; Z_p$ — координати ДШ, м; m — кількість джерел; A, B, H — розміри приміщення, м.

Умови розбіжності координат ДШ записуються як $X_1 \neq X_2 \neq \dots \neq X_j; Y_1 \neq Y_2 \neq \dots \neq Y_j; Z_1 \neq Z_2 \neq \dots \neq Z_j$. (3)

Вихідні (початкові) дані:

- * кількість робочих місць (працівників) усередині приміщення n ;
- * кількість ДШ усередині приміщення m ;
- * координати робочих місць $X_j; Y_j; Z_j$, м (j — номер робочого місця);
- * розміри приміщення $A; B; H$, м;
- * кількість циклів обчислювань K ;
- * номер поточного циклу k ;
- * середній коефіцієнт звукопоглинання у приміщенні $\alpha_{\text{ср і}}$;
- * потужність ЕМП W_{pi} , яке випромінюється ДШ в октавній смузі i (p — номер ДШ);
- * максимально допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах $L_{\text{доп і}}$, дБ;
- * крок відліку прямокутних координат ДШ Δh , м;
- * крок відліку кутових координат ДШ $\Delta \beta$, °;
- * тривалості шумового впливу на працівників протягом робочої зміни $t_1; \dots; t_n$, год.

Результатом розв'язання задачі є значення координат ДШ $(X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_m, Z_1, \dots, Z_m, \beta_1, \dots, \beta_m)$, за яких цільова функція досягає мінімуму і виконуються задані обмеження.

ОПИСАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ТА АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ

Запропонований метод розрахунку оптимальних координат ДШ засновано на випадковому пошуку

(методі Монте-Карло) [9, 13]. Алгоритм представлено на рис. 1. Розрахунок передбачає сталість шуму і відсутність когерентності звукових хвиль джерел. У ньому не враховуються загасання звуку в повітрі, а також характеристики спрямованості відбивальних поверхонь стін і кутів, пропорції приміщення, наявність звукопоглинальних поверхонь технологічного встаткування, меблів і людей. За необхідності ці фактори можуть бути включені в розрахункові формули, що не позначається на суті постановки і розв'язання оптимізаційної задачі.

Величина I_{Aji} у формулі (1) розраховується за формулою:

$$I_{Aji} = I_{ji} \cdot 10^{0,1A_i}, \quad (4)$$

де I_{ji} — інтенсивність звуку на робочому місці j в октавній смузі i без корекції, Вт/м²; A_i — величина корекції звукового тиску на середньогеометричній частоті октавної смуги i згідно з характеристикою «А» [10].

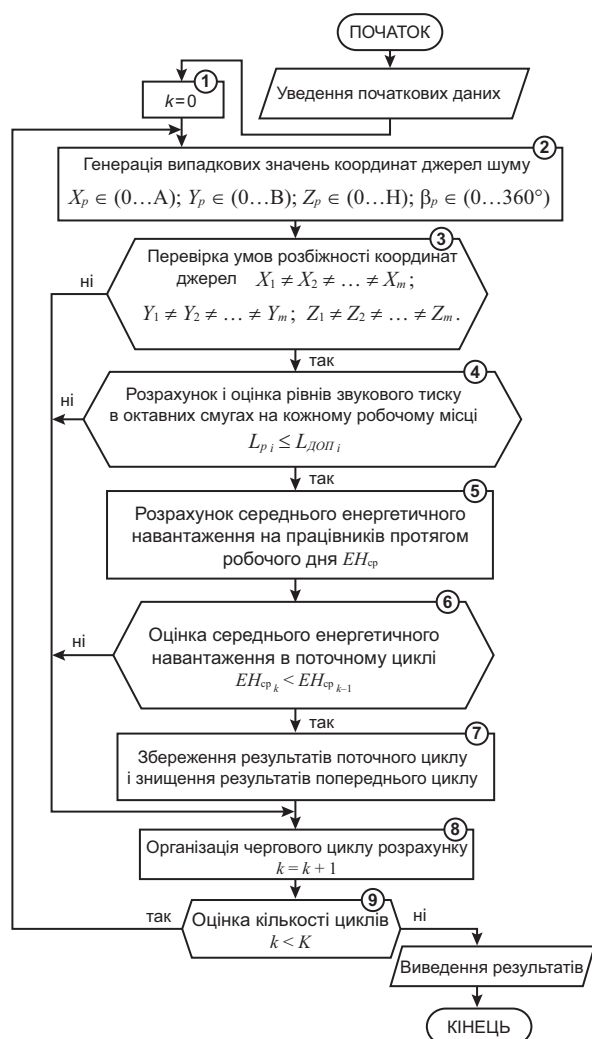


Рис. 1. Алгоритм розрахунку оптимальних координат ДШ

Fig. 1. The algorithm for calculating the optimal coordinates of noise sources

Інтенсивність звуку I_{ji} розраховується за правилом складання шумів [2,3,12] шляхом арифметичного складання інтенсивностей прямого та дифузного (багатократно відбитого) звуків:

$$I_{ji} = I_{прji} + I_{дифji}.$$

Інтенсивність прямого звуку на робочому місці без урахування корекції «А» розраховується з урахуванням характеристик спрямованості ДШ за формулою:

$$I_{прji} = \frac{1}{4\pi} \sum_{p=1}^m \frac{W_{pi} \cdot \Phi_p(X_j, Y_j, Z_j; X_p, Y_p, Z_p; \beta_p)}{(X_j - X_p)^2 + (Y_j - Y_p)^2 + (Z_j - Z_p)^2}, \quad (5)$$

де $\Phi_p(X_j, Y_j, Z_j; X_p, Y_p, Z_p; \beta_p)$ — фактор спрямованості ДШ; β_p — кутова координата ДШ (кут між проекцією осі головного пелюстка на площину XOY і віссю OX , рис. 5а).

Інтенсивність дифузного звуку розраховується за формулою

$$I_{дифji} = 4(1 - \alpha_{срi}) \sum_{j=1}^m W_{ji} / \alpha_{срi} S, \quad (6)$$

де S — сумарна площа звукопоглинальних поверхонь, м².

Відповідний рівень звукового тиску, створюваний на окремому робочому місці усіма ДШ, розраховується за формулою:

$$L_{ji} = 20 \lg \sqrt{\rho V (I_{прji} + I_{дифji})} / P_0. \quad (7)$$

За кожної реалізації випадкового стохастичного процесу координатам ДШ присвоюються випадкові дискретні значення, рівномірно розподілені у відповідних інтервалах із заданим кроком відліку. На основі цього розраховуються й оцінюються значення цільової функції за виконання заданих обмежень. У результаті виконання численних реалізацій зберігається той результат, який є найбільш вигідним з точки зору мінімізації цільової функції. Зі збільшенням числа реалізацій зростає ймовірність досягнення глобального оптимуму цільової функції.

Для зниження кількості обчислень може бути організовано цілеспрямований пошук рішення, заснований на комбінації методів випадкового пошуку (методу Монте-Карло) і поетапної (покрокової) локальної оптимізації в околі рішення, отриманого на попередньому кроці [9]. На кожному етапі можна використовувати алгоритм, представлений на рис. 1, зі зазначеннями околів координат ДШ. Через обмеженість обсягу цієї статті комбінований алгоритм не наведено.

КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

Комп'ютерна реалізація виконувалася у середовищі *Mathcad* [14]. Як приклад розглянуто виробниче

приміщення з розмірами (10x8x4) м. Середній коефіцієнт звукопоглинання α_{cp} в октавній смузі з середньою геометричною частотою 1000 Гц дорівнює 0,7. Для простоти розрахунків ураховано шуми лише в октавній смузі зі середньою геометричною частотою 1000 Гц. У приміщенні перебувало два джерела шуму зі звуковою потужністю $W_{pi} = 10^{-6}$ Вт.

У ході розрахунку визначалися прямокутні координати двох ДШ уздовж горизонтальних осей OX і OY , а також кути β_1 і β_2 , що визначають напрямки джерел у горизонтальній площині. Координати ДШ уздовж осі OZ (висоти від підлоги) були задані і дорівнювали висоті 1 м. Розрахунок рівнів звуко-

вого тиску й енергетичних навантажень на людину виконувався для висоти 1,55 м від підлоги, що відповідає середньостатистичній висоті розташування вушної раковини людини у положенні стоячи.

Генерація випадкових значень координат ДШ здійснювалася за допомогою відповідних функцій середовища *Mathcad*:

$$\begin{cases} X1 \leftarrow \text{round}(\text{rnd}(A-1))+1 \\ Y1 \leftarrow \text{round}(\text{rnd}(B-1))+1 \\ \beta1 \leftarrow \text{round}(\text{rnd}(180)) \end{cases} \quad (8)$$

Значення випадкової величини $X1$ рівномірно розподілені в межах (1... $A-1$) м, значення величини $Y1$ — в межах (1... $B-1$), а величин $\beta1$ і $\beta2$ — в межах (0...180°).

При цьому забезпечені мінімальні відстані, величиною 1 м від ДШ до стін, що дозволяє нехтувати спрямованістю стін і кутів.

Результати оптимізаційних розрахунків наведено на рис. 2—5. На рис. 2—4 представлено різні приклади оптимального розташування ізотропних (ненаправлених) ДШ відносно робочих місць і відповідне розподілення рівнів звукового тиску в приміщенні.

На рис. 5 а, б, в подано приклад оптимального розташування вузько спрямованих (анізотропних) ДШ відносно робочих місць і відповідне розподілення рівнів звукового тиску в приміщенні.

Відповідні характеристики спрямованості анізотропних ДШ у горизонтальній площині представлені на рис. 6, де

$$\Phi1(\Theta) = (e^{-q \left[2\pi \left(\frac{\Theta - \beta_1}{360} \right) \right]^2} + a / 1 + a) \cdot b, \quad (9)$$

$$\Phi2(\Theta) = (e^{-q \left[2\pi \left(\frac{\Theta - \beta_2}{360} \right) \right]^2} + a / 1 + a) \cdot b, \quad (10)$$

де $\Phi1$ і $\Phi2$ — фактори спрямованості відповідно першого та другого ДШ; $\Phi3$ — фактор спрямованості ізотропного джерела ($\Phi3=1$, на рис. 5 а не показано); Θ — кут відхилення від напрямку головного пелюстка ДШ у горизонтальній площині, градус; a, b, q — допоміжні величини ($a = 0, 2; b = 4; q = 10$).

Реальними спрямованими (анізотропними) джерелами шуму за виробничих умов є газові пальники,

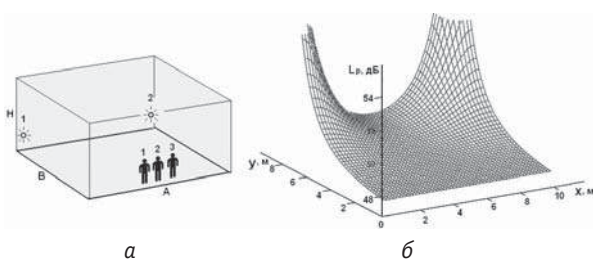


Рис. 2. Ізотропні джерела. Варіант 1
Fig. 2. Isotropic sources. Option 1

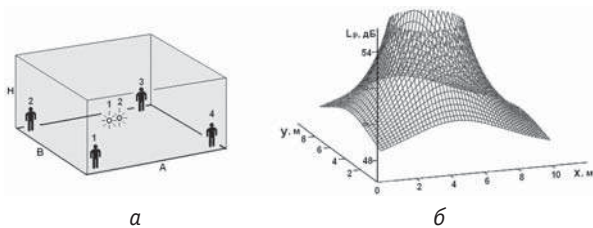


Рис. 3. Ізотропні джерела. Варіант 2
Fig. 3. Isotropic sources. Option 2

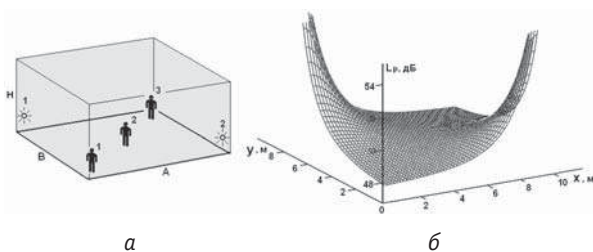


Рис. 4. Ізотропні джерела. Варіант 3
Fig. 4. Isotropic sources. Option 3

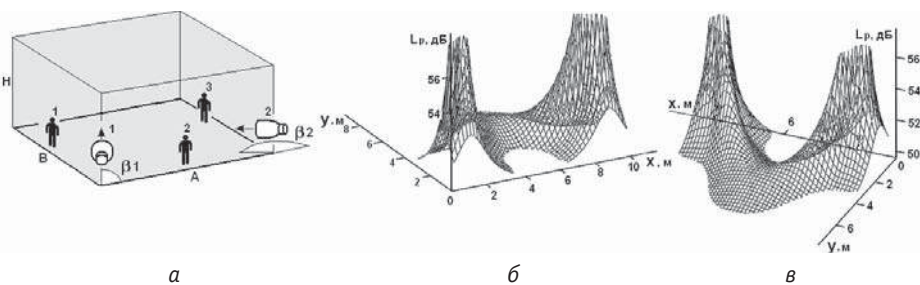


Рис. 5. Анізотропні джерела
Fig. 5. Anisotropic sources

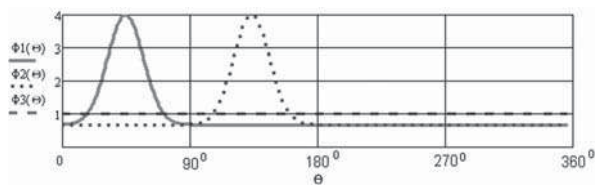


Рис. 6. Характеристики спрямованості джерел шуму в приміщенні

Fig. 6. The characteristics of the referral sources of noise in the room

металообробні й деревообробні верстати, що мають захисні огорожі, щити і кожухи, а також інше технологічне обладнання. Якщо геометричні розміри огорожувальних елементів близькі до довжини хвилі, то, внаслідок явища дифракції, за ними утворюються «тіньові» зони. Наприклад, захисне огороження розмірами (340—400) мм створює у верстаті помітну спрямованість звуку на частотах понад 1000 Гц (за довжини хвилі, меншої від 0,34 м).

Аналізуючи звукові поля за оптимального розміщення і спрямованості ДШ, можна перекопатися, що у всіх випадках джерела були віддалені від людей на максимальну відстань і спрямовані у вільний від них простір. Реальне зниження рівнів звукового тиску склало до 2 дБ порівняно з довільним (неоптимальним) розміщенням ДШ. За близького розташування робочих місць від ДШ ця величина досягає (3—4) дБ. Для віддалених робочих місць вона становить до 1 дБ. Однак і в цих випадках позитивний ефект очевидний унаслідок кумулятивної дії підвищеного рівня шуму на організм людини.

Для практичної реалізації запропонованого методу знадобиться попереднє зняття характеристик спрямованості джерел. Упровадження запропонованого методу дозволить додатково знизувати вплив шуму й ЕМП на людей у процесі трудової діяльності й тим самим сприяти поліпшенню стану їх здоров'я і підвищенню продуктивності праці.

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ ЕМП НВЧ-ДІАПАЗОНУ

Розміщення зазначених джерел виконується аналогічно розміщенню джерел шуму. Через малу довжину хвилі всі робочі місця містяться в дальніх зонах кожного із джерел. Усі джерела також містяться в дальніх зонах відносно один до одного. Передбачаються сталість випромінюваної потужності й відсутність когерентності електромагнітних хвиль. Не враховується загасання ЕМП

у повітрі, а також його відбивання від поверхонь приміщення, технологічного обладнання, меблів та людей.

Для розв'язання цієї задачі також може бути використаний алгоритм (рис. 1) за винятком блока 4. Цільова функція розраховується за формулою:

$$F_{\text{ЕМП}} = EH_{\text{ср}}_{\text{ЕМП}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n (I_j \cdot t_j) \rightarrow \min, \quad (11)$$

де $EH_{\text{ср}}_{\text{ЕМП}}$ — середнє енергетичне навантаження на людину протягом однієї робочої зміни, Вт·год/м²; I_j — значення інтенсивності ЕМП на j — му робочому місці, створюване одночасною роботою всіх джерел.

$$I_j = \frac{1}{4\pi} \sum_{p=1}^m \frac{W_p \cdot \text{КСД}_p(X_j, Y_j, Z_j; X_p, Y_p, Z_p; \beta_p)}{(X_j - X_p)^2 + (Y_j - Y_p)^2 + (Z_j - Z_p)^2}, \quad (12)$$

де W_p — потужність ЕМП, яке випромінюється джерелом у навколишнє середовище, Вт; КСД_p — коефіцієнт спрямованої дії джерела.

Результати розміщення джерел ЕМП НВЧ-діапазону якісно збігаються з результатами розміщення джерел шуму, і тому в цій статті не наводяться.


ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

У результаті аналізу наявних принципів, методів і засобів захисту людей від підвищених рівнів шуму й ЕМП за виробничих умов стала очевидною необхідність подальших досліджень у цьому напрямку. Для цього авторами цієї статті виконано постановку оптимізаційної задачі розрахунку оптимальних координат джерел шуму (або ЕМП) у виробничому приміщенні та запропоновано метод її розв'язання. Для практичної реалізації запропонованого методу та доведення можливості досягти поставленої мети розроблено алгоритм і комп'ютерну програму розрахунку оптимальних координат. За їх допомогою розраховано оптимальні координати джерел і звукові поля, що відповідають різним варіантам розміщення робочих місць у приміщенні.

Наукова новизна полягає у постановці оптимізаційної задачі, що включає цільову функцію та обмеження, а також у запропонованому методі розв'язання, заснованому на методі випадкового пошуку (методі Монте-Карло).

Практична значимість цієї роботи полягає у підтвердженні мінімізації шкідливого впливу підвищених рівнів шуму й ЕМП на людей за допомогою запропонованого методу. Матеріали роботи можуть бути використані з метою охорони праці за організації нових і раціоналізації наявних виробничих процесів, за яких діють зазначені шкідливі виробничі фактори.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ/REFERENCES

- ГОСТ 12.0.003-74 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (Occupational safety standards system. Dangerous and harmful production effects. Classification).
- Жидецкий В.Ц. Основы охорони праці: Підручник (Gidetsky D.C. Fundamentals of labor protection: Tutorial) — Львів «Афіша», 2002. — 350 с/р.
- Ткачук К.Н. Основы охорони праці: Підручник. 2-ге видання (Tkachuck K.N. Fundamentals of labor protection: Tutorial. 2nd edition) — К.: Основа, — 2006. — 448 с/р.
- ОНТП 14-93 Нормы технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки. Механообработывающие и сборочные цеха (Norms of technological designing of the enterprises of machine-building, instrument-making and Metalworking. Machining and Assembly shops).
- НПАОП 0.00-1.28-10 Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ (The rules of labor protection during operation of electronic computers).
- Технология машиностроения: Т.1 Основы технологии машиностроения: Учебник. для вузов /Под ред. А.М. Дальского (Mechanical engineering: volume 1. Basics of mechanical engineering: the Textbook. for high schools / Ed. A. M. Dalsky) — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, — 1999 — 564 с/р.
- Балабанов А.Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя (Balabanov A.N. Quick reference technologist-mechanical engineer) М.: Изд-во стандартов, — 1992 — 220 с/р.
- Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Под ред. А.М. Дальского (Reference technologist-mechanical engineer. In two volumes. Ed. A.M. Dalsky) — М.: Машиностроение, — 2001 — 912 с/р.
- Дендобренко В.Н., Малика А.С. Автоматизация конструирования РЭА: Учебник для вузов (Dendobrenko, V.N., Malika, A.S. Automated design of electronic equipment: Textbook for universities) — М., Высшая школа, — 1980. — 384 с/р.
- ГОСТ 17187-2010. Шумомеры. Часть 1. Технические требования (Sound level meters. Part 1. Technical requirements).
- Радиовещание и акустика под ред. проф. М.В. Гитлица (Broadcasting and acoustics Ed. prof. M.V. Gitlits) — М. «Радио и связь», — 1989. — 430 с/р.
- Иофе, В.К. Справочник по акустике (Joffe, V.K. Handbook of acoustics) — М.: Связь, — 1979. — 312 с/р.
- Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Под. ред. Ю.А. Шрейдера (The method of statistical testing (Monte-Carlo) Ed. Y.A. Schrader) — М.: «Физматгиз», — 1962. — 332 с/р.
- Д. Гурский, Е. Турбина. Вычисления в Mathcad 12 (D. Gursky, E. Turbina. Calculations in Mathcad 12) — К. «Питер», — 2006 — 544 с/р. 

Отримано / received: 30.04.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. О.А. Ляшенко (Україна).
D. Sc. (Techn.) O.A. Liashenko, Ukraine, recommended this article to be published.

VII МІЖНАРОДНИЙ КОНКУРС СООМЕТ «КРАЩИЙ МОЛОДИЙ МЕТРОЛОГ 2017»

VII Міжнародний конкурс *СООМЕТ* «Кращий молодий метролог» відбувся 17–18 травня 2017 року в Астані (Казахстан).

Вдруге його проведено за участю молодих метрологів з інших РМО (*EUROMET* та *SIM*) та лише англійською мовою.

Було представлено 36 робіт молодих метрологів із 10 країн: Білорусі, Іспанії, Казахстану, Колумбії, Молдови, Німеччини, Перу, Росії, Словаччини та України.

Зокрема, від нашої країни у конкурсі взяли участь начальник науково-дослідної лабораторії, к.т.н. С. Карпенко з доповіддю «Особливості оцінювання ефекту дрейфу під час ключових звірень *СООМЕТ.ЕМ-К5*», старший науковий співробітник, к.т.н. С. Курсін з доповіддю «Автоматизація вимірювання та оптимізація системи відтворення та передавання одиниць імітансу», молодший науковий співробітник Ю. Куліш з до-

повіддю «Удосконалення метрологічних характеристик Державного первинного еталона одиниці кута зсуву фаз між двома напругами за допомогою автоматизації вимірювань» (ДП «Укрметртестстандарт»); інженер I категорії Ю. Сковородкіна з доповіддю «Застосування координатної техніки під час вимірювання параметрів зубчатих коліс», молодший науковий співробітник В. Терещенко з доповіддю «Розвиток світлодіодного методу відтворення одиниці сили світла» (ННЦ «Інститут метрології»).

Журі конкурсу відзначило високий рівень робіт молодих метрологів і якість подання заслуханих доповідей. Роботи всіх учасників без винятку були достатньо цікавими і мали новітні наукові підходи.

(За матеріалами ННЦ «Інститут метрології» та ДП «Укрметртестстандарт»)