

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



та прилади

№ 6(56), 2015

Науково-виробничий журнал

Засновники:

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

Видається з березня 2006 року
Рік випуску десятий
Передплатний індекс 92386

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Гінзбург М. Д., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Домницький Р. А.
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Косач Н. І., д. т. н., с. н. с.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Неежмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., д. т. н., проф.
Радев Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
Столярчук П. Г., д. т. н., проф.
Сурду М. М., д. т. н., проф.
Туз Ю. М., д. т. н., проф.
Хакімов О., д. т. н., проф., Узбекистан
Чалий В. П., к. т. н., с. н. с.
Черепков С. Г., 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 №8 від 26.11.2015)

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Митрофановська, 40;
Тел.: (057) 700-46-81, (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
mp@metrology.kharkov.ua
<http://www.metpriladi.com/>
<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,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 06.01.2016.
Формат 60х84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 500 прим.
Замовлення № 31.

© «Метрологія та прилади», 2015

Журнал **зареєстровано**
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

Кабінет Міністрів ухвалив фінальний пакет документів, необхідних для завершення першого етапу реформи системи технічного регулювання. Головним завданням першого етапу було законодавче забезпечення переходу на європейські стандарти й процедури. Завдання нового етапу реформи — зняти зайві бар'єри для доступу українських промислових товарів на ринки ЄС.

До фінального пакету документів увійшли технічні регламенти на засоби вимірювальної техніки, модулі оцінки відповідності, а також план заходів щодо оптимізації мережі державних лабораторій. Однак загальний об'єм документації, затвердженої на першому етапі реформи, був набагато більшим. Так, було прийнято 24 постанови і видано 7 наказів Мінекономрозвитку. Із 27 актів європейського секторального законодавства, визначених Угодою про асоціацію, в Україні прийнято 24 технічних регламенти, з яких 21 вже є обов'язковим до застосування. Загалом в Україні прийнято 47 технічних регламентів, 45 з яких розроблено на основі актів законодавства ЄС, 41 технічний регламент вже є обов'язковим до застосування.

Ухвалення всіх цих документів було необхідною умовою для реалізації ключових законів реформи системи технічного регулювання. Йдеться про закони: «Про метрологію та метрологічну діяльність», «Про технічні регламенти та оцінку відповідності», «Про стандартизацію», ухвалені протягом 2014-2015 років.

Величезна підготовча робота, проведена у 2014-15 роках, стала основою для наступного етапу реформи. Головне завдання нового етапу — підписання Угод про оцінку відповідності та прийнятність промислових товарів (Agreements on Conformity Assessment and Acceptance of Industrial Goods, ACAAG). Підписання Угод ACAAG означає, що торгівля товарами між ЄС та Україною проводитиметься на тих самих умовах, які застосовуються у торгівлі між країнами-членами ЄС. Окрім того, триватиме затвердження технічних регламентів і налаштування ринкового нагляду, який є одним із ключових елементів нової системи технічного регулювання.

«ЄС має економічне і стратегічне значення для українських виробників. Новими можливостями, які відкриває для них Угода про асоціацію, треба правильно скористатися. А для цього ми реформуємо нашу застарілу систему стандартизації та приводимо її у відповідність до європейської. Це зніме всі штучні бар'єри щодо торгівлі з ЄС», — підкреслив Міністр економічного розвитку і торгівлі України Айварас Абромавичус.

Зі свого боку заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України Максим Нефьодов зазначив, що сьогодні завершується величезний етап реформування системи технічного регулювання. Протягом цього етапу Мінекономрозвитку створило засади для переходу від неефективної і застарілої радянської системи контролю безпечності промислової продукції до сучасної європейської системи. «Європейська система ідеологічно відрізняється від пострадянської. Стара система базувалася на обов'язкових стандартах, ГОСТах, які регулювали абсолютно всі характеристики товару чи послуги. Відповідно, дотримання цих ГОСТів контролювалося шляхом аналізу окремих одиниць товару, які надавали самі виробники. Звісно, такий підхід не давав гарантію, що решта одиниць товару з цієї партії також відповідають ГОСТу», — розповів Максим Нефьодов.

Європейська система, навпаки, надає більше свободи виробнику — він мусить дотримуватися лише загальних вимог щодо безпеки (саме вони й закріплені в технічних регламентах), а характеристики товару виробник може обирати на власний розсуд. При цьому контроль за безпекою товарів в європейській системі здійснюється через ринковий нагляд. «Це схоже на метод «таємного покупця» — проводиться контрольна закупка товару в торговельній мережі, і якщо товар не відповідає вимогам безпеки — з продажу вилучається вся партія. Такий спосіб контролю більш ефективний, що підтверджено багаторічним успішним досвідом США і країн ЄС», — додав заступник міністра.

Окрім затвердження низки технічних регламентів, перший етап реформи системи технічного регулювання містить скасування обов'язкового використання ГОСТів. У 2015 році скасовано дію понад 15 773 ГОСТів, розроблених до 1992 року. Цей крок звільняє підприємництво ініціативу і сприяє розвитку конкуренції, а отже створенню нових, інноваційних товарів та послуг.

Окрім того, Національне агентство з акредитації України отримало визнання з боку Європейської кооперації з акредитації за всіма напрямками акредитації (випробувальні та калібрувальні лабораторії, органи зі сертифікації, а також органи з інспектування). Це дозволить розбудувати в Україні ефективну систему сертифікації та ринкового нагляду.

Наступним кроком реформи стане реалізація Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року, у тому числі підписання Угоди ACAAG щодо продукції стосовно кожного технічного регламенту. З підписанням Угоди ACAAG українські виробники зможуть вільно постачати свою продукцію без проходження додаткової сертифікації в країнах ЄС. Це знімає бар'єри для українських експортерів і дозволить вільний обіг промислових товарів на території країн ЄС.

За матеріалами Мінекономрозвитку України

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ

Володарский Е., Кошечая Л., Варша З.

Метод уменьшения неопределенности
принятия решения при измерительном контроле.
Часть 2. Коррекция уставок выходной величины

3

MEASURING CONTROL

Volodarsky E., Kosheva L., Warsza Z.

The Method of Reducing Uncertainty
of Decision-Making in the Measuring Control.
Part 2. Correction of Setpoints the Output Quantity.

ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОВІРКА

Тимофеев Е.

Забезпечення дозиметричного контролю
лазерного випромінювання

8

MEASUREMENT AND VERIFICATION

Tymofeev Y.

Providing of Laser Radiation
Dosimetric Monitoring

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРІСТЬ

Квасніков В., Ганева Т.

Шляхи підвищення точності вимірювання
деформації та механічних напружень

15

ACCURACY AND RELIABILITY

Kvasnikov V., Ganyeva T.

Ways to Improve Measurement Accuracy
Strain and Mechanical Stress

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Левикін В., Чала О.

Оцінювання часових характеристик подій
дискретних процесів у відповідності
до концепції GUM

19

METHODS AND PROCEDURES

Levykin V., Chala O.

Evaluation of the Temporal Characteristics
of Discrete Processes
Using the GUM Concept

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК

Зенкін А., Лісовець С., Здоренко В.

Акустичний контроль конструкційних
матеріалів з використанням
амплітудно-залежного внутрішнього тертя

24

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS CONTROL

Zenkin A., Lisovets S., Zdorenko V.

Acoustic Control of Construction
Materials Using Amplitude-Dependent
Internal Friction

НОРМАТИВНА БАЗА

Косач Н., Большаков В.

Упровадження в Україні стандартів ISO 7066-1
та ISO 7066-2 з оцінювання невизначеності
під час калібрування та застосування
приладів вимірювання витрати (частина 1)

28

NORMATIVE BASE

Kosach N., Bolshakov V.

Implementation in Ukraine Standards ISO 7066-1
and ISO 7066-2 Evaluation
of Uncertainty in Calibration
and Devices Flowmeter (Part 1)

ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ

Назаренко Л., Можаровська Т.

Системи дорожнього освітлення
з урахуванням приєднаної фотометрії

34

APPLICATION AND EXPLOITATION

Nazarenko L., Mozharovska T.

The Road Lighting Systems Taking
Into Account Mesopic Photometry

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНЕРГОНОСІВ

Петришин І., Присяжнюк Т., Бас О.

Дослідження енергетичної цінності
природного газу у споживачів
комунально-побутового сектору

42

ENERGY EFFICIENCY

Petryshyn I., Prisyazhnyuk T., Bas O.

Research the Natural
Gas Energy Value to Domestic
Household Sector Consumers

НЕЛІНІЙНА МЕТРОЛОГІЯ

Мачехін Ю., Курський Ю.

Оцінка параметрів охолоджених часток
інструментами нелінійної метрології

50

NONLINEAR METROLOGY

Machekhin Yu., Kurskoy Yu.

The Evaluation of Cooled Particles' Parameters
by Instruments of Nonlinear Metrology

КВАЛІМЕТРІЯ

Мотало А., Мотало В., Стадник Б.

Аналіз і синтез кваліметричних шкал

54

QUALIMETRY

Motalo A., Motalo V., Stadnyk B.

Analysis and Synthesis of the Qualimetrical Scales

ХІМІЧНА МЕТРОЛОГІЯ

Калинюк М., Адеєва Л., Козін Р.

Особливості визначення вмісту водню
в мідних сплавах

63

CHEMICAL METROLOGY

Kalyniuk M., Adeeva L., Kozin R.

Peculiarity of the Determination Hydrogen Content
in Copper Alloys

ВІТАЄМО ЮВІЛЯРІВ

Тищенко Б.

До 50-річчя метрологічної служби
ННЦ «ХФТІ»

70

WELCOME

Тищенко Б.

To the 50th of Metrological Service of National
Scientific Centre «Khakiv Physics-Technical Institute»

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ

План набору слухачів на 2016 рік

72

TRAINING EXPERTS

State Enterprise for Year 2016

УДК 658.562

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОНТРОЛЕ. ЧАСТЬ 2. КОРРЕКЦИЯ УСТАВОК ВЫХОДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Е. Володарский, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации экспериментальных исследований, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев,

Л. Кошечая, доктор технических наук, профессор кафедры биокibernетики и аэрокосмической медицины, Национальный авиационный университет, г. Киев,

З. Варша, кандидат технических наук, доцент, Институт промышленных исследований автоматизации и измерений, г. Варшава, Польша

Показана необходимость введения коррекции уставок выходной величины. Скорректированные уставки учитывают отличие реальной характеристики преобразования от номинальной. Рассмотрено влияние погрешности формирования вспомогательной величины (ВВ). При этом выбор вида коррекции зависит от соотношения между составляющими погрешностей измерительного канала и формирования ВВ. Рассмотрен числовой пример применения предложенного метода уменьшения неопределенности принятия решения, сопутствующей измерительному контролю.

Shown the need to introduce of setpoints correction of the output quantity. Corrected settings allow take into consideration the difference the real characteristics of the measuring channel of the nominal. Considered the impact of the error forming of auxiliary quantity. Wherein choose the type of correction depends on the relationship between the components of the measuring channel error and error of forming an auxiliary quantity. Considered a numerical example of the application of the proposed method to reduce uncertainty decision making related of measuring inspection.

Ключевые слова: аддитивная коррекция, мультипликативная коррекция, уставка, вспомогательная величина, неопределенность, принятие решения.

Keywords: additive correction, multiplicative correction, setpoint, auxiliary quantity, uncertainty, decision-making.

ВВЕДЕНИЕ

Достоверность контроля является мерой доверия к принимаемому решению и характеризует неопределенность его решений [1–4]. При измерительном контроле процедуре сравнения с нормами предшествует измерение/преобразование величины, несущей информацию о характерных свойствах объекта. Реальная характеристика $\varphi(x) = a + bx$ измерительного канала (ИК) отличается от номинальной $\varphi_0(x)$. Неидеальность реальной характеристики

$$\varphi(x) = b((a/b) + x)$$

представляется систематической погрешностью, которая включает составляющие: абсолютную аддитивную $\Delta = a/b$ и относительную мультипликативную $\gamma = (b - 1)$. Влияние этих составляющих при различных сочетаниях, как по абсолютной величине, так и для различных знаков, проанализировано в первой части данной статьи [5]. Традиционным путем повышения достоверности контроля является применение более точных средств измерения, входящих в ИК. Однако это, как правило, приводит к снижению быстродействия и повышению стоимости контроля.

Ввиду того, что при контроле не решается задача определения точного значения информативного параметра выходной величины объекта, а устанавливается нахождение ее значения в некотором допустимом интервале $x_l \leq x \leq x_h$, нет



Е. Володарский



Л. Кошечая



З. Варша

необходимости уточнять (корректировать) каждый результат. В данном случае возможно путем составления дополнительных уравнений, полученных структурным или алгоритмическим путем, приводить в соответствие соотношение между результатом преобразования $\varphi(x)$ и уставками $\varphi_0(x_l)$ и $\varphi_0(x_h)$ к виду, который имел место до проведения измерительного преобразования. Принимая во внимание, что скорректированные уставки учитывают отличие реальной характеристики от номинальной, при определенных условиях, влияние отклонения от номинальной характеристики преобразования ИК на достоверность контроля можно уменьшить [6].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для реализации данного метода необходимо располагать вспомогательной величиной x_0 , однородной с контролируемой. Перед собственно процедурой контроля необходимо подавать x_0 на вход ИК, результат преобразования которой $\varphi(x_0)$ несет информацию о реальной характеристике ИК (рис. 1).

Аддитивная коррекция уставок

Поскольку результат идеального преобразования $\varphi_0(x_0)$ известен, то, зная значения $\varphi(x_0)$ и $\varphi_0(x_0)$, можно определить величину d , пропорциональную погрешности ИК $d = \varphi(x_0) - \varphi_0(x_0)$. Эта величина используется для адекватного смещения исходных уставок, то есть

$$\varphi_a(x_l) = \varphi_0(x_l) + d; \quad \varphi_a(x_h) = \varphi_0(x_h) + d.$$

Таким образом, имеет место аддитивная коррекция уставок.

Не нарушая общности рассуждений, будем исходить из того, что реальная и номинальная характеристики имеют вид соответственно:

$$\varphi(x) = (x + \Delta)(1 + \gamma); \quad \varphi_0(x_0) = x. \quad (1)$$

После коррекции уставок на величину $d = x_0\gamma + \Delta(1 + \gamma)$ «пересчитанное» ко входу ИК правило, на основании которого принимается решение

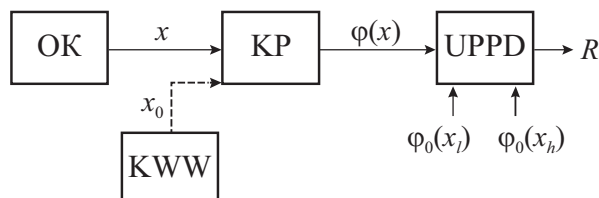


Рис. 1. Сравнение результата преобразования с уставками:

ОК — объект контроля; ФВВ (КВВ) — формирователь вспомогательной величины; ИК (КР) — измерительный канал; УОПР (UPPD) — устройство обработки и принятия решения
Fig. 1. The comparison for result of transformation with setpoints

годен, примет вид:

$$x_l + \alpha(x_0 - x_l) < x < x_h + \alpha(x_0 - x_h), \quad (2)$$

где $\alpha = \gamma/(1 + \gamma)$.

Таким образом, аддитивная погрешность ИК на результат контроля не влияет.

Приняв во внимание, что исходное решающее правило об исправности объекта имеет вид $x_l \leq x \leq x_h$, вторые слагаемые в левой и правой частях неравенства (2) учитывают остаточное влияние погрешности ИК после коррекции. Значение этих слагаемых и знак перед ними зависят от соотношения между величинами x_0, x_l, x_h .

Возможны три случая выбора x_0 : внутри допустимого интервала и за его границами, то есть

$$x_0 < x_l; \quad x_0 < x_h; \quad x_l < x_0 < x_h.$$

Приведенный анализ показал, что влияние погрешности ИК на достоверность контроля будет минимальным при выборе x_0 внутри допустимого интервала. При этом решающее правило после коррекции уставок примет вид:

$$x_l + \alpha(x_0 - x_l) < x < x_h - \alpha(x_h - x_0) \quad (3)$$

$$\text{или} \quad x_l + \theta_l \leq x \leq x_h - \theta_h, \quad (4)$$

где $\theta_l = \alpha(x_0 - x_l)$, $\theta_h = \alpha(x_h - x_0)$.

Эквивалентные интервалы $[x_l, (x_l + \theta_l)]$ и $[(x_h - \theta_h), x_h]$ отображают влияние погрешности ИК на достоверность контроля — площадь под кривой распределения возможных значений контролируемой величины пропорциональна вероятности ошибочных решений. Поскольку длина этих интервалов — величина положительная, знак перед ними несет информацию о характере ошибочных решений

Исходя из выражения (4), можно прийти к заключению, что в этом случае будет возникать *только ложный отказ* (рис. 2).

Вероятность его определяется из выражения

$$P_{err} = P_f = f(x_l)(\theta_l + \theta_h) + \frac{1}{2} f'(x_l)(\theta_l^2 + \theta_h^2), \quad (5)$$

где $f(x_l)$ — плотность распределения возможных значений контролируемой величины для значения x_l . Для равномерного закона второе слагаемое в правой части выражения (5) будет отсутствовать.

Если же мультипликативная составляющая погрешности ИК будет отрицательной, знаки в левой и правых частях неравенства (3) поменяются на противоположные, и будет иметь место *только необнаруженный отказ* (рис. 3).

Как следует из рисунков, вероятность его будет меньше, чем вероятность ложного отказа.

Предположим, что характеристика ИК имеет вид $\varphi(x) = (1 + \gamma)x$ и закон распределения возможных значений контролируемой величины — равномерный.

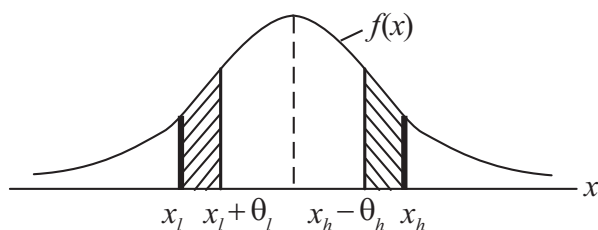


Рис. 2. Аддитивная коррекция уставок: ложный отказ при положительной мультипликативной погрешности
Fig. 2. The additive correction of setpoints: false failure by positive multiplicative error

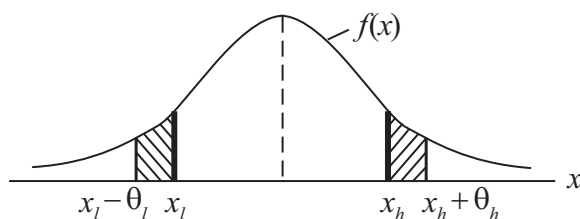


Рис. 3. Аддитивная коррекция уставок: необнаруженный отказ при отрицательной мультипликативной погрешности.
Fig. 3. The additive correction of setpoints: undetected failure by negative multiplicative error

Вероятность ошибочных решений без коррекции

$$P_{err} = f(x_l) \alpha(x_h + x_l), \quad (6a)$$

а с коррекцией уставок

$$P_{err} = f(x_l) \alpha(x_h - x_l). \quad (6b)$$

Эффективность аддитивной коррекции уставок (отношение соответствующих вероятностей) зависит только от отношения эквивалентных интервалов:

$$\eta = (x_h + x_l) / (x_h - x_l). \quad (7)$$

Например, при отношении $x_h / x_l = 1.5$ эффективность аддитивной коррекции будет $\eta = 5$, а при $x_h / x_l = 1.2$ становится $\eta = 11$.

В случае распределения возможных значений контролируемой величины по нормальному закону оптимальным при положительной мультипликативной составляющей погрешности ИК является выбор значения вспомогательной величины, равным $(x_h + x_l)/2$. В случае отрицательной мультипликативной составляющей погрешности ИК минимизация «остаточного» влияния погрешности при двух значениях вспомогательной величины: $x_0 = x_l$ или $x_0 = x_h$. При определении остаточной вероятности ошибочных решений необходимо учитывать второе слагаемое в правой части выражения (5), которое будет зависеть от соотношения между СКО возможных значений контролируемой величины σ и длины допустимого интервала $(x_h - x_l)$.

Мультипликативная коррекция уставок

Как следует из выражения (3), вероятность ошибочных решений зависит от мультипликативной составляющей погрешности ИК. Если предварительный анализ показал существенность этого влияния, необходимо осуществлять мультипликативную коррекцию уставок. При мультипликативной коррекции определяется коэффициент

$$c = \varphi(x_0) / \varphi_0(x_0),$$

используемый далее для коррекции уставок:

$$\varphi_m(x_l) = \varphi_0(x_l) \cdot c; \quad \varphi_m(x_h) = \varphi_0(x_h) \cdot c.$$

Предположим, что характеристика ИК имеет вид:

$$\varphi(x) = (x + \Delta)(1 + \gamma). \quad \text{Тогда } c = \frac{(x_0 + \Delta)(1 + \gamma)}{x_0}.$$

коррекции решающее правило примет вид:

$$(x_h / x_0)(x_0 + \Delta) < (x + \Delta) < (x_h / x_0)(x_0 + \Delta).$$

Отсюда следует, что мультипликативная погрешность не влияет на результат контроля.

Для минимизации остаточного влияния аддитивной составляющей необходимо также выбирать значение ВВ x_0 внутри допустимого интервала. Однако при мультипликативной коррекции уставок, независимо от закона распределения возможных значений контролируемой величины, желательно выбирать значение x_0 близким к x_h . Достоверность принимаемых решений определяется неравенством (решающим правилом):

$$x_l - (\Delta/x_0)(x_0 - x_h) < x < x_h + (\Delta/x_0)(x_h - x_0). \quad (8)$$

При сравнении выражений (8) и (3) можно сделать вывод, что характер ошибочных решений поменяется на противоположный, по сравнению с аддитивной коррекцией уставок. В этом случае будет возникать только необнаруженный отказ. Вероятность ошибочного решения — необнаруженного отказа определяется на основании выражения:

$$P_{err} = P_f = f(x_l) (\theta_l + \theta_h) + \frac{1}{2} f(x_l) (\theta_l^2 + \theta_h^2). \quad (9)$$

Как уже отмечалось, при мультипликативной коррекции уставок наименьшее значение вероятности ошибочных решений, независимо от закона распределения возможных значений контролируемой величины, будет при $x_0 = x_h$. На рис. 4 заштрихованная площадь соответствует вероятности необнаруженного отказа при положительной аддитивной погрешности.

При отрицательной аддитивной погрешности будет возникать только ложный отказ (рис. 5).

Сравнение площадей, соответствующих вероятности ошибочных решений, говорит о том, что вероятность необнаруженного отказа (положительная аддитивная погрешность ИК) меньше, чем вероятность ложного отказа (отрицательная аддитивная погрешность ИК).

Влияние погрешности формирования вспомогательной величины

Рассмотрим влияние погрешности формирования x_0 на эффективность аддитивной коррекции уставок.

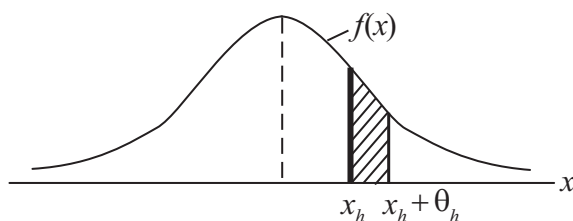


Рис. 4. Мультипликативная коррекция уставок: необнаруженный отказ при выборе $x_0 = x_h$ и положительной аддитивной погрешности
Fig. 4. Multiplicative correction of setpoints: undetected failure by sampling $x_0 = x_h$ and positive additive error

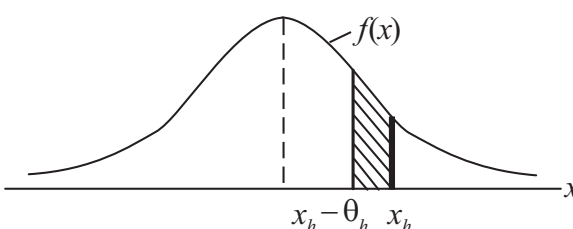


Рис. 5. Мультипликативная коррекция уставок: ложный отказ при выборе $x_0 = x_h$ и положительной аддитивной погрешности
Fig. 5. Multiplicative correction of setpoints: false failure by sampling $x_0 = x_h$ and positive additive error

При реализации метода на вход ИК подается некоторое значение $\tilde{x}_0 = x_0 + \Delta_0$, где Δ_0 погрешность формирования x_0 . При этом предполагаемый результат преобразования этой величины не будет соответствовать значению $\varphi_0(x_0)$.

В соответствии с алгоритмом вычисляется не d , а некоторая величина $\hat{d} = x_0 \gamma + (\Delta + \Delta_0)(1 + \gamma)$. Таким образом, после аддитивной коррекции уставок имеем:

$$x_l + \alpha(x_0 + x_l) - \Delta_0 < x < x_h - \alpha(x_h - x_0) - \Delta_0.$$

Как следует из данного выражения, погрешность формирования вспомогательной величины приводит, с одной стороны, к увеличению одного эквивалентного интервала (правая часть неравенства), а с другой – к уменьшению другого интервала (левая часть неравенства), то есть

$$\tilde{\theta}_l^a + \tilde{\theta}_h^a = \theta_l^a - \Delta_0 + \theta_h^a + \Delta_0 \text{ или } \tilde{\theta}_l^a + \tilde{\theta}_h^a = \theta_l^a + \theta_h^a.$$

Единственным требованием является нахождение значение \tilde{x}_0 в пределах границ исходного допустимого интервала. При выполнении данного условия, для равномерного закона распределения возможных значений контролируемой величины, погрешность формирования ВВ не влияет на достоверность контроля.

Рассмотрим влияние погрешности формирования ВВ на эффективность мультипликативной коррекции уставок. В результате формирования ВВ с погрешностью реальное значение корректирующего

множителя составит:

$$\tilde{c} = (x_0 + \Delta + \Delta_0)(1 + \gamma)/x_0.$$

При выборе $x_0 = x_h$ решающее правило с учетом погрешности формирования составит:

$$x_l - (\Delta/x_h)(x_h - x_l) + (\Delta_0/x_h)x_l < x < x_h + \Delta_0 : (\Delta_0/x_h) < 1.$$

Следовательно:

$$\tilde{\theta}_l^M + \tilde{\theta}_h^M = \theta_l^M - \Delta_0/x_h + \theta_h^M + \Delta_0. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что наличие погрешности формирования может быть представлено не только относительно малым уменьшением длины нижнего эквивалентного интервала, но и увеличением длины верхнего эквивалентного интервала пропорционально погрешности формирования ВВ. Это может привести к увеличению вероятности ошибочных решений и существенно снизить эффективность мультипликативной коррекции уставок.

Числовой пример

Рассеивание контролируемой величины x , которая характеризует функциональные возможности объекта, представляется равновероятной величиной, значение которой может находиться в диапазоне от 0 до 20 мВ. В соответствии с требованиями необходимо отобрать и в дальнейшем использовать объекты, значения x которых лежат в диапазоне (10...14) мВ, то есть $x_l = 10$ мВ и $x_h = 14$ мВ. Реальная характеристика ИК имеет вид:

$$\varphi(x) = (x + 0.1)(1 + 0.1).$$

В соответствии с [5] для исходной характеристики ИК вероятность ошибочных решений при равномерном распределении возможных значений контролируемой величины с плотностью $f(x) = 1/(20-0) = 0,05$ будет $P_{err} = 0,13$. Таким образом, достоверность контроля составит 0,87 (таблица).

Аддитивная коррекция уставок с использованием ВВ x_0 , находящейся в середине допустимого интервала (10...14) мВ, уменьшает вероятность ошибочных решений до $P_{err} = 0,02$. Достоверность контроля становится равной 0,98 (таблица). Если значение ВВ x_0 выбрано равным 12 мВ, погрешность формирования ВВ может находиться в пределах ± 2 мВ ($\pm 17\%$) и при этом не будет влиять на достоверность контроля.

Если же применить мультипликативную коррекцию уставок, выбрав $x_0 = 14$ мВ, то при аддитивной составляющей погрешности $\Delta = 0.1$ мВ вероятность ошибочных решений составит $P_{err} = 0,002$. Таким образом, вероятность ошибочных решений (возможная неопределенность результата) в данном случае уменьшится на порядок по сравнению с аддитивной коррекцией. Достоверность при этом будет 0,998 (таблица).

Проведенные исследования влияния погрешности формирования ВВ показали, что, если, например,

Достоверность контроля и виды ошибочных решений для различных видов коррекции уставок
Authenticity of control and view mistaken solutions for various views setpoints correction

Коррекция уставок	Достоверность контроля D		Характер ошибочных решений
	Без погрешности формирования x_0	С 3,5 % погрешностью формирования x_0	
Отсутствует	0,87	0,87	для x_l — <i>unfound refuse</i> для x_h — <i>false refuse</i>
Аддитивная	0,98	0,98	для x_l и x_h — <i>false refuse</i>
Мультипликативная	0,998	0,975	для x_l и x_h — <i>unfound refuse</i>

эта погрешность $\Delta_0 = (\pm 0,5) \text{ mV}$, то вероятность ошибочных решений при мультипликативной коррекции уставок становится $P_{err} = 0,025$. Это соответствует достоверности контроля $D = 0,975$, что соизмеримо с достоверностью при аддитивной коррекции уставок. Как следует из данных, приведенных в таблице, применение коррекции уставок позволяет уменьшить влияние неидеальности характеристики преобразования ИК на достоверность контроля.

В рассмотренном примере

$x_i = 10 \text{ mV}$, $\alpha = \gamma / (1 + \gamma) = 0,999$ и $\Delta = 0,1 \text{ mV}$, то есть $\alpha x_i > \Delta$.

В этом случае, приняв во внимание выражения (3) и (8), целесообразно применять мультипликативную коррекцию уставок (таблица). Однако, с учетом погрешности формирования ВВ x_0 , эффективность мультипликативной коррекции будет уменьшаться (таблица). Так, при $\Delta_0 = (\pm 1,0) \text{ mV}$ достоверность становится $D = 0,95$. Этот факт необходимо принимать во внимание при выборе типа коррекции уставок. Также необходимо учитывать и вид

ошибочных решений после коррекции (ложный или необнаруженный отказ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адекватное смещение уставок уменьшает влияние составляющих погрешности измерительного канала на достоверность контроля.

При аддитивной коррекции уставок полностью исключается влияние аддитивной составляющей погрешности. При этом снижаются требования к точности формирования ВВ. Однако при преобладающей мультипликативной составляющей погрешности преобразования эффективность аддитивной коррекции уставок снижается.

Мультипликативная коррекция уставок исключает влияние мультипликативной составляющей погрешности. Но при этом погрешность формирования ВВ приводит к пропорциональному увеличению вероятности ошибочных решений.

Таким образом, при выборе вида коррекции необходимо исходить из соотношения между составляющими погрешности измерительного канала и погрешности формирования вспомогательной величины.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Grous A., «Analysis of Reliability and Quality Control: Fracture Mechanics 1», ISTE Ltd and J. Wiley & Sons Inc., 2013.
2. ISO 10576-1:2003 Statistical methods — Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements — Part 1: General principles.
3. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
4. Theodorou D., Zannikos F., The use of measurement uncertainty and precision data in conformity assessment of automotive fuel products. Measurement, vol. 50, pp. 141—151, 2014, doi: 10.1016/j.measurement. 2013.12.029.
5. Володарский Е.Т. Метод уменьшения неопределенности принятия решения при измерительном контроле. Часть 1. Влияние функции преобразования измерительного канала на неопределенность результатов контроля / Е.Т. Володарский, Л.А. Кошечая, З. Варша // Метрологія і прилади (Volodarsky E.T. The method of reducing uncertainty of decision-making in the measuring control. Part 1. Influence of function transformation of the measuring channel on uncertainty of results of inspection / E.T. Volodarsky E.T., L.A. Kosheva, Z. Warsza // Metrology and instruments) — 2015. — № 5 — С/Р 3—8.
6. Volodarsky E.T., Warsza Z.L., Kosheva L.A., Idzkowski A., Upgrading reliability of the measurement testing. XI Scientific-Technical Conference: Problems and Progress in Metrology. PPM'15, Koscie-lisko, 07-10 June 2015, Proceedings of Metrology Commission of Katowice Branch of Polish Academy of Science 2015, No 20, pp. 79—85. ■

Отримано / received: 26.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.І. Кондрашовим (Україна).
 Prof. S.I. Kondrashov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 621.373.826:535.247.4:612.84

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОЗИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Є. Тимофеев, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
Національний науковий центр «Інститут метрології», м. Харків

Показана необхідність перегляду чинних в Україні документів у сфері дозиметричного контролю лазерного випромінювання, а також наведено результати розроблення й дослідження дозиметра лазерного випромінювання та установок для повірки лазерних дозиметрів.

The article is devoted to development of methods and means of laser radiation monitoring. The goal of this work is to improve the security of laser radiation dosimetric control in Ukraine. To accomplish this goal the following tasks were set and solved: 1) The analysis of the current regulatory framework of laser radiation monitoring ensuring in Ukraine was conducted. The necessity of revising of the existing

regulations in this field in Ukraine was shown based on the analysis. 2) The analysis of used in Ukraine means of measuring instrument in this field was conducted. The need to create in Ukraine our own laser radiation dosimeter was proved. 3) Laser radiation dosimeter, suitable for mass production in Ukraine, was developed and researched (Fig. 2); 4) The system for verification of laser radiation dosimeters developed in accordance with applicable regulatory documents of Ukraine was designed (Fig. 4 and 5). The article shows that the existing СанПиН 5804-91 (Sanitary rules and norms) need to be revised to bring them into conformity with ДСТУ (the state standard of Ukraine) EN 60825-1: 2014. Laser radiation dosimetry should be guided only by the data given in ДСТУ (the state standard of Ukraine) EN 60825-1: 2014.

Ключові слова: лазерне випромінювання, стандарти, дозиметрія.
Keywords: laser radiation, standards, dosimeters.

В Україні, як і в усіх розвинених країнах світу, все більш широкого застосування отримують різноманітні лазерні установки. При цьому необхідно відзначити, що збільшується не лише кількість лазерних установок, але й різко зростають рівні їх енергетичних характеристик. Особливо різко ця тенденція помітна у сфері використання імпульсних лазерних установок. Імпульсна потужність використовуваних лазерних установок на сьогодні істотно перевищила мегаватний поріг. Окрім того, значне місце у загальній кількості використовуваних лазерних установок мають медичні лазерні установки, які належать до установок відкритого типу. Використання установок відкритого типу особливо небезпечне для навколишнього персоналу, що виконує щоденні роботи із використанням такої апаратури. Усе це призводить до зростання актуальності проведення постійного дозиметричного контролю в зонах дії лазерного випромінювання [1—4].

Донедавна у сфері забезпечення в процесі роботи з лазерними установками потребувалося керуватися ГОСТом 12.1.031-81 (перевидання за серпень 1990 року зі Зміною № 1, затвердженою у квітні 1988 року (ИУС 7-88)). Стандарт потребувалося застосовувати разом із ГОСТом 12.1.040-83. Зазначені документи ввійшли до переліку чинних в Україні ГОСТів, розроблених до 1992 року. З 01.01.2016 тисячі ГОСТів, які існували до 1992 року, скасовуватимуться (з перехідним періодом у два роки).

Також відмінено стандарт, чинний в Україні з 2006 року, ДСТУ ІЕС 60825-1:2004 Безпечність лазерних виробів. Частина 1. «Класифікація обладнання, вимоги та настанова користувачеві». Його замінено відповідним європейським нормативним документом, уведеним як національний стандарт ДСТУ EN 60825-1:2014. Останній ідентичний європейському стандарту EN 60825-1:2007.



Є. Тимофеев

© Тимофеев Є., 2015

Хоча наразі усі ГОСТи, які діяли до 1992 року, практично скасовані, однак методи дозиметричного контролю, встановлені в Методичних вказівках для органів і установ санітарно-епідеміологічних служб із проведення дозиметричного контролю й гігієнічного оцінювання лазерного випромінювання (МУ № 5309—90) [5], продовжують діяти, і дозиметричні вимірювання виконуються цими установами відповідно до СанПиН 5804-91[6].

Однак ці СанПиН 5804-91 і МУ № 5309—90 розроблено ще за часів Радянського Союзу й, як показано нижче, так само застаріли.

Окрім того, класифікація лазерів за ступенем небезпеки відповідно до ДСТУ EN 60825-1:2014 не збігається із класифікацією всіх зазначених вище документів, включаючи СанПиН 5804-91.

Істотною перепорою до здійснення якісного дозиметричного контролю є те, що сьогодні прилади для дозиметричного контролю в Україні не випускаються, а кількість застарілих лазерних дозиметрів ИЛД-2М з часом закономірно зменшується.

Усе наведене вище показує наявність певних труднощів під час проведення дозиметричного контролю лазерного випромінювання в Україні.

Мета цієї роботи — поліпшення забезпечення дозиметричного контролю лазерного випромінювання в Україні.

Для здійснення такої мети поставлено й вирішено певні завдання:

- проведено аналіз наявної в Україні нормативної бази із забезпечення дозиметричного контролю лазерного випромінювання, на основі якого показана необхідність перегляду чинних в Україні документів у цій сфері;
- проведено аналіз використовуваного в Україні приладового парку ЗВТ у сфері проведення дозиметричного контролю лазерного випромінювання й доведена необхідність створення в Україні власного дозиметра лазерного випромінювання;
- розроблено і досліджено дозиметр лазерного випромінювання, придатний до серійного виробництва в Україні;
- розроблено установку для повірки дозиметрів лазерного випромінювання відповідно до чинних в Україні нормативних документів у сфері дозиметрії лазерного випромінювання.

НОРМИ ЗА ДОЗИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Чинні в Україні Правила СанПиН 5804-91 устанавлюють:

- гранично припустимі рівні (ГПР) лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль (180...10⁵) нм за різних умов впливу на людину;

- класифікацію лазерів за ступенем небезпеки генерованого ними випромінювання

У СанПиН 5804-91 наведені ГПР лазерного випромінювання за однократного й хронічного його впливу. Однократним впливом лазерного випромінювання вважається випадковий вплив випромінювання із тривалістю, що не перевищує $3 \cdot 10^{-4}$ с. Хронічний вплив лазерного випромінювання — це систематично повторюваний вплив, якого зазнають люди, професійно пов'язані з лазерним випромінюванням. Для визначення гранично припустимих значень за хронічного впливу на очі й шкіру колімованого або неухважного лазерного випромінювання в діапазоні I і II ($(180 < \lambda < 1400)$ нм) необхідно зменшити в 10 разів відповідні граничні значення, а в діапазоні III ($(1400 < \lambda < 10^5)$ нм) — у 5 разів.

Розглянемо класифікацію лазерів за ступенем небезпеки генерованого випромінювання відповідно до СанПиН 5804-91. Визначення класу лазера засноване на врахуванні його вихідної потужності (енергії) і ГПР за однократного впливу генерованого випромінювання. За ступенем небезпеки генерованого випромінювання лазери підрозділяють на чотири класи.

До лазерів I класу належать повністю безпечні лазери, тобто такі лазери, вихідне колімоване випромінювання яких не становить небезпеки за опромінення очей і шкіри. Так, для лазера в діапазоні довжин хвиль (600...750) нм за однократного опромінення ГПР енергії лазерного випромінювання:

$$W \leq 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2} \text{ Дж.}$$

Потужність ($P_{\text{ГПР}}$) не повинна перевищувати 0,19 мВт за апертури, не більшої за 7 мм.

Лазери II класу — це лазери, вихідне випромінювання яких становить небезпеку за опромінення шкіри або ока людини колімованим пучком; дифузно відбите випромінювання безпечне як для шкіри, так і для очей. Так, для лазера в діапазоні довжин хвиль (600...750) нм за однократного опромінення

$$P \leq 8 \cdot 10^{-2} P_{\text{ГПР}}$$

потужність не повинна перевищувати 152 мВт за однократного й 15,2 мВт за хронічного впливу.

До лазерів III класу належать такі лазери, вихідне випромінювання яких становить небезпеку за опромінення очей не лише колімованим, але й дифузно відбитим випромінюванням на відстані 10 см від поверхні, що відбиває, або за опромінення шкіри колімованим випромінюванням. Дифузно відбите випромінювання не становить небезпеки для шкіри. Цей клас поширюється лише на лазери, що генерують випромінювання у спектральному діапазоні (380...1400) нм. Так, для лазера в діапазоні

довжин хвиль (380...750) нм за однократного опромінення шкіри

$$E_{\text{ГПР}} = 5 \cdot 10^3 \cdot t^{0.5} \text{ Вт/м}^2$$

ГПР опромінення становить $1,6 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$.

ГПР потужності при цьому складе $P_{\text{ГПР}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ за апертури 1,1 мм. Для лазера III класу припустимий рівень потужності за однократного опромінення шкіри не повинен перевищувати $P = \pi \cdot 10^4 \cdot P_{\text{ГПР}}$, тобто потужність, не повинна перевищувати 47 Вт за однократного впливу. За хронічного впливу потужність не повинна перевищувати 4,7 Вт.

Четвертий клас — це такі лазери, дифузно відбите випромінювання яких становить небезпеку для очей і шкіри на відстані 10 см від поверхні, що відбиває.

Відповідно до ДСТУ EN 60825-1:2014 за ступенем небезпеки генерованого випромінювання лазери підрозділяються на сім класів.

Клас 1: Лазери, які безпечні за передбачуваних умов експлуатації, навіть коли використовують оптичні прилади для прямого спостереження пучка.

Клас 1M: Лазери, які випромінюють промінь у діапазоні довжин хвиль (302,5...4 000) нм, які безпечні за передбачуваних умов експлуатації, але можуть бути небезпечними, якщо користувач використовує оптику на шляху пучка.

Застосування оптики в межах пучка може бути небезпечним у двох випадках:

► для розбіжного пучка, якщо користувач розміщує оптику на відстанях до 100 мм від джерела пучка;

► для колімованих пучків з діаметром, більшим за діаметр, рекомендований для вимірювань опромінення й енергетичної експозиції.

Діаметр обмежувальної апертури за дозиметричного контролю лазерного випромінювання з довжинами хвиль (400...1400) нм дорівнює 7 мм.

Клас 2: Лазери, які випромінюють видимий промінь у діапазоні довжин хвиль (400...700) нм, де захист забезпечується природними реакціями, включаючи рефлекс миготіння. Цю реакцію можна попередньо передбачити відповідним захистом під час прийнятних очікуваних умов роботи, використовуючи оптичні прилади для прямого спостереження пучка.

Клас 2M: Лазери, які випромінюють видиме випромінювання в діапазоні довжин хвиль (400...700) нм, де захист забезпечується природними реакціями, включаючи рефлекс миготіння. Однак спостереження вихідного випромінювання може бути небезпечнішим, якщо користувач застосовує оптику в межах пучка.

Клас 3R: Лазери, які випромінюють у діапазоні довжин (302,5...10⁶) нм, де безпосереднє спостереження потенційно небезпечне, але ризик, нижчий від ризику лазерів класу 3B. Припустима межа випромінювання міститься у межах п'ятикратних припустимих меж випромінювання для класу 2 в діапазоні довжин хвиль (400...700) нм і в межах п'ятикратних припустимих меж випромінювання для класу 1 в інших діапазонах довжин хвиль.

Клас 3B: Безпосереднє спостереження таких лазерних виробів завжди небезпечне. Видиме неухвалне випромінювання звичайно безпечне.

Клас 4: Лазерні виробы, що створюють небезпечне неухвалне випромінювання. Вони можуть викликати ураження шкіри, а також створити небезпеку пожежі. За їхнього використання треба дотримуватися особливої обережності.

У зв'язку з відносною складністю наведених у ДСТУ EN 60825-1:2014 розрахунків необхідне розроблення відповідного програмного забезпечення. У випадку колімованих пучків малого діаметра можна використовувати значення, наведені у роботі [4]. Окрім того, зважаючи на те, що ДСТУ EN 60825-1:2014 ідентичний міжнародному стандарту EN 60825-1:2007, для спрощення розрахунків у відповідності з ДСТУ EN 60825-1:2014 можливе використання комп'ютерної програми Lasersafe PC. Це оригінальне й провідне програмне забезпечення для лазерної безпеки уперше виготовлено в 1993 році й широко використовується у всій Європі й за її межами. Lasersafe PC — продукт спільного виробництва Lasermet і GL Services. Наявна безкоштовна демонстраційна версія цієї програми [7]. Laser Safe PC — всеосяжна й різнобічна програма, яка охоплює всі можливі варіанти лазерних і світлодіодних випромінювачів. На рис. 1 подано приклади розрахунків класу небезпеки лазерного випромінювача за перевищенням максимально припустимого

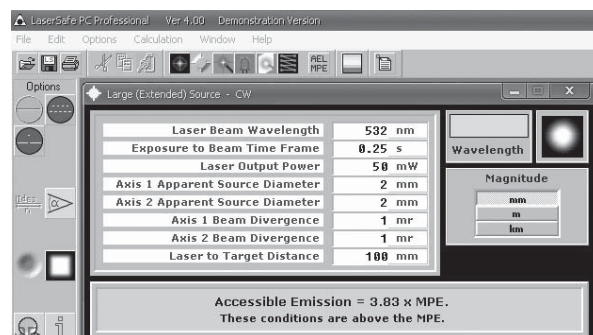


Рис. 1. Розрахунки класу небезпеки лазерного випромінювача потужністю 50 мВт

Fig. 1. Hazard class calculation of laser transmitter with output of 50 mW

рівня енергетичної експозиції (МПЕ) (maximum permissible exposure (MPE)). Часто в літературі, особливо російськомовній, термін МПЕ замінюють еквівалентним терміном «гранично припустимий рівень» (ГПР).

Однак, для розрахунків ГПР відповідно до СанПін 5804-91, як зазначалося вище, необхідне розроблення програмного забезпечення. При цьому потрібно враховувати, що діапазон довжин хвиль, розглянутий у СанПін 5804-91, не збігається з діапазоном довжин хвиль за ДСТУ EN 60825-1:2014. ГПР лазерного випромінювання, наведені в СанПін 5804-91, не збігаються з максимально припустимими рівнями, наведеними в ДСТУ EN 60825-1:2014. Визначення класів небезпеки у СанПін 5804-91, ГОСТ 12.1.031-81 і ГОСТ 12.1.040-83 не збігаються із класифікацією, наведеною в ДСТУ EN 60825-1:2014. Потрібно урахувати, що до того ж в Україні велика кількість застарілих лазерних установок, виготовлених у Росії й класифікованих ще за своїм ГОСТом Р 50723-94 [10]. Класифікація за ГОСТом Р 50723-94 також не збі-

гається із класифікацією, що діє в Україні. У зв'язку з цим ми рекомендуємо за визначення параметрів лазерного дозиметра керуватися під час проведення дозиметричного контролю винятково даними, наведеними в ДСТУ EN 60825-1:2014.

І хоча на сьогодні державний стандарт у сфері лазерної дозиметрії гармонізовано з європейським, в Україні необхідне розроблення й прийняття скоректованих Санітарних правил. За основу можна обрати, наприклад, Санітарні правила й норми 2.2.4.13-2-2006 «Лазерне випромінювання й гігієнічні вимоги при експлуатації лазерних виробів», прийняті на території Республіки Білорусь.

ДОЗИМЕТР ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Як зазначалося вище, перешкодою до здійснення якісного дозиметричного контролю є те, що наразі прилади для дозиметричного контролю в Україні не випускаються.

Аналогічна ситуація спостерігалася в Росії, але нині там випускаються:

Основні технічні характеристики дозиметрів

Basic specifications of dosimeters

Характеристики	ЛД-4	ЛД-07	Ладін	ЛД-10
Робочі довжини хвиль лазерного випромінювання, мкм	0,53; 0,63; 0,69; 0,9; 1,06; 10,6	0,48; 0,53; 0,63; 0,69; 0,78; 0,85; 0,91; 0,98	0,48; 0,53; 0,63; 0,67; 0,78; 0,85; 0,92; 0,98; 1,06; 1,15; 1,30; 1,54; 2,94; 3,39; 5,60; 10,6	0,30; 0,48; 0,53; 0,63; 0,67; 0,78; 0,85; 0,92; 0,98; 1,06;
Спектральний діапазон за додатковим замовленням, мкм	0,2 - 0,45; 0,45 - 1,9; 1,9 - 20,0	1,06; 1,15; 1,3; 1,54; 5,5; 10,6	ФПУ-1 (0,48-1,06); ФПУ-2 (1,15-1,54); ФПУ-3 (2,94-10,6)	ФПУ-1 (0,3-1,06); ФПУ-2 (0,4-1,8); ФПУ-3 (2-11)
Діапазон тривалості вимірюваних імпульсів, с (мкм)	10^{-8} — $5 \cdot 10^{-3}$ (0,53-1,06)	Не зазначено	10^{-8} — 10^{-4} (0,48-1,54)	10^{-8} — 10^{-3} (0,3 - 1,06)
Діапазони вимірювань:				
- опромінення, Вт/см ² , (мкм);	10^{-6} — $2 \cdot 10^{-4}$ (0,53 -1,06), 10^{-4} — $2 \cdot 10^{-2}$ (10,6)	$10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-2}$ (0,53 -1,06), $10^{-4} \div 1$ (10,6)	10^{-6} — 10^{-2} (0,48-1,06) 10^{-5} — 10^{-1} (1,15-1,54); 10^{-3-1} (2,94-10,6)	10^{-6} – 1 (0,3-1,06)
- енергетичної експозиції, Дж/см ² ;	10^{-8} - $2 \cdot 10^{-6}$	10^{-8} - $2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7} — 10^{-3} (0,48-1,06) 10^{-6} — 10^{-2} (1,15-1,54) 10^{-5} — 10^{-1} (2,94-10,6)	10^{-8} - 10^{-2}
Максимальна частота повторення імпульсів, Гц (мкм)	12 (0,53-1,06)	Не зазначено	200 (0,48-1,54)	50 (0,3-1,06)
Індикація	цифрова	цифрова	цифрова	цифрова
Живлення	25 В, автономне	автономне	220 В або 5 В, автономне	220 В або 9 В, автономне
Габарити, мм	65×90×130	170×85×32	210×90×60	25×70×130
Маса, кг	0,5	0,8	0,87	0,3



Рис. 2. Зовнішній вид дозиметра
Fig. 2. The appearance of a dosimeter

* лазерний дозиметр ЛД-4, призначений для вимірювань енергетичної експозиції й опромінення розсіяного й відбитого лазерного випромінювання. Базова модель призначена для вимірювань випромінювань таких типів лазерів: гелій-неонових, рубінових, напівпровідникових, неодимових, CO_2 — лазерів;

* лазерний дозиметр «Ладін» зі змінним фотоприймальним обладнанням для контролю лазерного випромінювання в більш широкому діапазоні довжин хвиль;

* лазерний дозиметр ЛД-07, призначений для вимірювань енергетичної експозиції й опромінення розсіяного або відбитого лазерного випромінювання в автоматичному режимі, а також аналізу результатів вимірювань відповідно до чинних санітарних норм і правил №5804-91 і МЭК 825-1-93.

Основні технічні характеристики зазначених дозиметрів і розробленого нами дозиметра ЛД-10 наведено у таблиці. Межі основної похибки вимірювання, що допускається, зазначених дозиметрів не перевищують 20 %.

Для вирішення одного із поставлених вище завдань розроблено і досліджено макет дозиметра лазерного випромінювання, придатний для швидкого впровадження в метрологічну практику України.

Ураховуючи наведені вище невідповідності в нині чинних нормативних документах і можливі небезпеки їх корекції (СанПін 5804-91), прилад свідомо розроблявся без автоматичних розрахунків ГПР лазерного випромінювання. Окрім того, як впливає з наведених вище нормативних документів, для розрахунків ГПР необхідно враховувати геометрію, спектральний склад джерела випромінювання й ці-

лий ряд інших параметрів. Усе це, як уже зазначалося вище, потребувало від нас розроблення спеціального програмного забезпечення для визначення класу небезпеки джерела лазерного випромінювання.

Конструктивно дозиметр лазерного випромінювання — це малогабаритний настільний прилад, що складається із: блока вимірювального, змінних фотоприймальних обладнань і підставки приймача. Зовнішній вид приладу представлено на рис. 2.

На рис. 3 подано структурну схему дозиметра лазерного випромінювання. У відповідності зі схемою побудови дозиметр лазерного випромінювання складається із фотоприймального обладнання й блока вимірювального. До складу фотоприймального обладнання входять: бленда, комплект змінних діафрагм, оптичний інтегратор, фотоприймач. До складу блока вимірювального входять: багатограничний перетворювач струм-напруга, інтегратор, піковий детектор, схема АЦП, індикатор, перемикач меж, схема скидання показань.

Прилад має вбудоване джерело живлення на напругу 9 В і за необхідності може комплектуватися зовнішнім блоком живлення.

Фотоприймальне обладнання дозиметра лазерного випромінювання укріплене на підставці приймача, яка може встановлюватися на будь-яку горизонтальну площину.

Конструкція підставки допускає юстування й фіксацію положення фотоприймача в різних положеннях. За необхідності передбачено установлення фотоприймального обладнання на штатив. Фотоприймальне обладнання, відповідно до вимог ДСТУ EN 60825-1:2014, комплектується змінними обмежувальними діафрагмами (1; 3,5; і 7 мм). Фотоприймальне обладнання також оснащено відповідними оптичними послаблювачами. Як первинний вимірювальний перетворювач у фотоприймальному обладнанні ФПО-1 застосовано кремнієвий фотодіод, що забезпечує роботу приладу в діапазоні (0,3–1,06) мкм. Для розширення робочого діапазону довжин хвиль відпрацьовано конструкцію фотоприймального обладнання ФПО-2 із застосуванням германієвого фотодіода, що забезпечує роботу приладу в діапазоні (0,48–1,8) мкм. За необхідності дозиметр може комплектуватися додатковим фотоприймальним обладнанням ФПО-3 на основі болометра для контролю лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 2 до 11 мкм, при цьому автономне живлення всього дозиметра стає неможливим у зв'язку з необхідністю організації двополярного живлення додаткового приймального елемента.

У цьому випадку використовується зовнішній блок живлення, що підключається до промислової мережі 220 В.

Ураховуючи тенденції розвитку лазерної техніки, а також вимоги ДСТУ EN 60825-1:2014, робочий діапазон дозиметра ЛД-10 розширено до ультрафіолетового випромінювання.

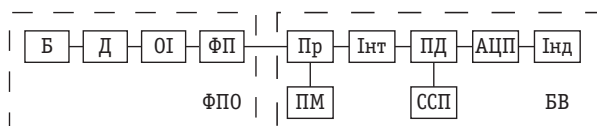
Основні технічні характеристики розробленого дозиметра лазерного випромінювання ЛД-10 наведено у таблиці. Межа основної похибки дозиметра ЛД-10, що допускається, не перевищує 15 %. Проведені дослідження показали, що характеристики розробленого приладу не лише перебувають на рівні закордонних аналогів, але й перевершують їх.

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВІРКИ ДОЗИМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Установку для повірки дозиметрів лазерного випромінювання розроблено відповідно до чинних в Україні нормативних документів у сфері дозиметрії лазерного випромінювання.

Принцип дії установки для повірки дозиметрів лазерного випромінювання полягає в тому, що під час проведення повірочних робіт формується й направляється в дозиметр, що повіряється, пучок лазерного випромінювання регульованої потужності з відомими енергетичними параметрами.

Регулювання потужності здійснюється шляхом розсіювання лазерного випромінювання набором



Д — діафрагма;

Пр — перетворювач струм-напруга;

Б — бленда;

Інт — інтегратор;

ОІ — оптичний

ПД — піковий детектор;

інтегратор;

ФП — фотоприймач;

ПМ — перемикач меж;

АЦП — аналого-цифровий перетворювач;

Інд — індикатор

ФПО — фотоприймальне обладнання;

БВ — блок вимірювальний

ССП — схема скидання показань;

Рис. 3. Структурна схема приладу

Д — the diaphragm;

Пр — current-voltage converter;

Б — Hood ;

Інт — integrator;

ОІ — optical integrator;

ПД — peak detector;

ФП — light detector;

ПМ — limits switch;

АЦП — analog-to-digital converter;

Інд — light images;

ФПО — photodetector;

БВ — measurement unit

ССП — reset circuit;

Fig. 3. Block diagram of the device

матованих світлофільтрів. Дискретне регулювання здійснюється за допомогою вибору кількості світлофільтрів у наборі, а плавне — зміною відстані між набором світлофільтрів і дозиметром, що повіряється. Змінна діафрагма, встановлена після набору світлофільтрів, формує із розсіяного випромінювання пучок потрібної щільності потужності або енергії, який спрямовано на дозиметр. Енергетичні параметри сформованого пучка вимірюються еталонним вимірником, який у процесі повірки замінюється дозиметром, що повіряється. Стабільність потужності випромінювання за заміни еталонного вимірника дозиметром, що повіряється, контролюється вимірником — «свідком», до якого відгалужувальне дзеркало направляє частину лазерного випромінювання.

До складу установки входять джерела безперервного лазерного випромінювання на довжинах хвиль 0,63, 0,8 і 10,6 мкм і джерело імпульсного лазерного випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм із можливим застосуванням подвоєння частоти до 0,53 мкм, а також оптичні елементи, які дозволяють отримувати



Рис. 4. Джерела лазерного випромінювання установки для повірки дозиметрів лазерного випромінювання на довжинах хвиль 0,63 і 0,8 мкм

Fig. 4. Systems of laser radiation sources for dosimeters calibration at wavelengths of 0.63 and 0.8 microns

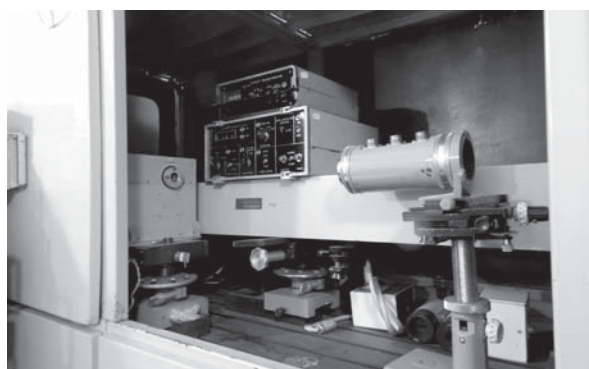


Рис. 5. Джерела лазерного випромінювання установки для повірки дозиметрів лазерного випромінювання на довжинах хвиль 10,6 і 1,06 мкм

Fig. 5. Systems of laser radiation sources for dosimeters calibration at wavelengths of 10.6 and 1.06 microns

на виході оптичної системи випромінювання кожного із цих лазерів.

Конструктивно установку для повірки дозиметрів лазерного випромінювання розміщено в оптичному модулі Державного первинного еталона одиниць середньої потужності й енергії лазерного випромінювання ДЕТУ 11-04-12. Зовнішній вид подано на рис 4 і 5.

До комплексу основних і допоміжних засобів вимірювань установки для повірки лазерних дозиметрів входять: вимірники типу ПВДЦ-2, кожний з яких складається із двох приладів: ватметра ПВДЦ-2 і джозульметра ПДЦ-2; оптичний блок, що складається із дзеркал, світлофільтрів і набору діафрагм; фотометрична сфера; генератор імпульсів типу Г5-56; частотомір ЧЗ-64; осцилограф.

Розроблена установка для повірки дозиметрів лазерного випромінювання має такі технічні характеристики: робочий спектральний діапазон установки становить (0,5...11) мкм; діапазони значень потужності й енергії лазерного випромінювання, відтворених установкою, становлять відповідно (10^{-6} ... 10^{-2}) Вт і (10^{-5} ... 10^{-2}) Дж; діапазони значень щільності потужності й щільності енергії лазерного випромінювання, відтворених установкою, становлять відповідно (10^{-7} ... 10^{-3}) Вт / см² і (10^{-6} ... 10^{-3}) Дж / см². Певні в результаті досліджень похибки вимірювань середньої потужності безперервного й енергії імпульсного лазерного випромінювання установки не перевищують відповідно 3,3 і 4,6 %. Основні похибки вимірювань щільності середньої потужності безперерв-

ного й щільності енергії лазерного випромінювання не перевищують, відповідно, 4,3 і 5,6 %.

Цю установку для повірки дозиметрів лазерного випромінювання, розроблено у повній відповідності з чинними в Україні нормативними документами у сфері дозиметрії лазерного випромінювання.

ВИСНОВКИ


Очевидно, що чинні СанПіН 5804-91 вимагають перегляду з метою приведення їх у відповідність із ДСТУ EN 60825-1:2014. На сьогодні, за проведення дозиметричного контролю лазерного випромінювання потрібно керуватися лише даними, наведеними в ДСТУ EN 60825-1:2014.

Ураховуючи, що класифікація лазерних установок, виготовлених у Росії, не збігається із класифікацією за ДСТУ EN 60825-1:2014, необхідно рекомендувати проведення повторної атестації цих лазерних установок.

У результаті проведеної роботи вирішено завдання із розроблення дозиметра лазерного випромінювання. Проведені дослідження розробленого дозиметра лазерного випромінювання засвідчили, що ряд характеристик приладу перевершує характеристики закордонних аналогів.

Описаний прилад можна використовувати під час проведення дозиметричного контролю лазерного випромінювання службою санітарно-гігієнічного нагляду України, органами випробувань і сертифікації продукції, організаціями і медичними установами, що розробляють, випускають і експлуатують лазерну техніку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Соклаков А.И. Проблемы дозиметрии лазерного излучения в медицине и биологии. Laser Market (Soklakov A.I. Laser radiations dosimetric issues in Medicine and Biology. Laser Marker) — 1993. № 6, с/р.14—15.
2. Цепколенко В.А. Лазерные технологии в эстетической медицине. Киев (Tserkolenko V.A. Laser technology in aesthetic Medicine. Kiev). — 2009, 191 с/р.
3. Тимофеев Е.П. Метрологическое обеспечение в области энергетической лазерометрии //Український метрологічний журнал (Tymofeiev Y.P. Metrological support in the field of energy laser measurement. Ukrainian Metrological Journal) — 2007, — N 1. с/р. 29—33.
4. Тимофеев Е.П. Дозиметрия лазерного излучения //
5. МУ № 5309—90 Методические указания для органов и учреждений санитарно-эпидемиологических служб по проведению дозиметрического контроля и гигиенической оценке лазерного излучения (МУ № 5309—90 Guidelines for the organs and institutions of sanitary-epidemiological services for the radiation monitoring and hygienic evaluation of the laser radiation).
6. СанПіН 5804-91 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров (Sanitary norms and rules of laser arrangement and operation).
7. http://www.lasersafepr.com/L_Home.htm 

Отримано / received: 03.11.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.П. Мачехінін (Україна).
Prof. Yu.P. Machekhin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 62-187:531.781.2

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТА МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

В. Квасніков, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютеризованих електричних систем та технологій,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
Т. Ганєва, аспірант кафедри якості та безпеки життя людини,
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

Розроблено шляхи підвищення точності вимірювання деформації та механічних напружень. Вивчено принцип дії тензорезисторних перетворювачів і показано роботу з тензометричною установкою, призначеною для вимірювання механічних зусиль. Визначено характеристики, чутливості та похибки. Подано структурну схему тензометричного вимірювального пристрою.

Ways to improve the accuracy of measurement of deformation and mechanical stress is used. The principle of operation of piezoconverter is examined. Shows how to work with strain-gage installation intended for measurement of mechanical effort. Characteristics, sensitivity and accuracy is defined. The block diagram of strain-measuring device is shown.

Ключові слова: деформація, напруження, чутливість, тензорезистори, похибка.
Keywords: strain, stress, sensibility, strain gauges, accuracy.

До сьогодні наукові дослідження у сфері вимірювання деформацій концентрувалися, головним чином, на створенні вимірювально-обчислювальних комплексів, і нині існує цілий ряд тензометричних пристроїв, які дозволяють вимірювати деформації як у статичному, так і в динамічному режимах. У міру поліпшення їх загальних техніко-економічних характеристик виявилось відставання динамічних параметрів вхідних пристроїв тензометричних систем — тензорезисторів [1].

Для вимірювання деформацій і напружень за натурних випробувань різних машин, конструкцій транспортних засобів, інших виробів найбільш широко використовують метод, заснований на застосуванні дискретних металевих і напівпровідникових тензорезисторів.

Точність вимірювання деформації у кожному конкретному експерименті визначається чутливістю відповідного датчика, потім — величиною фону механічних вібрацій, електричною стабільністю вимірювальних схем і температурною стабільністю.

Для збільшення точності вимірювання деформації й напруження самі датчики потрібно розміщувати якомога ближче до зразка, щоб виключити інерцію навантажувальних тяг, що з'єднують зразок зі струможивильним приводом.

З метою підвищення точності вимірювання деформацій, повільно мінливих у часі, створюють експериментальні комплекси, які включають складну вимірювальну й підсилювально-перетворювальну апаратуру, стійка робота якої залежить від безлічі часом випадкових чинників [1, 2].

Коефіцієнт чутливості значною мірою визначає точність вимірювання деформації, яка підвищується зі збільшенням цього коефіцієнта. Числове значення коефіцієнта визначається, в основному, матеріалом чутливого елемента тензодатчика; на нього



В. Квасніков



Т. Ганєва

впливає також клейове з'єднання датчика з деталлю, властивості якого істотно залежать від температури і вологості навколишнього середовища.

Використання в системах вимірювання прецизійних тензометричних датчиків дозволяє підвищити точність вимірювання деформації до (1...2) мкм.

Чинники, пов'язані з методикою випробування: установлення зразка; точність вимірювання деформацій; підтримання та вимірювання заданої температури; тривалість випробування; розміри (довжина) зразка [3].

Для забезпечення необхідної (заданої) точності вимірювань деформацій за реальних умов випробувань натурних об'єктів вимірювання повинні проводитися за допомогою систем тензометрії й з використанням процедур, що забезпечують реалізацію спеціально розробленої та метрологічно атестованої методики.

Особливість випробувань складних виробів — наявність великої кількості точок тензометрування, тому для цих цілей використовують багатоканальні тензостанції та інформаційно-вимірювальну систему для міцності випробувань.

Під час вимірювання деформації спочатку її перетворюють у переміщення кінців чутливого елемента тензометра, відстань між якими називається базою. При цьому використовують два способи кріплення первинного перетворювача до об'єкта випробування.

У першому випадку первинний перетворювач безпосередньо зміцнюють на випробуваному об'єкті. Такий спосіб вимірювання, широко застосовуваний за комплексних випробувань складних об'єктів з використанням тензорезисторів, відрізняється невисокою точністю внаслідок великого розкиду параметрів тензорезисторів і неможливості градувати прилад з певним тензорезистором, який за таких вимірювань є елементом разового використання.

У другому випадку датчик тензометра, що включає первинний перетворювач (тензорезистивний, індуктивний, електрооптичний), прикріплюють до досліджуваного об'єкта за допомогою спеціальних пристроїв, виконуваних у виді опорних призм, ножових, пружинних, магнітних та інших типів захватів. Для вимірювань за високих температур застосовують захвати з кварцовими наконечниками. Такі тензометри зазвичай використовують спільно з випробувальними машинами для міцності випробувань деталей, зразків матеріалів та окремих елементів складних конструкцій [4—6].

Переміщення захватів, зумовлене деформацією випробуваного зразка, вимірюють за допомогою різних методів і засобів вимірювань, але найбільш широко застосовують тензорезистивні, індуктивні й електрооптичні тензометри.

Тензометри, використовувані разом з випробувальними машинами, забезпечують вимірювання з відносно малими похибками (0,2...1,5)%, оскільки їх можна градувати спільно з датчиком за допомогою еталонних засобів вимірювань довжини.

Основа принципу дії тензорезисторів — явище тензоефекту, що полягає у зміні електричного опору провідників і напівпровідників за їх механічної деформації.

Опір R резистора, виконаного у виді проволу довжиною l , визначають відомим виразом:

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad (1)$$

де ρ — питомий опір матеріалу проволу; S — площа поперечного перерізу проволу.

Продиференціюємо вираз (1) і перейдемо до кінцевих приростів. Отримаємо, що поздовжній пружній деформації проволу відповідає відносна зміна її опору

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}, \quad (2)$$

де ΔR , $\Delta \rho$, Δl , ΔS — абсолютні збільшення опору, питомого опору, довжини і площі поперечного перерізу провідника відповідно [5].

У твердому тілі в зоні пружних деформацій величини поперечних і поздовжніх деформацій пов'язані виразом:

$$\epsilon_{\epsilon} = \mu \epsilon_l, \quad (3)$$

де $\epsilon_l = \Delta l / l$ — значення відносної поздовжньої деформації; $\epsilon_{\epsilon} = \Delta \epsilon / \epsilon$ — значення відносної поперечної деформації; ϵ — поперечний розмір провідника; μ — коефіцієнт Пуассона.

З урахуванням виразів (2) і (3) величина відносної зміни провідника діаметром d і довжиною l

$$\begin{aligned} \epsilon_R &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta d \pi d / 4}{2 \pi d^2 / 4} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon_l - 2 \frac{\Delta d}{d} = \\ &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon_l - 2 \epsilon_l = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon_l + 2 \mu \epsilon_l = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon_l (1 + 2 \mu). \end{aligned} \quad (4)$$

Ураховуємо, що якість тензорезистора визначають його коефіцієнтом тензочутливості K і величиною температурного коефіцієнта опору α_R . Коефіцієнт тензочутливості K визначають відношенням:

$$K = \frac{\epsilon_l}{\epsilon_R}. \quad (1)$$

Отже, чим вище коефіцієнт тензочутливості K і менше температурний коефіцієнт опору матеріалу,

з якого виготовлено тензорезистор, тим вища його якість.

Найчастіше дротові тензорезистори виготовляють зі сплавів константану і манганіну, для яких $K \approx 2$ і $\text{ТКО} = \pm 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ та $\pm 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ відповідно.

На структурній схемі (рисунок) представлено можливі варіанти використання вихідного сигналу мостової вимірювальної схеми з двома тензорезисторами, включеними у плечі моста за диференціальною схемою.

Під дією вимірюваного зусилля деформується пружний чутливий елемент (як такий використовують балку рівного опору), в інших же випадках це може бути деталь будь-якої форми, на поверхню якої наклеюють тензорезистори [6, 7].

Вихідний сигнал мостової невідновленої схеми подається на вхід електродного підсилювача з постійним і відомим коефіцієнтом підсилення.

Вихідне напруження нерівноважного моста за умови, що в стані рівноваги опори всіх плечей дорівнюють R_0 , а напруга джерела живлення $E = \text{const}$, визначається виразом:

$$\Delta U_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{E \varepsilon R}{1 + \frac{R_0}{R_H} \left(1 - \frac{(\Delta R/R_0)^2}{2} \right)}, \quad (2)$$

де R_H — опір навантаження на виході мостової схеми, тобто вхідний опір електродного підсилювача; відносна зміна опору кожного з тензометрів.

Для переважної більшості підсилювачів постійного струму можна прийняти, що їхній вхідний опір $R_H \gg R_0$, тоді відповідно $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}$,

$$\Delta U_M = \frac{1}{2} E \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (3)$$

тобто між вимірюваною деформацією (зусиллям), що зумовлює зміну опору тензорезисторів зі зна-

чення $R_0 = R_1 = R_2$ до значень $R_0 \pm \Delta R$, і вихідним напруженням мостової схеми існує практично лінійна залежність [3, 4].

Отже, вихідний сигнал підсилювача $U_{\text{вих}}$ (рисунок), що має коефіцієнт підсилення за напругою K_y , представлятиметься таким співвідношенням:

$$U_{\text{вих}} = K_y \Delta U_{MM} = \frac{1}{2} K_y E \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (4)$$

Залежно від необхідної форми подання результату вимірювання вихідний сигнал може подаватися на вхід різних вимірювальних і перетворювальних пристроїв. Для представлення результату вимірювання у цифровій формі $U_{\text{вих}}$ вимірюється ЦВ, вихід якого може приєднуватися до самостійного ЦДП з метою забезпечення документальної реєстрації результатів вимірювання [8—9].

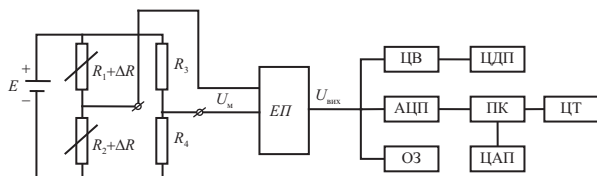
У тому випадку, коли вихідну інформацію необхідно опрацювати за заданим алгоритмом, $U_{\text{вих}}$ подається на АЦП, з виходу якого інформативний сигнал у виді коду подається на ОЗ. Опрацьовані результати експерименту виводяться на ЦДП.

Окрім того, вихідне напруження підсилювача може вимірюватися аналоговим електронним вольтметром. В інженерній практиці найчастіше $U_{\text{вих}}$ фіксується на фотопапері або кіноплівці за допомогою ОЗ [9].

За всього різноманіття завдань, що вирішуються за допомогою тензорезисторів, можна виділити дві основні сфери їх застосування.

Перша — застосування тензорезисторів для вимірювання механічних величин, перетворених у деформацію пружного елемента, величина якої вимірюється за допомогою тензорезисторів. У цьому випадку є можливість індивідуального градування тензорезистивного перетворювача, на основі якої будується його градувальна характеристика. Поточне значення вимірюваної величини визначається з використанням градувальної характеристики. Похибки вимірювань містяться в діапазоні (0,05...0,5) %.

Друга сфера застосування — дослідження деформацій і механічних напружень в деталях і елементах конструкцій. Наприклад, у різних точках тонкої оболонки, що піддається складним навантаженням. Прикладом такої оболонки може слугувати фюзеляж сучасного літака або корпус сучасної вакуумної установки. Для вирішення цих завдань характерні значна кількість точок тензометрування, широкі діапазони зміни вимірюваних деформацій або напружень і відсутність можливості градування вимірювальних каналів [9—10].



Структурна схема тензометричного вимірювального пристрою

ЕП — електронний підсилювач (підсилювач постійного струму); ЦВ — цифровий вольтметр; ЦДП — цифродрукуювальний пристрій; АЦП — аналого-цифровий перетворювач; ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач; ПК — персональний комп'ютер; ОЗ — запам'ятовувальний осцилограф; ЦТ — цифрове табло

ВИСНОВКИ


Отже, основна причина похибки — розкид значень опорів конкретних одиниць тензорезисторів R_1 , R_2 і значень коефіцієнтів тензочутливості щодо середніх для певної партії значень. У зв'язку з цим сумарна похибка вимірювань становить (2...10)%.

У тензорезисторах, які використовують для вимірювання як статичних, так і динамічних деформа-

цій, верхня межа частотного діапазону визначається співвідношенням між базою тензометра l і довжиною хвилі λ пружної деформації в матеріалі досліджуваного елемента.

Ураховуючи, що співвідношення треба підтримувати у межах $l/\lambda \leq 0,1$, практично частота реєстрованих процесів може міститися в діапазоні (0...100) кГц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. Изд. 2-е, доп. М., «Энергия» (Loginov V.N. Elektricheskie izmereniya mekhanicheskikh velichin. Izd. 2-e, dop. M., «Energiya»), 1976. 104 с/с.
2. Биргер И.А. Методы определения остаточных напряжений в стержнях и пластинах, «Заводская лаборатория» (Birger I.A. Metody` opredeleniya ostatochny`kh napryazhenij v sterzhnyakh i plastinakh, «Zavodskaya laboratoriya»), 1992, № 5.
3. Shapiro L. G., Stockman G. C. Computer Vision // Prentice Hall, 2002.
4. Злочевский А. Б., Миронов В. И. Измерение деформаций низкоимпульсных материалов электротензометрическим методом. — «Измерительная техника» (Zlochevskij A. B., Mironov V. I. Izmerenie deformacij nizkomodulny`kh materialov e`lektrotenzometricheskim metodom. — «Izmeritel'naya tekhnika»), 1999, № 2, с/с. 26—68.
5. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Под ред. канд. техн. наук Р. А. Макарова. М., «Машиностроение» (Tenzometriya v mashinostroenii. Spravochnoe posobie. Pod red. kand. tekhn. nauk R. A. Makarova. M., «Mashinostroenie»), 1975. 288 с/с.
6. Keil S. Beanspruchungs analyse mit Dehnungsmessstreifen (Stress analysis using strain gages). — Cuneus — Verlag, 1995.
7. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. — Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка» (Polishchuk Ye.S. Metody ta zasoby vymirivann neelektrychnykh velychyn. — Lviv: Vydavnytstvo NU «Lvivska politekhnika»), 2000. — 360 с/с.
8. Bagaria W.I., Sharper W.N. // Exp. mech. — 1980. — June. — P. 205.
9. Tsai Iting, Wu Enboa, S. F. Yen and T. H. Chuang Mechanical properties of intermetallic compounds on lead-free solder by moire techniques // Journal of Electronic Materials. 2006. Vol. 35, № 5. P. 1059—1066.
10. Chan F. H. Y., Lam F. K., Zhu H. Adaptive thresholding by variational method // IEEE Transactions on Image Processing 7. 1998. 3 (March). P. 468—473. 

Отримано / received: 13.11.2015.

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

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

УДК 389.62.1:165

ОЦІНЮВАННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДІЙ ДИСКРЕТНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО КОНЦЕПЦІЇ GUM

В. Левикін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем,

О. Чала, кандидат економічних наук, доцент,

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

Запропоновано метод оцінювання часу виникнення подій у дискретних процесах з урахуванням невизначеності як розсіювання значень. Множина вимірювань часу однієї події процесу формується шляхом об'єднання моментів часу її виникнення з різних трас процесу, що входять до складу його лога. Вхідні дані для оцінювання відбираються відповідно до умов, що формуються на основі відношень переходу, нерозрізненості та обмеження. Результати оцінювання відображаються у виді середнього значення та інтервалу охоплення параметра часу. Сфера практичного застосування отриманих теоретичних результатів пов'язана з побудовою та аналізом моделей процесів у парадигмі process mining.

A method for estimating the time of occurrence of the events in the processes of dispersion of discrete measurement values is proposed. A number of time measurements for a single event is combined from the different traces of the process. Every trace is a part of process log. The input data for the assessment are selected in accordance with the terms and conditions, which are formed on the basis of three relations: transition, indistinguishability and restriction. Evaluation results are shown as the mean value and range of coverage of the time parameter. The practical application of the theoretical results is related to the construction and analysis of process models in the paradigm of process mining.

Ключові слова: вимірювання, концепція GUM, дискретний процес, лог процесу, подія.

Keywords: measurement, concept GUM, discrete process, log, event.

Проблематика оцінювання часу виконання дискретних процесів, що представляються у виді послідовності подій, пов'язана з вирішенням завдань побудови моделей таких процесів. За побудови моделей здійснюється перехід від множинного описання процесів (множини упорядкованих подій) до логічних, алгебраїчних та інших форм представлення процесу. Відображення часу в таких моделях може бути як якісним, так і кількісним. За якісного описання часу модель дозволяє передбачити появу визначених подій у майбутньому, наприклад: у наступний момент часу; у довільний момент у майбутньому; після іншої визначеної події. За кількісного описання часу модель дозволяє визначити, наприклад, часові обмеження для подій у майбутньому, загальний час виконання процесу тощо.

Особливо актуальною проблематика визначення часових параметрів дискретних процесів є за побудови моделей методами process mining (інтелектуального аналізу процесів). Методи process mining направлені на побудову моделей дискретних процесів на основі аналізу логів, що фіксують їх виконання в рамках інформаційної системи [1]. Наявні підходи до моделювання процесів у парадигмі process mining орієнтовані значною мірою на побудову якісних моделей процесів.

Власники процесів, як правило, мають потребу в аналізі моделей, отриманих у результаті застосування методів process mining. Аналіз дозволяє виявити проблемні зони процесу і, в подальшому, реконструювати такі фрагменти для підвищення їх ефективності. У проблемних зонах звичайно виникають затримки під час виконання



В. Левикін



О. Чала

процесу. Наприклад, типові проблеми процесного управління для одного із підрозділів фірми Volvo пов'язані з перекладанням відповідальності між виконавцями процесу та зі зловживанням статусом «в очікуванні користувача»[2]. Очевидно, що перша проблема призводить до затримок внаслідок необґрунтованих змін виконавців операцій процесу, а друга вказує на спробу приховати затримки в обслуговуванні користувачів.

Наведені проблеми важко виявити в силу багатоваріантності процесів: за кожної реалізації процес адаптуватиме час виникнення подій у відповідності з умовами зовнішнього середовища. Це призводить до відповідних змін у лозі процесу.

Традиційно, за побудови моделі процесу виконується об'єднання подій з урахуванням їх часового параметра [3]. У результаті отримуємо модель процесу з розгалуженням часу, що відображає його можливі траси. За такого підходу в одній моделі об'єднуються дії для різних рівнів ієрархії об'єкта, на якому проходить розглянутий процес. На практиці, за використання логів діючих підприємств, отримуємо так звану «спагеті» модель [4]. Аналіз і, зокрема, оцінювання часу виконання процесів для такої моделі пов'язані з труднощами і потребують декларативних підходів до побудови моделей процесу [5, 6].

Отже, сучасні методи інтелектуального аналізу процесів направлені на побудову моделей, що відображають всі можливі варіанти реалізації процесу. Разом з тим практичні потреби аналізу процесів пов'язані з виявленням «вузьких місць» на основі порівняння як моделей, так й їх логів. «Вузькі місця» — це фрагменти процесу, в яких відбуваються затримки часу за його проходження. Тому для порівняння процесів та виявлення фрагментів з втратами часу потрібно визначити такий спосіб оцінювання часу подій для логів процесів, який би дозволив порівнювати ефективність самих процесів у часовому вимірі.

Зазначене вище свідчить стосовно актуальності теми дослідження.

Мета цього дослідження — розроблення методу оцінювання часу виникнення подій (що фіксують виконання відповідних дій) дискретних процесів з урахуванням невизначеності як розсіювання значень у відповідності з концепцією GUM.

У практичному плані оцінка часу виконання процесів повинна враховувати як затримку, так і більш раннє виникнення окремих подій процесу для того, щоб можна було порівняти аналогічні процеси на різних підприємствах та виявити «вузькі місця».

ОЦІНЮВАННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДІЙ ДИСКРЕТНИХ ПРОЦЕСІВ

У відповідності з концепцією GUM для побудови моделі вимірювань потрібно виконати такі кроки на етапах формулювання та обчислень[7]:

На етапі формулювання необхідно: визначити вихідні (ті, що вимірюються) та вхідні величини; розробити модель вимірювань; визначити розподіл ймовірностей для вхідних величин.

На етапі обчислень у загальному випадку виконується трансформація розподілу ймовірностей для вхідних величин за допомогою моделі вимірювань для того, щоб отримати розподіл вихідної величини.

Для визначення вхідних величин розглянемо особливості вхідних логів, що використовуються для побудови моделей дискретних процесів методами інтелектуального аналізу процесів.

Традиційний підхід до побудови моделі процесу в парадигмі process mining передбачає об'єднання послідовностей подій процесу. Лог містить множину послідовностей подій, кожна з яких відображає одноразове виконання процесу. Таку послідовність подій звичайно визначають як слід або трасу процесу. Для подій зазначається час їх виникнення. Загалом лог об'єднує всі варіанти виконання процесу, які були використані на практиці. Відзначимо, що процеси можуть бути недокументованими. У такому випадку лог фіксує порядок вирішення поточних задач. Для документованих процесів засоби process mining дозволяють виявити відхилення описання та реального процесу, а для недокументованих — побудувати модель процесу.

Кожна подія логу фіксує виконання тієї чи іншої дії процесу. Часовий параметр кожної події — результат одноразового вимірювання часу закінчення (інколи — початку) дії процесу. Лог містить множину вимірювань часу виникнення кожної події процесу.

З точки зору технічної процедури отримання вимірювальної інформації маємо розсіювання значень, що приписують вимірюваній величині. Таке розсіювання, у відповідності з концепцією GUM, характеризується терміном «невизначеність» [8, 9] і відповідає залишковій невизначеності знань стосовно вимірюваної величини [10, 11]. Тому за формування інтегрального показника оцінювання часу виконання процесів, що охоплює час виконання вибраних дій процесу для всіх його наявних трас, доцільно використовувати концепцію GUM.

Оскільки за вимірювання часу потрібно враховувати розсіювання для різних подій процесу, ці події повинні відображатися в одному масштабі часу.

Відзначимо, що побудова моделі процесу методами process mining базується на припущенні, що для всіх подій використовується однакова деталізація часу. Проте ця умова виконується не завжди, оскільки масштаб часу значною мірою залежить від властивостей об'єктів, що беруть участь у процесі (наприклад, елементів комп'ютерної системи, інтелектуальних агентів, людей-виконавців). Одна траса процесу може охоплювати події, які потрібно аналізувати у різному масштабі часу [12].

Тому для оцінювання часу виникнення подій у таких процесах необхідно розподілити події за різними рівнями деталізації часу.

Багаторівнева деталізація часу, запропонована авторами, базується на загальних властивостях грануляції [13], а також підходах до грануляції часу [14,15].

Така деталізація часу містить такі складові:

1) Множину релевантних наборів моментів часу. Кожний із наборів відповідає множині подій з одним рівнем деталізації часу. Елементи одного набору пов'язані відношеннями переходу та порядку.

2) Підмножини подій, що належать до одного рівня деталізації та пов'язані відношенням нерозрізненості.

3) Підмножини подій одного рівня деталізації, між якими встановлено відношення обмеження. Це відношення дозволяє розділити окремі події або їх групи.

4) Підмножини подій, між якими встановлено відношення узагальнення/деталізації. Такі підмножини належать до різних рівнів деталізації часу.

У відповідності з цим підходом за оцінювання часу виникнення подій використовують складові 1—3. Розглянемо їх детальніше.

Релевантний набір підмножин моментів часу $T_i \subseteq T$ описує послідовність подій (у цій моделі моментів часу $t_{ij} \in T_i$, коли відбувалися події процесу) на різних рівнях деталізації часу. Між подіями з кожної підмножини T_i на одному рівні деталізації задані відношення переходу та порядку. Відношення переходу — антирефлексивне. Традиційно для нього виконується умова:

$$t' < t'' \Rightarrow \neg \exists t : t' < t \wedge t < t'', t', t'', t \in T_i. \quad (1)$$

У відповідності з (1) для пари моментів t' і t'' , між якими встановлено відношення переходу, неможливо досягти більшої деталізації часу, оскільки для підмножини $T_i \subseteq T$ процесу не існує проміжних моментів t між t' і t'' . Зазначене співвідношення — істинне для одного рівня деталізації процесу. За традиційного підходу до побудови моделі на основі об'єднання трас співвідношення (1) може не виконуватися у таких випадках:

- відбувається злиття паралельних послідовностей подій;

- маємо розсіювання моментів часу для однієї й тієї ж події на різних трасах процесу.

У першому випадку доцільно розмістити набори моментів часу, що відповідають паралельним послідовностям дій, на окремих рівнях деталізації часу.

У другому — за визначення відношення переходу необхідно враховувати непевність у вимірюванні часу подій для різних трас. Визначимо через τ_j підмножину відносних моментів часу $t_{kj} \in \tau_j$, що відповідають виникненню j події на різних трасах процесу. Тобто τ_j містить k вимірювань моментів часу виникнення j події.

Тоді для кожного елемента із підмножини τ_j виконується відношення нерозрізненості (2):

$$t' \approx t'' \equiv ((t' < t'') \vee (t'' < t')) \vee (t' < t'') \vee (t'' < t') = \text{false} \forall t', t'' \in \tau_j. \quad (2)$$

Відношення порядку задається через відношення переходу:

$$t' < t'' \Rightarrow \exists t : t' < t \dots < t''. \quad (3)$$

Відповідно, кожна множина τ_j містить лише ті моменти часу, для яких неможливо задати відношення переходу:

$$\forall t' \in \tau_j, \exists t'' \in \tau_j : t' \approx t''. \quad (4)$$

Нерозрізненість елементів підмножини τ_j у рамках запропонованого підходу свідчить стосовно непевності у вимірюванні часу виникнення j події згідно з концепцією GUM. Тому необхідно визначити відношення переходу для j і $j+1$ подій через відношення між підмножинами τ_j і τ_{j+1} :

$$\tau_j < \tau_{j+1} \text{ iff } \exists t' \in \tau_j, t'' \in \tau_{j+1} : t' < t''. \quad (5)$$

Із визначення (5) видно, що умова для встановлення відношення переходу для підмножин τ_j і τ_{j+1} — наявність хоча б однієї пари елементів із цих підмножин, для яких виконується відношення переходу. Тому наявність відношення (5) для процесу визначається наявністю відношень $t' < t''$ у вхідному лозі.

Очевидно, що за визначення переходу в сенсі (5) можуть існувати пари елементів $t^* \in \tau_j, t^{**} \in \tau_{j+1}$ такі, що $t^{**} < t^*$. Тобто моменту настання другої події може передувати момент настання першої на шкалі часу. Це означає порушення лінійності часу в моделі й може свідчити стосовно неефективності ділянки процесу (τ_j, τ_{j+1}) . Тому необхідна умова для аналізу часових характеристик процесу ділянки (τ_j, τ_{j+1}) :

$$\exists t^* \in \tau_j, t^{**} \in \tau_{j+1} : t^{**} < t^* \mid \tau_j < \tau_{j+1}. \quad (6)$$

Умова (6) дозволяє визначити відношення обмеження $\tau_j \oplus \tau_{j+1}$. Останнє використовують для того,

щоб розділити події підмножин τ_j і τ_{j+1} :

$$\tau_j \oplus \tau_{j+1} \text{ iff } (\tau_j < \tau_{j+1}) \wedge (t' < t'') \quad (7)$$

$$\forall t' \in \tau_j, t'' \in \tau_{j+1}$$

Нерозрізнені елементи τ_j і τ_{j+1} відображають непевність вимірювань часу виникнення відповідних подій. Тому з підмножин τ_j і τ_{j+1} доцільно вилучити ті елементи, для яких не виконується умова (7). У практичному аспекті це означає, що як вхідні дані не враховують ті моменти часу, для яких порушується умова лінійності часу. Таке порушення свідчить стосовно затримки в ході реалізації процесу.

Отже, вхідні дані для оцінювання часу визначаються умовами (1)–(3) для окремих моментів часу та умовами (4), (5), (7) для підмножин τ_j і τ_{j+1} , що містять дані вимірювань часу t для j та $j+1$ подій відповідно.

За виконання наведених умов кожне вимірювання часу t для j події належить до інтервалу:

$$t \in [t_{j\min}, t_{j\max}] \quad \forall t \in \tau_j \quad (8)$$

$$(t' < t_{j\min}) \wedge (t'' > t_{j\min}) \quad \forall t' \in \tau_{j-1}, t'' \in \tau_{j+1}$$

Із (8) видно, що наведені вище відношення задають обмеження для вхідних даних оцінювання часу виникнення подій дискретних процесів. Ці обмеження дозволяють виключити із вхідних даних ті моменти часу, які характеризують неефективне виконання процесу.

У рамках задачі дослідження нас цікавить належність вхідних даних до інтервалу (8), а не розподіл цих даних. Тому, відповідно до [16], знання щодо вхідної величини характеризується прямокутним розподілом з межами $t_{j\min}$ і $t_{j\max}$.

Модель вимірювань у відповідності з наведеним підходом дає можливість отримати оцінку часу виконання кожної j події та інтервал охоплення.

Значення часу для підмножини τ_j визначаємо як середнє значення моментів часу:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_k t_{kj}}{K} \mid t_{kj} \in [t_{j\min}, t_{j\max}], k = \overline{1, K} \quad (9)$$

Інтервал охоплення, що містить сукупність істинних значень вимірюваної величини із заданою вірогідністю, визначається відповідно до виразу (8).

Інтервал охоплення дозволяє визначити можливість оптимізації процесів на основі співставлення мінімальних $[t_{j-1\max}, t_{j\min}]$ та максимальних $[t_{j-1\min}, t_{j\max}]$ інтервалів часу між двома послідовними подіями j та $j+1$.

Середні значення часу для підмножини τ_j дають можливість прогнозувати час виконання процесу.

Умова (6) дозволяє відділити події, що не входять

до інтервалу охоплення, і, отже, визначити найменш ефективні в темпоральному сенсі фрагменти процесу. Ця умова забезпечує можливість для виявлення трас логу з несвоєчасним виникненням попередньої $j-1$ події, що потенційно може затримати наступну j подію процесу.

Метод оцінювання часових характеристик подій дискретних процесів, що базується на наведених обмеженнях і моделі, використовує як вхідні дані набір підмножин моментів часу, для яких задані відношення переходу.

Метод містить такі етапи.

1. Нормування часу. На цьому етапі виконується перехід від абсолютних до відносних значень часу, що дозволяє порівняти послідовності подій, які належали до різних трас процесу і тому відбувалися в різні проміжки часу.

2. Визначення підмножин τ_j , для яких виконується умова нерозрізненості (4). На цьому етапі формується початковий набір підмножин вхідних даних шляхом об'єднання результатів фіксації часу для кожної j події в різних трасах процесу.

3. Визначення часових обмежень (7) для пар подій j та $j+1$, для яких задано відношення переходу. На цьому етапі формується інтервал охоплення часу для кожної події, а також множина трас, що потребують подальшого аналізу позицій ефективності в часовому вимірі.

4. Оцінювання значення часу для кожної події відповідно до (9).

У рамках цього дослідження розглянуто лише відношення переходу для дискретного процесу. Однак наведені вище кроки з формування набору вхідних даних для оцінювання часу подій також можна застосовувати для подій, пов'язаних відношенням порядку (3). Відношення порядку зводиться до відношення переходу шляхом вилучення проміжних подій.

ВИСНОВКИ

Запропоновано модель та метод оцінювання часових характеристик подій дискретних процесів із використанням концепції вимірювань GUM.

Модель відрізняється тим, що враховує невизначеність як розсіювання вимірювань часу для однакових подій з різних реалізацій одного дискретного процесу. Множина вимірювань часу однієї події процесу формується шляхом об'єднання моментів часу її виникнення з різних трас процесу, що входять до складу його логу. Вхідні дані моделі вимірювань відбираються відповідно до обмежень на основі відношень переходу, нерозрізненості та обмеження.

Модель дозволяє визначити середнє значення та інтервал охоплення параметра часу.

Метод базується на моделі оцінювання і передбачає нормування часу подій, формування підмножин моментів виникнення кожної події, фільтрацію тих моментів виникнення подій, що не відповідають нормальному виконанню процесу, а також отримання оцінки часу виникнення та інтервалу охоплення часу кожної події.

У практичному плані метод створює умови для порівняння розподілених у просторі аналогічних процесів або процесів із подібних предметних сфер. Наприклад, з'являється можливість порівняти темпоральні характеристики однакових процесів на різних підприємствах із урахуванням розсіювання подій. Такий порівняльний аналіз дозволяє, зокрема, виявити умови виникнення «проблемних» подій, які призводять до затримок у виконанні процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. W.M.P. van der Aalst. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes [Text] / W.M.P. van der Aalst. Springer-Verlag, Berlin, 2011. — 352 p.
2. Dongen, van B.F. Business Process Intelligence Challenge // B.F. van Dongen, B. Weber, D.R. Ferreira, and J. De Weerd. [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: http://www.ceur-ws.org/Vol-1052/summary.pdf](http://www.ceur-ws.org/Vol-1052/summary.pdf) / — 2013 r.
3. W.M.P. van der Aalst. Process Mining in the Large: A Tutorial. [Text] / In E. Zimnyi, editor, Business Intelligence (eBISS 2013), volume 172 of Lecture Notes in Business Information Processing, Springer-Verlag, Berlin, 2014. — P. 33—76.
4. W.M.P. van der Aalst. Process Mining: Discovering and Improving Spaghetti and Lasagna Processes [Text] / W.M.P. van der Aalst // IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM 2011). — Paris, France, 2011. — P. 13—20.
5. W.M.P. van der Aalst Declarative Workflows: Balancing Between Flexibility and Support [Text] / W.M.P. van der Aalst, M. Pesic, H. Schonenberg // Computer Science — Research and Development, 23(2). — 2009. — P. 99—113.
6. De Leoni M. Aligning event logs and Declarative process models for conformance checking [Text] / M. De Leoni, F. Maggi, W.M.P. vander Aalst, // Proceedings of the 10th International Conference on Business Process Management, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7481, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. — P. 82—97.
7. Введение к «Руководству по выражению неопределенности измерения» и сопутствующим документам. Оценивание данных измерений [Text] / Пер. с англ. под науч. ред. д.т.н., проф. В.А. Слаева, д.т.н. А.Г. Чуновкиной. — СПб.: «Профессионал», 2011. — 58 с/р.
8. ISO/IEC Guide 98. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) (Частина 3: Настанови з подання непевності у вимірюванні).
9. International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM). (Міжнародний словник основних і загальних термінів у метрології). ISO, 1993.
10. Чалий В. Щодо обґрунтування терміна «непевність» у вимірюванні / В. Чалий, О. Чала // Метрологія та прилади. — 2011. — №4. — С/Р. 3—10.
11. Чалий В. Деякі філософсько-інтерпретаційні та прикладні аспекти концепції непевності у вимірюванні / В. Чалий // Метрологія та прилади. — 2015. — № 4(54). — С/Р. 46—49.
12. Hobbs J.R., Granularity [Text] / J.R. Hobbs // Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Angeles, California, 1985. — 432—435 pp.
13. C. Bettini, X. S. Wang, S. Jajodia, and J-L. Lin. Discovering Frequent Event Patterns with Multiple Granularities in Time Sequences. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2(10):222—237, 1998.
14. Bettini C. Time Granularities in Databases, Data Mining, and Temporal Reasoning. [Text] / C. Bettini, S. Jajodia, and X.S. Wang // Springer, Berlin, Germany, 2000. — 230p.
15. Montanari A.. Metric and Layered Temporal Logic for Time Granularity. [Text] / A. Montanari. — PhD thesis, University of Amsterdam, Amsterdam, Netherlands, september 1996. — 178p.
16. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Неопределенность измерения — Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерения (GUM:1995) JCGM 100:2008

Отримано / received: 01.12.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.О. Філатовим (Україна).

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

УДК 534.08

АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АМПЛІТУДНО-ЗАЛЕЖНОГО ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ

А. Зенкін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології, стандартизації та сертифікації,
С. Лісовець, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем,
В. Здоренко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
 Київський національний університет технологій та дизайну

Розглянуто дослідження міцнісних характеристик "м'яких" полікристалічних матеріалів, зокрема латуней, шляхом їх зондування акустичними хвилями, що складаються з двох різних за амплітудами пакетів коливань. В основу дослідження покладено явище амплітудно-залежного внутрішнього тертя (АЗВТ), яке полягає в залежності коефіцієнта поглинання та швидкості акустичної хвилі від її амплітуди, причому ступінь зміни цих параметрів залежить також від міцнісних характеристик матеріалів, що досліджуються.

The article discusses a study on strength characteristics of soft polycrystalline materials, which include brass. The study is supposed sensing of such materials by acoustic waves, which consist of two different amplitude oscillations packages. The ratio between the amplitudes of these packages is maintained as accurately as possible, with the absolute stability of the amplitudes does not impose strict requirements.

Ключові слова: багатофакторний експеримент, границі зерен, зондувальна акустична хвиля, коефіцієнт поглинання, пакети коливань, план другого порядку, полікристалічний матеріал, фазова швидкість.

Keywords: multiple-factor experiment, grain boundaries, probing acoustic wave, absorption coefficient, packages oscillation, plan of the second order, polycrystalline material, phase velocity.

Сучасна промисловість, як відомо, випускає величезну кількість виробів, в яких застосовуються різні конструкційні матеріали. Одна із нагальних проблем за виробництва та експлуатації цих виробів — контроль їхніх міцнісних характеристик, до яких належать межа міцності за розриву σ_B , межа плинності σ_T , межа міцності на зріз σ_{CP} та деякі інші.

Найбільш точні та достовірні методи контролю цих характеристик — руйнівні методи, але в багатьох випадках останні неприйнятні через високу вартість виробу, що буде зруйнований, або через загрозу навколишньому середовищу чи життю людей. Існують також неруйнівні методи контролю, такі як електромагнітні методи, методи вимірювання твердості або методи лінійної акустики, але вони також не завжди забезпечують необхідні значення достовірності контролю та похибок

Package with small amplitude of oscillation passes through the material with almost the same group velocity and decays exponentially. And the package with large amplitude, due to the presence in the material of amplitude-dependent internal friction, feels like the speed change and the change in the attenuation. The material in this case is called structurally heterogeneous, and the passage of the acoustic wave is described by models of hysteresis friction or separation. This nonlinear behavior is due to the fact that the passage of an intense acoustic wave in the material in places of the greatest violations of the uniform structure (grain boundaries, cracks, and delamination) observed large relative deformation. But such deformations lead to deviation from the linear dependence (Hooke's law), that is, the waveform distortion and the generation of different nonlinear effects.

As a result of the control is influenced by many additional factors, such as the temperature of the material, frequency of fill packs of oscillations, the amplitude of the acoustic wave and so on, for the processing result of the control, you must use multi-factor experiment.



А. Зенкін



С. Лісовець



В. Здоренко

вимірювання. Особливо потрібно зупинитися на методах лінійної акустики. Як відомо, акустичні параметри матеріалів, у тому числі й конструкційних (такі, як швидкість розповсюдження акустичних хвиль, загасання та дисперсія), пов'язані з механічними властивостями матеріалів. Це дозволяє за акустичними параметрами матеріалів робити висновки щодо їхніх механічних властивостей. Загалом в об'ємі матеріалу можуть розповсюджуватися в довільному напрямку з різними швидкостями три пружні хвилі (одна поздовжня та дві поперечні), а на поверхні матеріалу — хвилі Релея, Стоунлі (як дві хвилі Релея), Лява та деякі інші. Але вимірювання параметрів цих хвиль і встановлення зв'язку цих параметрів з механічними властивостями матеріалів часто технічно здійснити дуже складно або навіть неможливо.

Основна мета статті — удосконалення засобів метрологічного забезпечення процесу визначення межі міцності за розриву σ_B акустичними методами із застосуванням нелінійних ефектів, зокрема, амплітудно-залежного внутрішнього тертя [1]. Для врахування багатьох чинників, що впливають на результат акустичного контролю, пропонується застосовувати планування експерименту [2, 3], зокрема, із використанням планів другого порядку.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Акустичний нелінійний контроль полягає у зондуванні виробів із конструкційних матеріалів пружною поздовжньою хвилею у виді пакетів пружних коливань із жорстко заданим співвідношенням амплітуд, оскільки витримати співвідношення між амплітудами пакетів пружних коливань технічно значно легше, ніж витримувати амплітуди кожного із пакетів окремо (рис. 1). Зондування (з метою усунення впливу відбиття акустичної хвилі) виконується в імпульсному режимі — тобто спочатку випромінюється більший пакет (спостерігається явище АЗВТ), потім менший пакет (явище АЗВТ відсутнє), потім знову більший пакет і так далі. У процесі досліджень

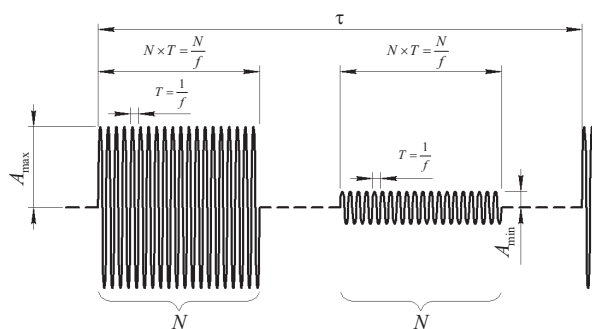


Рис. 1. Розподіл пакетів коливань у пружній хвилі

Рис. 1. Package of oscillations in elastic wave distribution

може виконуватися контроль певних матеріалів, зокрема латуней, на основі так званих «м'яких» полікристалічних металів, таких як мідь та цинк.

Наявність дислокацій в матеріалі, як відомо, визначає його міцнісні та пластичні властивості. Пластична деформація відбувається в результаті руху та розмноження дислокацій під впливом прикладеної механічної напруги. В об'ємі твердого тіла наявна мережа таких лінійних дефектів, що пересікаються та утворюють замкнені петлі або виходять на поверхню. Руху дислокацій перешкоджають точки закріплення (або області пересікання дислокаційних ліній, або комплекси точкових дефектів). У полікристалічних матеріалах протікають процеси виникнення «позитивних та «негативних» дислокацій, а також їх зникнення (анігіляції) в результаті притягування дислокацій із протилежними знаками. Особливо такі процеси протікають на границях зерен.

Міцність таких полікристалічних матеріалів визначається найбільш слабким із «елементів» таких матеріалів, а саме, границями їх зерен. Структура границь зерен дуже складна, тому границі зерен — важлива складова дефектної структури полікристалічних матеріалів. Особливо важливу роль границі зерен відіграють у процесах деформації й руйнування за підвищених механічних напруг і температур. За таких умов макроскопічні властивості полікристалічних матеріалів виявляються залежними не лише від загальної протяжності границь зерен (від величини та кількості зерен), але й від мікроскопічних властивостей границь, а також від їх структурного стану [4, 5].

У процесі контролю вимірюють зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c та зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі (на основній гармоніці), оскільки фазова швидкість c та коефіцієнт поглинання K — амплітудно-залежні, й для кожного із пакетів пружних коливань (тобто для більшого і меншого) вони відрізняються між собою [6, 7]. Така акустична нелінійність (яку часто називають структурною) полікристалічних матеріалів пов'язана, як показано вище, із наявністю в них як точкових дефектів (насамперед, атомів домішок у кристалічній ґратці), так і лінійних дефектів (насамперед, крайових, гвинтових та змішаних дислокацій).

У процесі контролю міцності вимірюються як параметри матеріалу, що контролюються (наприклад, межа міцності за розриву σ_B та температура T), так і параметри зондувальної акустичної хвилі (наприклад, амплітуда відносної деформації ϵ_m та зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c або $\Delta K/K$ коефіцієнта

поглинання K). Для опрацювання результату вимірювання застосовують багатфакторний експеримент. У такий спосіб є можливість створювати метрологічний «паспорт» певного виробу, який на основі $\Delta c/c$ або $\Delta K/K$ дозволяє визначати межу міцності за розриву σ_B і отже контролювати її з певним рівнем достовірності.

Як показали результати застосування багатфакторного експерименту, він дає можливість створювати адекватні (за F -критерієм) моделі, які пов'язують між собою міцнісні характеристики полікристалічних матеріалів (з одного боку) та параметри акустичної хвилі (з іншого) [2, 3]. Але, як показали результати подальших досліджень, зокрема, досліджень сплавів міді з цинком (латуней), достатньо часто у всьому діапазоні зміни вхідних (σ_B , ϵ_m , T) і вихідних ($\Delta c/c$ або $\Delta K/K$) параметрів створені моделі стають неадекватними. Одна із причин цього — те, що за створення таких моделей застосовували лише плани першого порядку і, відповідно, лише лінійну або неповну квадратичну взаємодію між вхідними факторами.

Тому пропонується за опрацювання даних застосовувати багатфакторний експеримент із планами другого порядку. Зокрема, пропонується застосовувати квадратичну модель, що має загальний вид:

$$Y = a_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} a_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} a_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} a_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де Y — функція відгуку ($\Delta c/c$ або $\Delta K/K$); a_i , a_{ij} , a_{ii} — коефіцієнти плану другого порядку; x_i , x_j — кодовані вхідні фактори (σ_B , ϵ_m та T).

Після створення такої моделі виконують перетворення рівняння у такий спосіб, щоб отримати в явному виді залежність $\sigma_B = f(\Delta c/c, \epsilon_m, T)$ або $\sigma_B = f(\Delta K/K, \epsilon_m, T)$.

Наприклад, якщо кількість k кодованих вхідних факторів дорівнює 3, то модель може мати у своєму складі максимум

$$C_{k+2}^k \Big|_{k=4} = \frac{(k+2)!}{k!2!} \Big|_{k=4} = \frac{5!}{3!2!} = 10 \quad (2)$$

коефіцієнтів плану другого порядку. Відповідно до цього кількість дослідів повинна також бути не меншою 10, причому кожний із вхідних факторів потрібно варіювати не менше ніж на трьох рівнях (а також, за необхідності, кілька раз дублювати у кожній точці плану).

Розрахунок коефіцієнтів рівняння виконують, у загальному випадку, методом найменших квадратів згідно з формулою:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

де A — матриця коефіцієнтів плану другого поряд-

ку; X — матриця планування; Y — цільова функція ($\Delta c/c$ або $\Delta K/K$).

Для реалізації матриці планування X оптимальним є застосування симетричних композиційних ортогональних планів, тобто, коли всі досліді розташовують симетрично відносно центра (основного рівня плану), а лінійний план добудовують до плану другого порядку шляхом застосування певної кількості спеціальним чином розташованих «зіркових» точок. Основна перевага ортогональності плану — те, що всі коефіцієнти моделі можна оцінювати незалежно один від одного.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Запропоновані моделі застосовували для акустичного нелінійного контролю виробів із латуні. Досліджували багатокомпонентні деформовувані латуні таких різновидів: Л060-1, Л062-1, Л070-1, Л090-1. Зокрема, для олов'янистої латуні ЛС60-1 обрали основний рівень (центр плану) фактору X_1 в натуральному масштабі $\sigma_B = 550 \text{ МПа}$ за інтервалу варіювання 100 МПа , фактору X_2 — $\epsilon_m = 0,50 \cdot 10^{-5}$ за інтервалу варіювання $0,25 \cdot 10^{-5}$, фактору X_3 — $T = +50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ за інтервалу варіювання $30,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Загальну кількість N дослідів (без урахування дублювання) визначали за формулою:

$$N = 2^k + 2k + n_{\text{ц}} = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (4)$$

де 2^k — кількість дослідів у ядрі плану (повний факторний експеримент); $2k$ — кількість дослідів у «зіркових» точках; $n_{\text{ц}}$ — кількість дослідів в центрі плану, $n_{\text{я}} = 1$.

Властивість симетричних композиційних планів, як відомо, суттєво залежить від значення α «зіркового» плеча та кількості $n_{\text{ц}}$ дослідів у центрі плану. Зокрема, для досягнення ортогональності таких планів необхідне виконання умови

$$(2^k + 2k + n_{\text{ц}}) 2^k = (2^k + 2\alpha^2)^2, \quad (5)$$

звідки

$$\alpha^2 = \sqrt{\frac{(2^k + 2k + n_{\text{ц}}) 2^k - 2^k}{2}} = \sqrt{\frac{(2^3 + 2 \cdot 3 + 1) \cdot 2^3 - 2^3}{2}} = \pm 1,215. \quad (6)$$


Отже, ядро плану доповнювали «зірковими» точками $\sigma_B = 428,5 \text{ МПа}$ і $\sigma_B = 671,5 \text{ МПа}$ для фактору X_1 , $\epsilon_m = 0,20 \cdot 10^{-5}$ і $\epsilon_m = 0,80 \cdot 10^{-5}$ для фактору X_2 , $T = +13,5 \text{ }^\circ\text{C}$ і $T = +86,5 \text{ }^\circ\text{C}$ для фактору X_3 .

Маючи всі необхідні вхідні фактори, створювали кілька планів другого порядку, які відрізнялися один від одного кількістю дублювань дослідів у кожній точці плану (від 1 до 3). Перевірка лінійних частин рівняння (тобто без складових $\sum_{1 \leq i \leq j \leq k} a_{ij} x_i x_j$ та $\sum_{1 \leq i \leq k} a_{ii} x_i^2$)

та неповних квадратичних частин рівняння (тобто без складової $\sum_{1 \leq i \leq k} a_{ii} x_i^2$) за F -критерієм показала, що вони неадекватні. Навпаки, урахування дослідів у «зіркових» точках та в центрі плану показало адекватність за F -критерієм отриманих планів другого порядку.

З метою подальшого підвищення адекватності отриманих моделей можна рекомендувати застосування симетричних композиційних рототабельних планів другого порядку, які передбачають значення функції відгуку Y з однаковою дисперсією у всіх точках факторного простору, які містяться на однаковій відстані від центра плану.

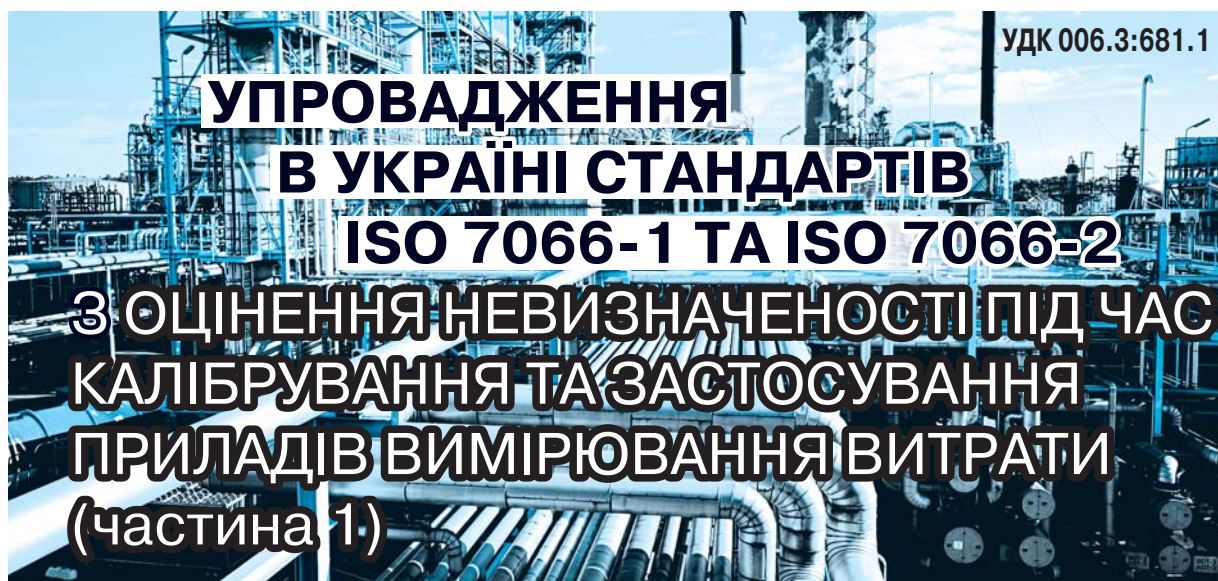
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Назаров В.Е. Волновые процессы в поликристаллах с дислокационной диссипативной и реактивной нелинейностью / В.Е. Назаров // Акустический журнал (Nazarov, V.E. Volnovyye protsessy v polikristallakh s dislokatsionnoy dissipativnoy i reaktivnoy nelineynostyu [Wave processes in polycrystalline samples with dislocation dissipative and reactive nonlinearity]. Acoustic journal). — 2008. — Т. 54. — № 2. — С/Р. 283—290.
2. Лісовець С.М. Оптимізація акустичного контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів методами планування експериментів / С.М. Лісовець // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну (Lisovets, S.N. Optimizatsiya akustichnogo kontrolya strukturno-neodnorodnih polikristalichnih materialiv metodami planuvannya eksperimentiv [Optimization of acoustic control of structural-heterogeneous polycrystalline materials by methods of experiments planning]. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design). — 2013. — № 3 (71). — С/Р. 34—40.
3. Лісовець С.М. Акустичний контроль матеріалів із неоднорідною структурою методами нелінійної акустики / С.М. Лісовець // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки» (Lisovets, S.N. Akustichniy kontrol materialiv iz neodnorodnoyu strukturoyu metodami nelineynoyi akustiki [Acoustic testing of materials with heterogeneous structure by methods of nonlinear acoustics]. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design). — № 1 (82). — 2015. — С/Р. 110—116.
4. Зименков С.В. Диссипативная акустическая нелинейность меди / С.В. Зименков, В.Е. Назаров // Физика металлов и металловедение (Zimenkov, S.V., & Nazarov, V.E. Dissipativnaya akusticheskaya nelineynost medi [Dissipative acoustic nonlinearity of copper]. Physics of metals and metallography). — 1992. — № 3. — С/Р. 62—65.
5. Назаров В.Е. Об амплитудной зависимости внутреннего трения цинка / В.Е. Назаров // Акустический журнал (Nazarov, V.E. Ob amplitudnoy zavisimosti vnutrennego treniya tsinka [About the amplitude dependence of internal friction of zinc]. Acoustic journal). — 2000. — Т. 46. — № 2. — С/Р. 228—233.
6. Патент № 34594 А. Україна. МПК G01H 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07. Спосіб визначення залежності швидкості розповсюдження акустичних коливань від їх інтенсивності і пристрій для його здійснення. — Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. — № 98052678; Заявл. 22.05.1998; Опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2 (Skrpnik, U.O., & Lisovets, S.N. (1998). Ukraine Patent № 34594 A).
7. Патент № 57892. Україна. МПК G01F 23/28. Пристрій для вимірювання нелінійності акустичних характеристик матеріалів. — Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. — № u201013422; Заявл. 11.11.2010; Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5 (Skrpnik, U.O., & Lisovets, S.N. (2010). Ukraine Patent № u201013422).
8. Зенкін А.С. Основы метрологического обеспечения / А.С. Зенкін, В.П. Куценко, Г.І. Хімичева, М.Ф. Трегубов. — Донецьк: ІПШІ «Наука і освіта» (Zenkin, A.S., Kutsenko, V.P., Himicheva, A.I., & Tregubov, N.F. Osnovi metrologichnogo zabezpechennya [Fundamentals of metrological support]. Donetsk: Institute of problems of artificial intelligence «Science and education» [in Ukraine]), 2014. — 324 с/р.
9. Метрологія: теорія і нормативне забезпечення: [навчальний посібник] / Волков О.І., Величко О.М., Хімичева Г.І. та ін.; за заг. ред. А.С. Зенкіна. — К.: Вища школа (Volkov, O.I., Velichko, O.N., Himicheva, A.I., & Zenkin, A.S. Metrologiya: teoriya i normativne zabezpechennya [Metrology: theory and regulatory support]. Kiev: High school [in Ukraine]), 2008. — 335 с/р.
10. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія та практика: [посібник] / Хімичева Г.І., Величко О.М., Іванченко О.В. та ін. — К.: Основа (Himicheva, A.I., Velichko, O.N., & Ivanchenko, A.V. Informatsiyini ta vimiryuvalni sistemi: teoriya ta praktika [Information and measurement systems: theory and practice]. Kiev: The basis [in Ukraine]), 2006. — 448 с/р.
11. Волков А.І. Інформаційні вимірювальні системи: [навчальний посібник] / Волков О.І., Зенкін А.С., Хімичева Г.І. — К.: Наукова думка (Volkov, O.I., Zenkin, A.S., & Himicheva, A.I. Informatsiyini vimiryuvalni sistemi [Information measurement systems]. Kiev: Scientific thought [in Ukraine]), 2005. — 327 с/р. 

Отримано / received: 03.12.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Н.М. Зашчепкіною (Україна).

Prof. N.M. Zashchepkina, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



УДК 006.3:681.1

УПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ СТАНДАРТІВ ISO 7066-1 ТА ISO 7066-2 З ОЦІНЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПРИЛАДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ (частина 1)

Н. Косач, доктор технічних наук, професор кафедри «Авіаційні прилади та вимірювання»,
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків,

В. Большаков, доктор технічних наук, віце-президент Академії метрології України, м. Харків

Розглянуто ключові моменти впровадження в Україні стандартів ISO 7066-1 та ISO 7066-2, а також подано роз'яснення щодо їх застосування.

The paper reviewed the key points of implementation in Ukraine of ISO 7066-1 and ISO 7066-2, as well as an explanation of their use.

Ключові слова: невизначеність, калібрувальна характеристика, вимірювання витрати, похибка вимірювання, витратомір.
Keywords: uncertainty, calibration factor, flow measurement, measurement error, the flowmeter.

Останніми роками, як відомо, все більша увага приділяється саме калібруванню засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), зокрема, приладів вимірювання витрати (витратомірів) речовин, будь-то рідини, включаючи нафту та нафтопродукти, або газу, включаючи зріджений та природний. Тому доречно виникають питання щодо точності та достовірності нормування калібрувальних характеристик витратомірів, оцінки невизначеності, пов'язаної з цими калібруваннями, а також правильності й однозначності застосування алгоритму оцінювання невизначеності, яка виникає як у вимірах, отриманих з використанням узагальненої характеристики, так і для обчислення невизначеності середнього від кількості вимірів тієї самої витрати [1, 2].

Як правило, не всі ЗВТ витрати мають лінійні калібрувальні характеристики, що, однак, не обмежує їх застосування у певних галузях, але вимагає деяких інших підходів за оцінювання невизначеності, яка виникає у вимірах [3].

Ураховуючи зазначене, для узагальнення алгоритму оцінювання невизначеності, який би враховував особливості процедури калібрування ЗВТ витрати, розроблено відповідні міжнародні стандарти ISO/TR 7066-1 та ISO 7066-2, впроваджені в Україні як ДСТУ ISO/TR 7066-1:2007 «Оцінювання невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати. Частина 1. Лінійні калібрувальні характеристики» та ДСТУ ISO 7066-2:2007 «Оцінювання невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати. Частина 2. Нелінійні калібрувальні характеристики», чинні в Україні з 01.01.2009. На жаль, вони не мають належного застосування, хоча виключно конструктивні, й їхнє застосування актуальне за гармонізованого підходу і подання результатів вимірювання.

У цьому зв'язку зупинимося більш детально на принципах оцінювання невизначеності під час калібрування та застосування засобів вимірювання витрати, які мають лінійні калібрувальні характеристики. Засоби вимірювання витрати, які мають нелінійні калібрувальні характеристики розглядатимуться у наступній публікації.

У стандарті ДСТУ ISO/TR 7066-1:2007 розглядаються лише лінійні залежності, тому він застосовується виключно для тих приладів витрати, які мають лінійні калібрувальні



Н. Косач



В. Большаков

характеристики, тобто, якщо залежності між двома змінними або лінійні, або одну чи обидві змінні можна перетворити у такий спосіб, щоби створити лінійні залежності між ними, як, наприклад, за допомогою логарифмів, чи повний діапазон можна розділити у такий спосіб, що в межах кожного піддіапазону залежності між двома змінними можна було б уважати лінійними, та якщо систематичні відхилення від апроксимованої характеристики незначні порівняно з невизначеністю, пов'язаною з окремими спостереженнями, що формують характеристику.

У більшості калібрувань, які підпадають під дію цього стандарту, залежності між змінними мають функціональний характер та визначаються деякою формою математичного виразу. Будь-який відхил спостережуваних значень від цієї залежності можна приписати похибкам вимірювання одного чи іншого виду, які можуть впливати на одну чи обидві змінні, та які можуть бути чи випадковими, чи систематичними або комбінацією цих двох складників [4].

Призначення процедури калібрування ЗВТ витрати подвійне: з однієї сторони для визначення форми вихідної апроксимувальної математичної залежності, з іншої — для оцінювання невизначеності апроксимувальної прямої лінії:

$$y = a + bx, \quad (1)$$

де x — змінна з меншою похибкою; a та b — коефіцієнти апроксимувальної прямої, які необхідно визначити.

У стандарті ДСТУ ISO/TR 7066-1:2007 зазначено, що для визначення випадкових невизначеностей та границь систематичних похибок двох змінних немає ніяких альтернативних процедур, окрім наведених у стандарті ISO 5168, упроваджені в Україні як ДСТУ ISO 5168:2013 [5] і чинному з 01.07.2014.

Згідно з методикою, регламентованою у [5], перший крок в оцінюванні невизначеності під час калібрування ЗВТ витрати — підготування таблиці для кожної змінної із зазначенням різних джерел похибки. Вона повинна містити похибки будь-яких основних процедур вимірювання, які необхідно провести, та включати окремо випадкові та систематичні складники.

Багато провести попереднє оцінення, щоби встановити, чи є лінійна калібрувальна характеристика (1) адекватною та об'єктивною апроксимацією спостережуваних вимірів. Виконати це можна, застосовуючи методи Берксона або Бартлетта, як це описано в стандарті.

Особливий випадок виникає, коли змінна у в (1) — фактично стала та незалежна від x , тобто апроксимувальна пряма паралельна осі X . Для цього

го випадку також зазначені методи оцінення невизначеності.

Там, де попередні випробування показали, що калібрування найкраще апроксимуються деякою формою нелінійної залежності, необхідно розглянути можливість перетворення даних до лінійної форми, застосовуючи методи прямої лінеаризації, описані в ДСТУ ISO/TR 7066-1. Перевага такої дії полягає в тому, що апроксимація калібрувальної характеристики та визначення невизначеності тоді стають відносно нескладними процесами. У стандарті такі процедури прописано та наведено приклади застосування відповідних правил.

Для значень змінної величини, визначених прямими вимірюваннями, випадкову невизначеність отриманого значення під час вимірювання x можна визначити обчисленням експериментального середнього квадратичного відхилення від ряду n вимірів, за формулою:

$$s = \left[\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{або} \quad s = \left\{ \left[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right] / [n(n-1)] \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

Потім його підставляють у рівняння, яке визначає довірчі границі:

$$e_R(x) = ts(x) \quad (4)$$

де t — коефіцієнт Стюдента за відповідної довірчої ймовірності P .

У разі виконання зазначених обчислень (2), (3) потрібно пам'ятати, що отриманий результат може змінюватися залежно від величини u , за якої значення x вимірюють. Так само, невизначеність u , яку можна визначити шляхом підставлення u замість x у зазначені формули (2), (3), може також змінюватися залежно від величини x , за якою u вимірюють. Такі зміни становлять метод, що застосовуватиметься у наступній апроксимації калібрувальної характеристики. Істотно те, що оцінення невизначеності виконують за достатнього числа точок, щоби дати можливість точно оцінити будь-яку розширену задачу.

Там, де значення змінної величини отримані як сума або різниця кількох незалежних складників вимірювання, невизначеність отримують обчисленням загального середнього квадратичного відхи-

$$\text{лу за формулою: } s(x) = \left[\sum_{i=1}^n s(x_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

використовуючи заміну в рівнянні (4).

В інших випадках, де змінні отримані із більш складних функцій комплексних змінних або де елементи корельовані, загальний середній квадратичний відхил треба визначати, як наведено нижче.

Якщо загальна варіація базується на добутку або відношенні двох або більше складників варіацій, то необхідно застосовувати не просте комбінаторне рівняння (5), а більш складний вираз, пов'язаний зі стандартною похибкою загальної функції. Диференціали $(\partial X / \partial x_i)$, включені у рівняння, ідентичні у всіх відносинах коефіцієнтам впливу $(\theta = \partial R / \partial Y_i)$, які використовують в об'єднанні похибок елементів у ДСТУ ISO 5168.

Якщо $X = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, де f — будь-яка функція, то $VarX = (\partial X / \partial x_1)^2 Varx_1 + (\partial X / \partial x_2)^2 Varx_2 + \dots +$

$$+ \dots + (\partial X / \partial x_n)^2 Varx_n + 2\{[(\partial X / \partial x_1)(\partial X / \partial x_2)]Cov(x_1, x_2) + [(\partial X / \partial x_1)(\partial X / \partial x_3)]Cov(x_1, x_3) + [(\partial X / \partial x_{n-1})(\partial X / \partial x_n)]Cov(x_{n-1}, x_n)\}. \quad (6)$$

Якщо на члени рівняння (6), що мають більш високі диференціали, можна не зважати, а коваріації дорівнюють нулю, тобто змінні незалежні, то порядок рівняння (6) зменшується до першого.

Як приклад наведено рівняння витрати, що протікає через сегмент відкритого проточного каналу ЗВТ витрати: $Q_i = b_{c,i} d_i \bar{v}_i$, (7) де b_c , d і v — залежні змінні.

$$\begin{aligned} \text{Використовуючи I порядок рівняння (6), маємо} \\ VarQ_i = (\partial Q_i / \partial b_{c,i})^2 Varb_{c,i} + (\partial Q_i / \partial d_i)^2 Vard_i + \\ + (\partial Q_i / \partial \bar{v}_i)^2 Var\bar{v}_i = \\ = (d_i \bar{v}_i)^2 Varb_{c,i} + (b_{c,i} \bar{v}_i)^2 Vard_i + (b_{c,i} d_i)^2 Var\bar{v}_i. \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді невизначеність можна знову отримати, заміною у рівнянні (4).

Оцінення систематичної похибки, яке трохи складніше, також описано в ДСТУ ISO 5168 [5]. Навіть, коли всі відомі джерела визначено та враховано, там усе ще залишатиметься деяка кількість невизначених похибок. У цих випадках будь-яка оцінка залежатиме від суб'єктивного судження, заснованого на такому доказі, як, наприклад, минулі калібрування, попередня хронологія тощо.

Там, де змінну величину визначають як суму елементарних складників, можуть виникнути певні труднощі за визначення систематичних похибок, внаслідок того, що в більшості випадків знаки складників невідомі. У цих випадках похибки треба об'єднати, використовуючи процедуру обчислення за формулою: $e_s = \left(\sum_{i=1}^n e_{s,i}^2 \right)^{1/2}$. (9)

Процес оцінення вважають повним, якщо всі джерела похибки визначені та оцінені й однократні вимірювання об'єднані, щоби дати повну оцінку випадкової похибки та границь систематичних похибок кожної змінної.

Бажано провести попереднє оцінення, аби встановити, що лінійність калібрувальної характеристики забезпечена адекватною та об'єктивною апроксимацією спостережуваних вимірів.

Із доступних методів найбільш ефективні ті, які ґрунтуються на візуальному вивченні відхилів вимірів від апроксимувальної лінії. Останню можна отримати, застосовуючи метод Бартлетта, як це описано нижче.

1) Перший крок: дані треба розташовувати в порядку зростання у напрямку або x , або y , а середні значення цих двох змінних визначають із рівнянь:

$$\bar{x} = \sum x_i / n; \quad \bar{y} = \sum y_i / n. \quad (10)$$

2) Потім дані треба розділити на три рівні й взаємно виключні інтервали, а середні значення двох кінцевих груп розраховують, як і раніше. Позначаючи їх через \bar{x}_1, \bar{y}_1 та \bar{x}_3, \bar{y}_3 , відповідно, нахил b апроксимувальної лінії можна визначити як

$$b = (\bar{y}_3 - \bar{y}_1) / (\bar{x}_3 - \bar{x}_1). \quad (11)$$

3) Якщо лінія пройшла через загальні середні значення \bar{x}, \bar{y} , рівняння характеристики можна отримати із рівняння:

$$(y_i - \bar{y}) = b(x_i - \bar{x}) \quad (12)$$

або із заміною $\bar{y} - b\bar{x} = a$

$$\hat{y}_i = a + bx_i. \quad (13)$$

4) Відхили можна визначити за формулою:

$$\Delta(y_i) = (y_i - \hat{y}_i) = (y_i - a - bx_i). \quad (14)$$

Альтернативно до наведеної вище процедури більш точну апроксимацію можна отримати за методом найменших квадратів із залишками, які розраховують за рівнянням (14).

Як і для попереднього оцінення, отримані у такий спосіб відхили треба розташувати у порядку зростання та нанести на графік сукупну характеристику частих повторювань, усереднену за ймовірністю. Якщо точки лежать на приблизно прямій лінії без будь-якого очевидного загального скривлення, то можна вважати, що дані приблизно нормально розподілені.

На цій стадії необхідно почати аналіз можливості дослідження будь-яких винятково більших або менших залишків, оскільки їх виникнення може серйозно вплинути на розташування остаточної апроксимувальної лінії й відповідно збільшити невизначеність. Допомогає у визначенні таких «викидів» використання результатів випробування Груба, як це описано в додатку Е ДСТУ ISO 5168 [5]. Однак, необхідно підкреслити, що навіть там, де результат випробування позитивний, рішення відхилити спостережений результат завжди треба приймати на обґрунтованих фізичних підставах після ретель-

ного вивчення всіх обставин. Для ухвалення рішення потрібно пам'ятати, що

- точка може бути справжньою, а залишок виникає через відсутність узгодженості моделі за спостереження;

- там, де результат спостереження відхилено, весь процес апроксимації та обчислення залишків треба повторити.

Інші випробування, які треба застосовувати, включають графічне зображення залишків (Δy) від спостережуваного значення незалежної змінної (x) і заявленого значення (\hat{y}). У кожному разі, якщо

- а) математична залежність адекватна;
- б) процес апроксимації правильно виконано;
- в) дисперсія суттєво не змінюється з x ,

точки повинні лежати в горизонтальній смугі однакової ширини (рис. 1 а)). Відхилення від ідеальної форми (рис. 1 а)) можуть включати таке:

- смуга формує чіткі висхідні або спадні криві (рис. 1 б)), допускаючи, що залежність нелінійна;

- розширення, що зростає, або звуження смуги, яка залишається горизонтальною (рис. 1 с)). Це означає, що дисперсія змінна в діапазоні вимірювання і що деяка форма процедури розширення потрібна для остаточної апроксимації. Альтернативою за розширення може бути можливість перетворення даних, щоб отримати однакову варіацію. Наприклад, якщо збільшується змінна x , то зображення $\lg y$ від x або $\lg y$ від $\lg x$ можуть дати однакову зміну в $\lg y$. Під час перетворення необхідно стежити, щоб калібрувальний графік залишився лінійним. Треба зазначити, що будь-яке перетворення змінних призводить до розширення даних, і може статися, що отримана калібрувальна характеристика трохи відрізнятиметься від оригіналу в разі використання неперетворених даних;

- смуга показує однакову прямолінійну висхідну або спадну тенденцію в її положенні (рис. 1 д)),

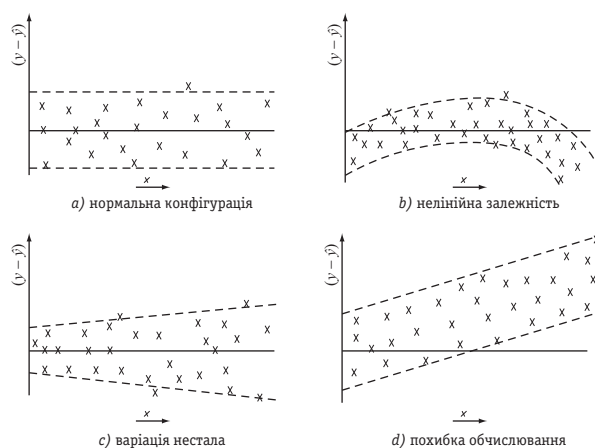


Рис. 1. Графік залишків ($y - \hat{y}$) від величин x

Fig. 1. The schedule ($y - \hat{y}$) of the residue of x

припускаючи наявність похибки безпосередньо за апроксимації або в наступному обчисленні y .

Там, де попередні випробування показали, що калібрування найкраще представлено деякою формою нелінійної залежності, необхідно розглянути можливість перетворення даних до лінійної форми. Перевага такої дії полягає в тому, що апроксимація калібрувальної характеристики та визначення невідзначеності тоді стають відносно нескладними процесами. Існує *дві процедури*.

Перша — включає фактичне перетворення даних, й її застосовують лише там, де залежність має чисто математичний характер. Для цієї категорії форма перетворення зазвичай визначається безпосередньо формою функції. Отже, для калібрування ЗВТ витрати, який застосовується у відкритому каналі, залежність між рівнем води та витратою виражене рівнянням: $Q = c(h + h_0)^b$, (15) де h — вимірюваний рівень води, m ; h_0 — початкова корегувальна величина, що позначає рівень води за нульової витрати, m ; c — коефіцієнт калібрування; b — показник ступеня, який характеризує конструктивне виконання засобу вимірювання витрати.

Простий спосіб написання цієї формули в логарифмічній формі: $\ln Q = \ln c + b \ln(h + h_0)$ (16) має ефект лінеаризації даних.

Друга — в інших випадках лінеаризація може бути можливою, якщо калібрувальну характеристику поділити на деяку кількість інтервалів, у кожному з яких її можна розглядати як лінійну. На відміну від описаного вище методу, ця процедура універсальна і не залежить від наявності функціональних залежностей між двома змінними. Для розв'язання цієї задачі має бути дотримано дві умови:

- * кожна ділянка характеристики, скрізь, де можливо, повинна ґрунтуватися на приблизно однаковій кількості спостережень, і, отже, дає приблизно той самий ступінь невизначеності, як і апроксимувальна характеристика;

- * для забезпечення гладкого переходу і уникнення неоднорідності кожна ділянка характеристики повинна мати дві або три загальні точки з будь-якими суміжними ділянками.

Після завершення процесу лінеаризації необхідно здійснити перевірку на лінійність.

Також у стандарті наведені процедури апроксимації оптимальною прямою і зваженою лініями, і коли y не залежить від x .

Випадкову невизначеність апроксимувальної характеристики в точці $x = x_k$ отримують із рівняння:

$$e_R(\hat{y}) = t_{SR} \left\{ (1/n) + \left[(x_k - \bar{x})^2 / \sum (x_i - \bar{x})^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (17)$$

при цьому невизначеність за однократного спостереження в точці $x = x_k$ можна визначити із рівняння:

$$e_R(y_k) = t_{s_R} \left\{ 1 + (1/n) + \left[(x_k - \bar{x})^2 / \sum (x_i - \bar{x})^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

Два значення істотно різні: $e_R(\hat{y})$ представляє невизначеність значення, розрахованого за рівнянням характеристики, тоді як $e_R(y_k)$ — невизначеність однократного вимірювання.

В обох рівняннях (17) і (18) інтервал невизначеності параболічної форми, з її найвужчою шириною в середньому значенні x . Ширина також залежатиме від рівня довірчої ймовірності та буде ширшою за довірчої ймовірності $P = 0,99$ ніж за $P = 0,95$.

Для закінчення аналізу границі систематичної похибки результатів калібрування оцінюють відповідно до принципів, викладених в ДСТУ ISO 5168. Через труднощі у визначенні знака та розміру таких похибок окремі складники треба об'єднати за методом середніх квадратів. Там, де значення змінної величини отримують як суму або різницю значень елементів (k), загальну границю систематичної похибки можна визначити із рівняння:

$$e_S = \left(\sum_{i=1}^k e_{S,i}^2 \right)^{1/2}. \quad (19)$$

Якщо значення змінної величини базуються на більш складних функціях типу добутку або частинної похідної, застосовують формули (6), з $e_{S,i}$, що замінює відповідні різниці.

Щодо випадкової невизначеності та систематичної похибки потрібно завжди повідомляти окремо. Там, де також потрібне окреме число, яке представляє комбіновану невизначеність, його визначають адитивним методом або методом квадратного кореня із суми квадратів відповідно до формули:

$$U_{ADD} = e_S + t_s \quad (20)$$

$$\text{або } U_{RSS} = \left[e_S^2 + (t_s)^2 \right]^{1/2}, \quad (21)$$

остання завжди забезпечує менше значення.

Отримані значення U_{ADD} або U_{RSS} не треба вважати за довірчий інтервал у строгому статистичному сенсі, оскільки границя систематичної похибки, за визначенням, заснована на суб'єктивному судженні.

Коефіцієнти калібрування та їх невизначеності, що отримують екстраполяцією калібрувальної лінії, можуть точно не відповідати описаним вище вимогам через вплив непередбачених чинників, які можуть позбавити результати законної сили. Однак, можуть виникати обставини, що вимагають оцінення витрати поза діапазоном калібрування, і в цих випадках необхідно застосовувати процедури, описані нижче.

На рис. 2 суцільною лінією представлено калібрувальний графік ЗВТ витрати в стані, визначеному межами x_1 і x_2 та пунктирною лінією продовження цього стану до необхідної точки x_3 . Також пунктирними лініями позначено границю невизначеності, яку екстраполюють до точки x_3 .

У випадку, коли на відкалібрований ЗВТ витрати поширюється будь-який міжнародний стандарт, у якому запропоновано значення витрати та невизначеності, а також забезпечені екстрапольовані значення у та їх границі невизначеності, які містяться у границях, визначених у міжнародному стандарті, як показано на рис. 2 а), застосовують екстрапольовані границі довірчого інтервалу.

Однак, якщо екстрапольовані границі містяться поза границями, передбаченими в міжнародному стандарті, як показано на рис. 2 б), то застосовують границі довірчого інтервалу, наведені в міжнародному стандарті.

Нарешті, якщо значення у міститься поза інтервалом, передбаченим в міжнародному стандарті, або якщо на ЗВТ витрати не поширюється цей міжнародний стандарт, то знову застосовують екстрапольовані границі довірчого інтервалу.

У випадку, коли для вимірювання витрати застосовують відкалібрований ЗВТ витрати, будь-яку невизначеність у положенні калібрувальної характеристики буде переміщено до розрахункового значення як систематичну похибку. У випадку, коли нахил лінії фактично нульовий і рівняння (15) призводить до постійного діапазону калібрування, невизначеність витрати

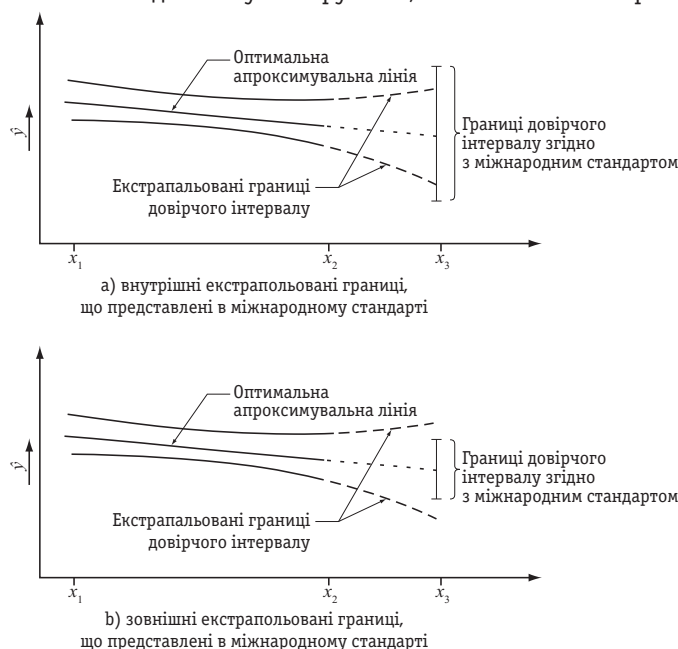


Рис. 2. Критерій границь довірчого інтервалу застосування методу
Fig. 2. Criteria limits of the confidence interval of the application of the method

завжди буде більшою, ніж за однією калібрувальною характеристикою. Це буде так, навіть коли умови вимірювання номінально ідентичні тим, які існують протягом процесу калібрування; розбіжність виникає через невизначеність у розташуванні місця положення, що використовуються на графіку калібрування.

Цю додаткову невизначеність, разом з будь-якими доданими внесками, які є результатом отримання і приведення даних, треба оцінити, застосовуючи процедури, наведені в ДСТУ ISO 5168, з випадковою невизначеністю та границями систематичної похибки, які визначають окремо та пізніше комбінують через U_{RSS} .

Загальну невизначеність вимірювання, позначену $U_{RSS}(\hat{y})$, обчислюють за формулою:

$$U_{RSS}(\hat{y}) = [U_{RSS}^2(\hat{y}_0) + U_{RSS}^2(\hat{y}_c)]^{1/2}, \quad (22)$$

де $U_{RSS}(\hat{y}_0)$ — загальна додаткова невизначеність; $U_{RSS}(\hat{y}_c)$ — загальна невизначеність калібрувальної характеристики.

Спосіб, у який додаткова невизначеність дає внесок до загальної невизначеності вимірювання витрати, залежатиме від характеру калібрувальної характеристики. Є дві головні умови, описані нижче.

1) Якщо нахил калібрувальної характеристики нульовий, то витрату отримати просто, помноживши деяку функцію вихідного сигналу ЗВТ витрати на коефіцієнт, який не залежить від витрати. Тому в цьому випадку немає додаткової невизначеності, рівняння (22) спрощується до

$$U_{RSS}(\hat{y}) = U_{RSS}(\hat{y}_c), \quad (23)$$

і невизначеність вимірювання витрати дорівнює невизначеності калібрувальної характеристики.

2) Якщо нахил калібрувальної характеристики ЗВТ витрати не дорівнює нулю, то коефіцієнтом калібруван-


ня стає функція витрати, і для оцінення витрати необхідна деяка форма повторюваного процесу. З цією метою використовують початкову оцінку коефіцієнта калібрування, щоб отримати перше наближення до витрати. Все це використовують для того, щоб отримати більш точне значення коефіцієнта калібрування. Тоді процес повторюють, поки послідовні оцінки витрати не стануть ідентичними. У цьому випадку будь-яка похибка вимірювання вихідного сигналу ЗВТ витрати призведе до похибки використовованого коефіцієнта, а повна невизначеність визначатиметься рівнянням (22).

Невизначеність і далі збільшуватиметься, якщо умови застосування відрізняються від тих, за яких виконано калібрування, наприклад, різні розташування, речовини, апаратура тощо, і, звичайно, у цих випадках необхідно оцінювати границі довірчого інтервалу для кожної ситуації, яка виникає.

У стандарті наведено основні приклади щодо опрацювання результатів калібрування ЗВТ витрати і оцінювання невизначеності вимірювань під час їх калібрування та застосування.

Наприкінці треба визначити основні переваги стандарту ДСТУ ISO/TR 7066-1: у ньому чітко прописано процедури оцінювання невизначеності під час калібрування та застосування ЗВТ витрати. При цьому процес оцінювання невизначеності вважають повним, якщо всі джерела похибки визначені та оцінені й однократні вимірювання об'єднані, щоби дати повну оцінку випадкової похибки та границь систематичних похибок кожної змінної. Окрім того, методи, рекомендовані у цьому стандарті, гармонізовані з європейськими, й їх кваліфіковане застосування — гарантія легітимності результатів калібрування різних ЗВТ витрати.

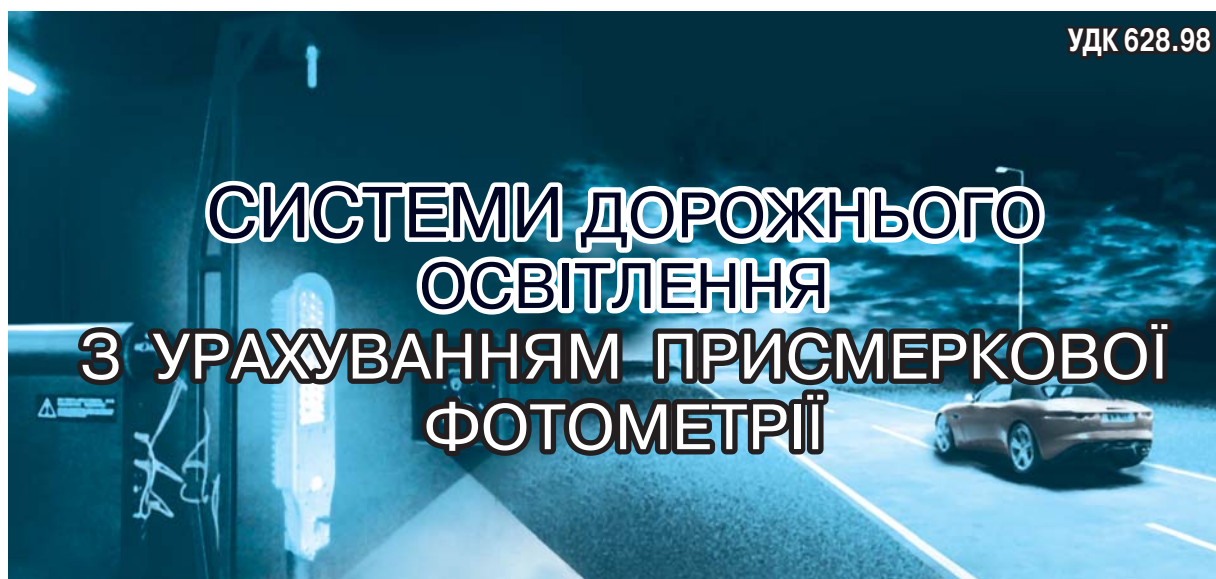
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement // September, 2008. — 134 p.
2. Косач Н.І. Впровадження в Україні стандартів ISO 7066-1 і ISO 7066-2 з оцінення невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати [Текст] // ВКДТС — 2015: III Міжн. наук. конф.: зб. тез допов., 27—29 жовт. / Вінницький нац. техн. ун-т. (Kosach N.I. Implementation in Ukraine standards ISO 7066-1 and ISO 7066-2 evaluation of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices // VKDTS — 2015: III International. Science. Conf.: Coll. abstracts reported on Oct 27—29. / Vinnitsa Th. Sc. Univ), 2015. — С/Р. 17—18.
3. Большаков В.Б., Косач Н.І. Особливості калібрування ЗВТ витрати [Текст] // Метрологія та прилади (Bolshakov V.B., Kosach N.I. Features calibration of flow measurement // Metrology and instruments). — 2014. — № 2. — С/Р. 18—23.
4. EA-4/02 M: 2013 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. — September, 2013 rev 02. — 75 p.
5. ДСТУ ISO 5168:2013 Вимірювання витрати плинного середовища. Методики оцінювання невизначеності (ISO 5168:2005, IDT) [Текст]. — Чинний від 01.07.2014 р. — Київ: Держспоживстандарт України (DSTU ISO 5168:2013 Measurement of fluid flow. Procedures for the evaluation of uncertainties (ISO 5168:2005, IDT). — Effective as of 01.07.2014. — Kyiv: Derzhspozhivstandart of Ukraine), 2013. — 55 с/р. 

Отримано / received: 14.12.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Є. Сердюком (Україна).
Prof. O.E. Seredjuk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 628.98



СИСТЕМИ ДОРОЖНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ПРИСМЕРКОВОЇ ФОТОМЕТРІЇ

Л. Назаренко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри світлотехніки та джерел світла,
Т. Можаровська, аспірант кафедри,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (ХНУМГ ім. О.М. Бекетова)

Описано нову метрику для використання як інструмент у процесі вибору світильників для додатків дорожнього та вуличного освітлення, а також для оцінювання та порівняння світильників з різними технічними характеристиками. Розглянуто на прикладі застосування такої метрики. Показано сумісність метрики з присмерковою системою фотометрії. Цей документ зацікавить виробників джерел світла, проектувальників дорожнього та вуличного освітлення, менеджерів з продажу світильників.

Street lighting is the result of consideration many purposes, including providing the necessary levels of illumination uniformity and contrast target depending on the road, and visual lighting needs taking into account mesopic ranges. But a functional lighting system based not only on lighting criteria,

but also on less electricity consumption with the lowest possible maintenance costs. Application efficacy was defined by Rea and Bullough (2001) as the average luminous flux within a specific solid angle per unit of power. The proposed metric describes the energy efficiency of street lighting systems and is very easy to use. She is well applicable for the new system of mesopic photometry.

In the paper the new metric to be used as a tool in the selection process for lighting applications Road and street lighting as well as a tool for evaluation and comparison of lamps with different characteristics are described. The example of the use of metric has been considered. Compatibility of metric with the new system of mesopic photometry has been shown. The suggested audience for this document is luminaire manufacturers, street lighting designers and specifiers, and luminaire purchase decision-makers.

Ключові слова: LSAE, присмеркова фотометрія, дорожнє освітлення, S/P коефіцієнт.

Keywords: LSAE, mesopic photometry, road lighting, S/P ratio.

Добре продумане, фіксоване освітлення вулиць і шосе — цінне інвестування в інфраструктуру, оскільки воно може забезпечити соціальні та економічні вигоди для суспільства [2]. Створення функціональної системи освітлення вулиць — результат ретельного розгляду багатьох цілей, які включають надання допомоги у виконанні візуальних завдань водіям та пішоходам, енергозощадження, екологічну інтеграцію, мінімізацію ризиків на дорогах і допомогу у виявленні потенційних перешкод на шляху водіїв. З точки зору освітлення установки вуличного і дорожнього освітлення повинні забезпечувати достатні рівні освітленості, рівномірності та цільового контрасту, залежно від типу дороги, і брати до уваги візуальні потреби освітлення в мезопічних умовах. Найбільш поширені візуальні потреби водіїв та пішоходів включають виявлення, розпізнавання, сприйняття руху; сприйняття об'єктів відповідно, наприклад, до їх форми або кольору; сприйняття зв'язків між нерухомими і рухомими об'єктами як у безпосередньому полі зору, так і на периферії [3]. Не менш важливо звести до мінімуму відблиски (прямі й відбиті) та світлове забруднення, зробити видимість просторів привабливою. При цьому вартість самої установки повинна бути низькою, за можливості споживання якомога меншої кількості електроенергії, мати мінімальну потребу в обслуговуванні для максимального скорочення загальної вартості установки. Отже, ефективність системи освітлення повинна оцінювати світлову ефективність джерела світла або світильника, а також



Л. Назаренко



Т. Можаровська

визначатися тим, наскільки добре виконані цілі освітлення, за розгляду показників потужності й витрат, необхідних для їх досягнення.

Існує ряд найбільш поширених стандартів і рекомендацій для досягнення цілей вуличного освітлення: ANSI/IES American National Standard Practice for Roadway Lighting, RP-08-00 [4]; BSI Road lighting. Performance requirements, BS EN 13201-2:2003 [5]; and CIE Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic, CIE-115-2010 [6].

Нааявні вже традиційні показники, що використовуються для характеристики джерел світла і світильників у зовнішньому освітленні, які включають світлову ефективність (лм/Вт), коефіцієнт використання (CU; [2]), оцінку світлової ефективності (LER; [7]) та цільову оцінку ефективності (TER; [8]). Проте, жоден із цих показників не пояснює, чи були дотримані цільові фотометричні вимоги для конкретного застосування.

Для забезпечення вирішення ASSIST розробив метрику [9], яка співвідносить здатність світильника, або системи з декількох світильників, задовольнити фотометричні потреби конкретних додатків. Метрика Luminaire System Application Efficacy (LSAE), яка ґрунтується на концепції ефективності додатків, розроблена, щоби оцінити доставку світла туди, де воно необхідне, найбільш енергетично ефективним способом.

Rea и Bullough (2001) визначили ефективність додатків як відношення середнього світлового потоку в певному тілесному куті на одиницю потужності. Метрика LSAE включає лише світловий потік, який падає на задану площину, $\Phi_{\text{площини задачі}}$ і який відповідає фотометричним вимогам завдань додатку. Потрібно зазначити, що ця метрика спочатку розроблена і затверджена для систем освітлення стоянок, а різні аналізи показали, що LSAE є хорошим показником енергоефективності, за використання як окремих світильників/груп світильників,

так і повної освітлювальної системи [10]. Тобто, ця метрика показує можливість порівняння технологічно відмінних за джерелами світла світильників для додатків типових дорожніх і вуличних установок освітлення. LSAE базується на [4], що включає освітленість, коефіцієнт однорідності освітлення і відблиски. Варто підкреслити, що метрика LSAE не передбачається як повна заміна для аналізу систем освітлення: інші фактори (доступність, вартість, спектральний розподіл енергії, цикл життя тощо) можуть впливати на вибір варіантів джерел світла і світильників.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТТЯ ПРОПОНОВАНОЇ МЕТРИКИ

LSAE визначається як відношення світлового потоку ($\Phi_{\text{площини задачі}}$, в одиницях «люмен»), який падає на площину задачі, що відповідає фотометричним вимогам площини задачі, до загальної вхідної електричної потужності (P , в одиницях «ватт»):

$$\text{LSAE} = \Phi_{\text{площини задачі}} / P. \quad (1)$$

Важливо, що ті світильники, які «втрачають» світло за межі площини задачі у результаті виключення падаючого світлового потоку за площину задачі у рівнянні, повинні штрафуватися, як і ті світильники, які не забезпечують достатні рівні освітленості всій площині задачі у результаті недостатнього рівня світового потоку всередині площини задачі.

Такий підхід призводить до більш «цільових» оціночних систем, які порівнюють світильники за їх ефективністю надання світла для конкретного застосування.

ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩИНИ ЗАДАЧ

Площина задачі для проїжджої частини визначається LSAE як область на проїжджій частині між одним циклом світильників. X -розмірність площини задачі — це дистанція між світильниками в одному циклі й функція розподілу інтенсивності світильників,

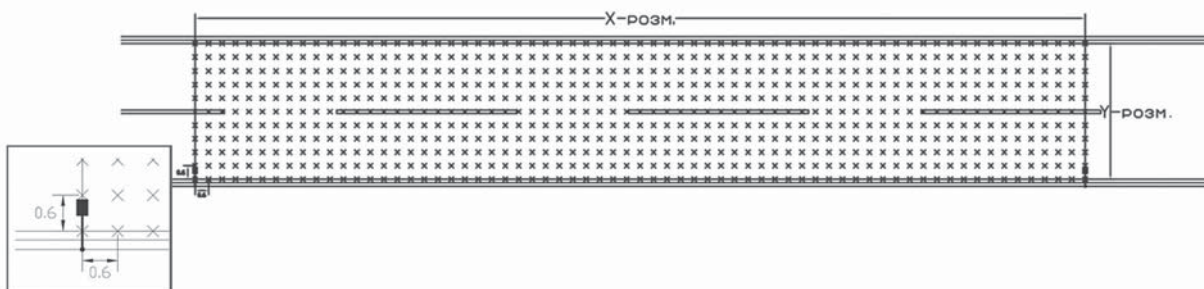


Рис.1. Площина задач на основі одного циклу з використанням одностороннього порядку світильників.

Розрахункова сітка для одного циклу світильників

Fig. 1. Task plane based on the one luminaire cycle using unilaterally arranged luminaires. Calculation grid created for one luminaire cycle

висота установки, розмір звісу світильника, тротуарна класифікація, вуличне розташування, оскільки ці змінні визначають максимальну відстань між стовпами відповідно до RP-08-00. У-розмірність площини задач — це дорожній шлях, який охоплює дорожні лінії на проїжджій частині, але не узбіччя. На рис. 1 подано приклад односторонньої компоновки і зазначені розміри X , Y площини задач.

Для всіх етапів розрахунку LSAE проїжджої частини рекомендується використання комп'ютерних програм, що оптимізують полюсний інтервал для певного набору конкретних умов (наприклад, розподілу інтенсивності світильника, висоти монтажу, розміру звісу світильника, ширини проїжджої частини і типу схеми).

ДІАПАЗОН ЗНАЧЕНЬ ОСВІТЛЕНOSTІ

Для розрахунку значень LSAE використовують публікацію RP-08-00, яка дозволяє обрати як спосіб конструкції системи освітлення критерій освітленості або яскравості. Для прикладу розглянуто критерії проектування на основі освітленості. RP-08-00 рекомендує мінімальне номінальне середнє значення горизонтальної освітленості, яке залежить від типу дороги, зони пішохідного конфлікту і класифікації дорожнього покриття. Можливі комбінації трьох змінних дають 42 підтримувані середні критерії освітленості (табл. 1). У кожній із шести дорожніх класифікацій існує це співвідношен-

ня рівномірності освітленості як середнє значення до мінімального. Так, наприклад, для колекторної дороги (Collector) з середнім конфліктом пішоходів (Medium, від 11 до 100 пішоходів протягом години), що має асфальтне покриття «R3» (характерно 7 відсотків відбиття), рекомендується підтримувати середнє мінімальне значення горизонтальної освітленості 9 лк і відношення рівномірності середнього значення до мінімального 4,0, з якого розраховано мінімальне номінальне горизонтальне значення $E_{\min} = 2,3 \text{ лк}$ ($9 \text{ лк} \div 4$).

Потрібно звернути увагу, що максимальне номінальне значення горизонтальної освітленості не наведено у RP-08-00. Метод розрахунку LSAE використовує середній критерій освітленості й рівномірність (як відношення середнього значення до мінімального) як основу для визначення ефективності світильника для обраних умов. Отже, оскільки підтримуване середнє значення задано, метод розрахунку LSAE вважає марнотратним будь-яку частину світлового потоку світильника, яка призводить до більшого або меншого значення, ніж рекомендовано. Важливо підкреслити, що світловий фактор втрати повинен бути включений до розрахунків як критерій освітлення проїжджої частини на основі підтримуваних значень (тобто, найнижчий рівень освітлення на проїжджій частині в кінці терміну служби системи).

Після того, як розміри площини задач визначе-

Таблиця 1. Рекомендації IESNA з підтримання середнього рівня горизонтальної освітленості (лк) для різних типів доріг, тротуарів і для пішохідних умов [4]

Table 1. IESNA recommended maintained average horizontal illuminance levels (lx) for different types of roads, pavement, and pedestrian conditions [4]

Road and Pedestrian Conflict Area		Pavement Classification			Uniformity ratio	Veiling luminance ratio
Road	Pedestrian conflict area	R1	R2&R3	R4	$E_{\text{avg}}/E_{\text{min}}$	$L_{\text{vmax}}/L_{\text{avg}}$
Freeway Class A		6 lx	9 lx	8 lx	3.0	0.3
Freeway Class B		4 lx	6 lx	5 lx	3.0	0.3
Expressway	High	10 lx	14 lx	13 lx	3.0	0.3
	Medium	8 lx	12 lx	10 lx	3.0	0.3
	Low	6 lx	9 lx	8 lx	3.0	0.3
Major	High	12 lx	17 lx	15 lx	3.0	0.3
	Medium	9 lx	13 lx	11 lx	3.0	0.3
	Low	6 lx	9 lx	8 lx	3.0	0.3
Collector	High	8 lx	12 lx	10 lx	4.0	0.4
	Medium	6 lx	9 lx	8 lx	4.0	0.4
	Low	4 lx	6 lx	5 lx	4.0	0.4
Local	High	6 lx	9 lx	8 lx	6.0	0.4
	Medium	5 lx	7 lx	6 lx	6.0	0.4
	Low	3 lx	4 lx	4 lx	6.0	0.4

ні з урахуванням критерію проектування освітлення RP-08-00 (або освітленості, або яскравості), створюється розрахункова сітка 0,6 м × 0,6 м для одного циклу світильників (рис. 1) і розраховуються відповідні рівні освітленості.

Така сітка використовується для оцінювання світлового потоку, що потрапляє до кожної клітини сітки шляхом проведення простого розрахунку, заснованого на визначенні освітленості E , де E дорівнює світловому потоку Φ , поділеному на область падіння. Можна оцінити світловий потік $\Phi_{\text{комірки}}$, що надходить до кожної клітини, оскільки площа кожної комірки сітки відома ($S_{\text{комірки}} = (0,6 \times 0,6) \text{ м}^2 = 0,36 \text{ м}^2$) і освітленість в центрі кожної комірки сітки ($E_{\text{комірки}}$) визначена:

$$\Phi_{\text{комірки}} = E_{\text{комірки}} \cdot S_{\text{комірки}} = E_{\text{комірки}} \cdot 0,36. \quad (2)$$

Варто відзначити, що сітка освітленості 0,6 м × 0,6 м, рекомендована для розрахунку LSAE, щільніша, ніж сітка, зазначена в RP-08-00, що може призвести до значень освітленості ближче до лінії бордюру значно нижчим, ніж мінімально дозволених в RP-08-00. Проте ці значення освітленості не включаються до розрахунку «корисного» світлового потоку для LSAE (стосовно цього зазначено нижче).

ПОКАРАННЯ ЗА НЕВІДПОВІДНІСТЬ КЛІТИН

Як тільки значення освітленості у площині задач розраховано, наступний крок — визначення, які з цих значень не сприяють досягненню цільових показників освітленості й критеріїв рівномірності, оскільки вони занадто низькі або високі. Оскільки цільові показники освітленості в RP-08-00 описуються мінімальним (E_{\min}) і середнім (E_{avg}) значеннями, ці два значення використовуються для визначення того, які клітини повинні бути оштрафовані. По-перше, всі значення освітленості сортуються в порядку зростання. Для легкості визначення рекомендується скористатися експортуванням значень освітленості, отриманих за програмою для розрахунку освітлення, в електронну таблицю. По-друге, всі значення освітленості, нижчі від E_{\min} , оголошуються такими, що не відповідають вимогам, і виключаються з аналізу. По-третє, із набору значень освітленості, що залишилися (наприклад, тих, які дорівнюють або вищі за E_{\min}), середнє розраховується шляхом додавання одного значення для обчислення за раз, поки воно не стане рівним мінімальному номінальному середньому значенню освітленості, наведеному в RP-08-00. Як тільки мінімальна номінальна середня освітленість для певної проїжджої частини дороги зустрілася, всі інші показники освітленості в розрахунковій сітці більше не використовую-

ються для аналізу. Ці відкинуті значення прийнято вважати невідповідними, оскільки вони ефективно збільшують (підвищують) середню освітленість порівняно зі значенням, потрібним в RP-08-00, і, отже, їх можна вважати марнотратними. Нарешті, кожне значення освітленості, зараховане мінімальною середньою освітленістю, перетворюється у світловий потік, за використання рівняння (2), і розраховується лише «корисне» світло, що потрапляє на площину задач.

ВНЕСОК СУСІДНІХ СВІТИЛЬНИКІВ

У випадках, коли схема проїжджої частини освітлення не одностороння (наприклад, схема освітлення дворядна в шаховому порядку або дворядна прямокутна), «корисний» світловий потік, отриманий із відповідних кліток, повинен бути розділений навпіл, оскільки в кожному циклі світильника більше одного світильника сприяють напрямку світла до площини завдань.

СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ

Отже, процес оцінювання для LSAE можна розділити на чотири основні етапи:

1. отримання точного і репрезентативного вимірювання розподілу інтенсивності світильника під час оцінювання;
2. визначення розміру площини задач у процесі розрахунку максимальної полюсної відстані, на якій критерії освітлення задовольняються для заданого (бажаного) полюсного планування;
3. створення сітки на площині задач і обчислення значення освітленості в кожній точці;
4. розрахунок LSAE на основі відповідних значень освітленості та вхідної потужності світильника.

ВІДБЛИСКИ І СВІТЛОВЕ ЗАБРУДНЕННЯ. SST, SRI Й КОЛІРНОСТІ

Потрібно врахувати, що документ [4] безпосередньо не стосується відблисків і світлового забруднення. Додаткові інструменти інформації та оцінювання можуть бути знайдені в двох методах прогнозування світлового забруднення і відблисків від зовнішніх систем освітлення, які опублікував Lighting Research Center. Перший комплексний метод для прогнозування та вимірювання трьох аспектів світлового забруднення називається методом «Outdoor Site-Lighting Performance» [11]. Другий метод — кількісна модель для прогнозування дискомфортичних відблисків від установок зовнішнього освітлення «Outdoor Site-Lighting Performance method» [12,13].

Також існує звичайна практика повідомлення CCT, CRI й CIE X, Y значень лампи, передбачених заводом-виробником світильника або випробувальною лабораторією. Схвалений метод IESNA LM-79-08 передбачає для світлодіодних світильників перевірку фотометричних і колориметричних властивостей укомплектованого світильника з використанням абсолютного фотометричного методу [14].

ПРИСМЕРКОВА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ

Нещодавні дослідження того, як око «бачить» за мезопічних умов, і розвиток альтернативної, єдиної системи фотометрії підтримують можливість компромісу між світловим спектром джерела і рівнем освітленості для джерел світла зовнішнього застосування, що використовуються в нічний час [15]. ASSIST опублікував покрокові інструкції для розрахунку єдиної яскравості певного джерела світла на основі рівня освітленості та коефіцієнта S/P джерела світла [10]. S/P (scotopic/photopic) — це відношення світлового потоку для нічного зору до потоку для денного зору. Чим вищий цей коефіцієнт, тим ефективніше вплив джерела світла [3].

Пропонована система достатньо проста у виконанні. Це, по суті, система для вибору серед усіх доступних джерел світла оптимального для досягнення необхідного рівня освітленості не лише в фотопічному, а й в мезопічному діапазоні. Різні комбінації джерел світла та рівні освітленості можуть виробляти таку ж єдину яскра-

вість, яка означає фотометричну еквівалентність.

Отже, система може слугувати як простий метод для компромісу джерел світла та рівня освітленості за мезопічних умов і тим самим допомогти у виборі джерел світла для цього додатку.

В основі системи — вирішення трьох кроків:

I крок: визначання необхідного рівня освітленості з числа рівнів, рекомендованих стандартом RP-08-00.

Так, за табл. 1, обираючи колекторний шлях з середнім конфліктом пішоходів з типом дорожнього покриття R3, IESNA рекомендований рівень освітленості становить 9 лк.

II крок: вибір конкретного джерела світла для застосування у системі освітлення, що забезпечить необхідну кількість світла. Кожне джерело світла, незалежно від його технічних та фотометричних характеристик, можна характеризувати за допомогою коефіцієнта S/P. Для прикладу розглянуто вуличний світлодіодний світильник N1 (80 Вт) провідної світлотехнічної компанії України, та за його спектральною кривою за допомогою простих розрахунків у програмі MathCad знайдено S/P N1 = 0,78.

III крок: Із таблиці 2 [10] необхідно знайти перетин для обраного базового рівня світла та співвідношення S/P і визначити значення єдиної яскравості. Відзначимо, що базові рівні світла у табл. 2, визначені у фотопічній яскравості (кд/м²), а не в освітленості (лк). Для отримання яскравості від значення освітленості необхідно помножити освітленість для обраної дорожньої класифікації на 0.10 і розділити

Таблиця 2. Значення єдиної яскравості для різних базових рівнів світла і S/P співвідношення

Table 2. Values of unified luminance for different base light levels and S/P ratios

S/P	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
0.25	0.0573	0.0704	0.0849	0.1009	0.1184	0.1373	0.1574	0.1788	0.2012
0.35	0.0728	0.0877	0.1037	0.1209	0.1392	0.1585	0.1787	0.1998	0.2217
0.45	0.0864	0.1026	0.1197	0.1377	0.1565	0.1760	0.1963	0.2172	0.2387
0.55	0.0983	0.1156	0.1335	0.1521	0.1713	0.1911	0.2113	0.2320	0.2532
0.65	0.1092	0.1273	0.1459	0.1649	0.1844	0.2043	0.2245	0.2451	0.2659
0.75	0.1191	0.1379	0.1570	0.1764	0.1961	0.2161	0.2363	0.2567	0.2773
0.85	0.1286	0.1477	0.1672	0.1869	0.2068	0.2268	0.2470	0.2672	0.2876
0.95	0.1368	0.1566	0.1765	0.1965	0.2165	0.2365	0.2566	0.2767	0.2969
1.05	0.1448	0.1651	0.1853	0.2054	0.2255	0.2456	0.2656	0.2856	0.3055
1.15	0.1523	0.1730	0.1935	0.2138	0.2339	0.2540	0.2739	0.2937	0.3135
1.25	0.1593	0.1803	0.2010	0.2215	0.2417	0.2617	0.2816	0.3013	0.3208
1.35	0.1661	0.1873	0.2082	0.2288	0.2491	0.2691	0.2888	0.3084	0.3277
1.45	0.1724	0.1940	0.2150	0.2357	0.2560	0.2759	0.2956	0.3150	0.3341
1.55	0.1785	0.2003	0.2215	0.2422	0.2625	0.2824	0.3020	0.3213	0.3402
1.65	0.1843	0.2063	0.2276	0.2484	0.2687	0.2886	0.3081	0.3271	0.3460
1.75	0.1899	0.2120	0.2335	0.2543	0.2746	0.2944	0.3138	0.3328	0.3514

на π ($\pi \approx 3,1416$). У нашому випадку, для рекомендованої освітленості 9 лк, відповідною яскравістю буде $0,286 \text{ кд/м}^2$ ($L = 9 \text{ лк} \times 0,10 / 3,1416 = 0,286 \text{ кд/м}^2$). У такий спосіб єдина яскравість становить приблизно $0,2773 \text{ кд/м}^2$.

За пошуку через табл. 2 можна знайти й інші клітини з таким же або майже таким значенням єдиної яскравості. Ці клітини показують як джерело світла, так і фотопічний рівень освітленості, які забезпечують еквівалентні фотометричні рівні єдиної яскравості. Наприклад, знайшовши значення єдиної яскравості $0,2759$, що є близьким до отриманого значення для певного світильника N1 (80 Вт), бачимо, що джерело світла з відношенням $S/P = 1,45$ вироблятиме майже ту ж єдину яскравість ($0,2560 \text{ кд/м}^2$) на фотопічній яскравості $0,22 \text{ кд/м}^2$. Відповідну фотопічну освітленість можна обчислити простим способом: єдину яскравість, помножену на π ($\sim 3,1416$), розділити на $0,10$. У прикладі фотопічна освітленість від лампи N1 (80 Вт), що призводить до практично тієї ж єдиної яскравості, становитиме:

фотопічна освітленість світильника

$$N1 (80 \text{ Вт}) = 0,24 \times 3,1416 / 0,10 = 7,54 \text{ (лк)}.$$

Приблизно в цій же єдиній яскравості, що показує фотометричну еквівалентність, світильник з відношенням $S/P = 1,45$ потребує 80 % денної освітленості світильника N1 (80 Вт) для цього прикладу застосування. Так, теоретично те, що менша кількість ретельно розроблених світильників з вищим відношенням S/P буде необхідна для задоволення вимог освітленості для певного застосування; у такий спосіб потенційно знижуючи потужність і відповідну вартість, які буде потрібно від 80 Вт світильника N1.

Важливо пам'ятати, що світильники не повинні бути обрані виключно на основі їхньої єдиної яскравості та співвідношення S/P без урахування всіх критеріїв проектування. Додаткову інформацію щодо розрахунку єдиної яскравості можна знайти в документі [10]. Потрібно зазначити, що розрахунки єдиної яскравості в мезопічній області пов'язані з діапазонами яскравості від $0,001$ до $0,6 \text{ кд/м}^2$. Для денної яскравості, рівної або більшої за $0,6 \text{ кд/м}^2$, єдина яскравість просто дорівнює фотопічній.

ПРАКТИЧНІ ПИТАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ВИГІДНІСТЬ. ОПТИМАЛЬНА ВИСОТА МОНТАЖУ ТА ПОЛЮСНОЇ ВІДСТАНІ

Значення проїжджої частини LSAE — специфічне для умов, що використовуються в розрахунках. Зокрема, значення LSAE світильника пов'язано з висотою установки, що використовується для визначення полюсної відстані. Отже, для заданої полюс-

ної компоновки і геометрії проїжджої частини можна розрахувати LSAE планомірно, залежно від висоти установки.

Як правило, оптимальна висота установки для світильника (висота установки, що дає максимальну LSAE) також дає максимальну полюсну відстань. У зв'язку з наявною інформацією, проектувальники можуть скоротити вибір світильників, які, швидше за все, підходять, в підручному додатку (наприклад, якщо вони потрібні для використання на конкретній монтажній висоті) і підстроїти їх конструкцію.

Як приклад на рис. 2 наведені значення LSAE для світильника N1 за кількох різних монтажних висот. Показники, вищі кожного певного маркера, вказують максимальну полюсну відстань для задоволення даних RP-08-00 для кожної монтажної висоти. За значенням LSAE оптимальна висота установки — 8 м, при цьому крок між світильниками 40 м. Ця одностороння компоновка обрана за допомогою оптимізації у програмі DIALux (рис. 3) на базі IES файлу світильника, отриманого в результаті проведених фотометричних вимірювань у Науково-дослідному центрі світлотехнічних вимірювань

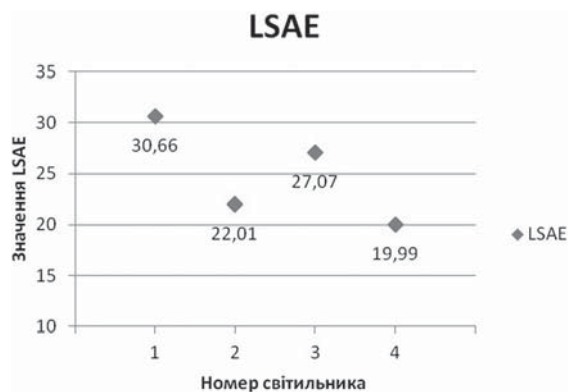


Рис. 2. Значення LSAE для різних монтажних висот для світильника N1 в односторонньому порядку
Fig. 2. LSAE values and pole spacing for various mounting for luminaire N1 in unirateral luminaire layout



Рис. 3. Візуалізація отриманої оптимізованої системи освітлення в програмі DIALux 4.12
Figure 3. Visualization of obtained lighting system in DIALux 4.12 program

Таблиця 3. Характеристики вуличного освітлення та результати LSAE для чотирьох наявних у продажу вуличних світильників, використовуваних на довжину шосе 1 км колекторного шляху щодо критеріїв освітлення RP-08-00 [4]

Table 3. Streetlight characteristics and LSAE results for six commercially available streetlights used to light a one-kilometers length of collector road to RP-08-00 [4] lighting criteria

Номер світильника	Висота монтажу, м	Крок між світильниками, м	Вхідна потужність, Вт	LSAE	Енергоспоживання, кВт/км
№1	7,5	40	80	30,66	2
№2	10,5	52	108	22,01	2,05
№3	8	50	111	27,07	2,22
№4	6,5	33	108	19,99	3,24

ХНУМГ ім. О.М. Бекетова (<http://sds.kname.edu.ua/index.php/ru/38-ndcsv>). За допомогою програми створено сітку на площині задач за вимогами LSAE, описаними раніше, і обчислено значення освітленості в кожній точці. Наступним кроком стало експортування результатів у електронну таблицю Excel, та шляхом простих маніпуляцій, описаних вище, знайдено LSAE світильника N1 = 30,66 лм/Вт.

ЗІСТАВЛЕННЯ LSAE З ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПРИЗНАЧЕННЯМ

LSAE є корисним інструментом для прогнозування споживання енергії для проїжджої частини освітлювальних установок.

У табл. 3 і на рис.4 показано порівняння чотирьох комерційно доступних світильників в Україні. Аналіз

показує значення для цих світильників LSAE, розташованих в односторонньому порядку на їх оптимальній висоті установки. Ця монтажна висота забезпечує можливу максимальну полюсну відстань для задоволення RP-08-00 для колекторної дороги з середньою інтенсивністю конфлікту, що має ширину 7 метрів та дві смуги руху. Використовуючи максимальну полюсну відстань, визначено кількість світильників в односторонній схемі на довжині проїжджої частини 1 км і розраховано споживання потужності на погонному км (кВт/км). У табл. 3 наведені характеристики світильників і результати. Рис. 4 показує необхідну потужність на км залежно від LSAE. Побудовані значення LSAE показують високу кореляцію між значеннями, вищими за LSAE, і значеннями, нижчими від необхідної потужності; це свідчить, що значення LSAE можна використовувати для порівняння світильника з точки зору енергетичної ефективності.

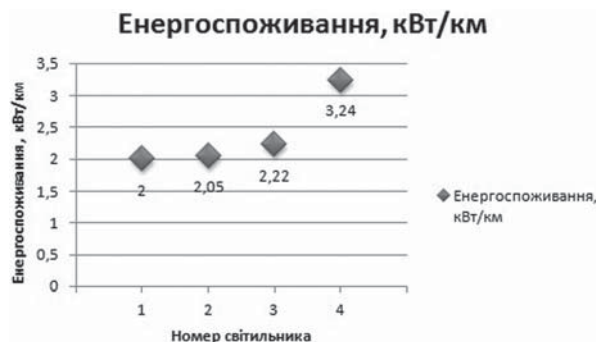


Рис. 4. Споживана потужність на довжині колекторної дороги 1 км, яка відповідає RP-08-00 [4] залежно від LSAE

Fig. 4. Power demand along a one-kilometers length of collector road that meets RP-08-00 [4] as a function of LSAE

ВИСНОВКИ

LSAE — метрика, що може бути пристосована до декількох стандартних рекомендацій та враховує виконання ряду критеріїв освітлення. LSAE добре корелює з системою присмеркової фотометрії.

Розрахунок LSAE надає можливість проектувальнику обрати світильник, що найбільше підходить до умов застосувань та максимально задовольнятиме потреби певних фотометричних критеріїв, стане найбільш економічно вигідним вибором із забезпеченням необхідних рівнів освітленості за найнижчої необхідної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Pia M.C. Ефективність застосувань / Pia M.C., Буллоф І.Д. // Журнал Світлотехнічного Товариства (Rea M.S. Application efficacy / Rea M.S., Bullof J.D. // Journal of the Illuminating Engineering Society). — 2001. — № 30(2). — С/Р. 73—96.
2. IESNA Довідник освітлення: Посилання і застосування. 9-е видання / редактор Pia M. С.; Світлотехнічне Товариство Північної Америки. — Нью Йорк: IESNA (IESNA Lighting Handbook: Reference and Application. 9th Edition / editor Rea M.S.; Illuminating Engineering Society).

- Society of North America. — New York: IESNA), 2000. — 1000 с/р.
3. Назаренко Л.А. Фотометрія присмеркового зору / Назаренко Л.А., МIRONENKO Т.В. // Метрологія та прилади (Nazarenko L. Photometry of mesopic vision / Nazarenko L., Mironenko T. // Metrology and instruments). — 2014. — № 3. — С/Р. 57—62.
 4. Світлотехнічне Товариство Північної Америки (IESNA) RP-8-00: 2000. Американський національний стандарт для освітлення проїжджої частини. — Нью Йорк: IESNA (Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) RP-8-00: 2000. American National Standard Practice for Roadway Lighting. — New York: IESNA), 2000. — 61 с/р.
 5. Британський Інститут Стандартів (BSI) BS EN 13201-2:2003. Дорожнє освітлення. Експлуатаційні вимоги. — Лондон: BSI (British Standards Institute (BSI) BS EN 13201-2:2003. Road lighting. Performance requirements. — London: BSI), 2003. — 16 с.
 6. Міжнародна комісія з освітлення (CIE) 115: 2010. Освітлення доріг для автомобільного руху та пішоходів. — Вена: CIE (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 115: 2010. Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. — Vena: CIE), 2010. — 43 с.
 7. Процедура визначення ефективних оцінок світильників для комерційних нежитлових світильників. Публікація LE 5A-1999 [Електронний ресурс]. — Режим доступу (Procedure for Determining Luminaire Efficacy Ratings for Commercial Non-Residential Downlight Luminaires. Publication LE 5A-1999 [Electronic resource]. — Access mode): https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiWvIpe4qbJAhWHvHIKHTU6CXsQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.neptunlight.com%2Fblobs%2F7%2F73bb92341bba710df9e15208f166258c%2FFIXTURE_EFFICACY.pdf&usq=AFQjCNERBBOKr_K0e2179C6LrLH6vhFpvQ&sig2=WTPL6Xz0UsoxnGE25Bedgg&bvm=bv.108194040,d.bGQ&cad=rja
 8. Процедура для визначення ефективності цільових оцінок для комерційних, промислових і житлових світильників. Публікація LE 6-2008 [Електронний ресурс]. — Режим доступу (Procedure for Determining Target Efficacy Ratings for Commercial, Industrial, and Residential Luminaires. Publication LE 6-2008 [Electronic resource]. — Access mode): http://www.illinoislighting.org/resources/le6-2008_final_website.pdf
 9. ASSIST рекомендації... Рекомендації для оцінки світильників для парковок. [Електронний ресурс]. — Режим доступу (ASSIST recommends... Recommendations for Evaluating Parking Lot Luminaires. [Electronic resource]. — Access mode): <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/recommends/parkinglot.asp>.
 10. ASSIST рекомендації... Вуличне освітлення: Візуальна ефективність [Електронний ресурс]. — Режим доступу: (ASSIST recommends...Outdoor Lighting: Visual Efficacy. [Electronic resource]. — Access mode): <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/recommends/parkinglot.asp>.
 11. Бронс І.А. Ефективність зовнішнього освітлення: Комплексні та кількісні рамки для оцінки світлового забруднення / Бронс І.А., Буллоф І.Д., Піа М.С. // Світлові дослідження та технології (Brons J.A. Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution / Brons J.A., J.D. Bullough M.S. Rea // Lighting Research & Technology). — 2008. — № 40(3). — С/Р. 201—224.
 12. Буллоф І.Д. Прогнозування дискомфортичних відблисків від установок зовнішнього освітлення / Буллоф І.Д., Бронс І.А., Хі Р., Піа М.С. // Світлові дослідження та технології (Bullough, J.D. Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations / Bullough J.D., J.A. Brons, R. Qi, and M.S. Rea // Lighting Research & Technology). — 2008. — № 40(3). — С/Р. 225—242.
 13. ASSIST рекомендації... Метод оцінки дискомфортичної блискавості від системи зовнішнього освітлення [Електронний ресурс]. — Режим доступу (ASSIST recommends...A Method for Estimating Discomfort Glare from Exterior Lighting Systems. [Electronic resource]. — Access mode): <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/recommends/discomfortglare.asp>.
 14. Світлотехнічне Товариство Північної Америки (IESNA) LM-79-08: 2008. Затверджений Метод: Електричні й фотометричні вимірювання твердотільних освітлювальних продуктів. — Нью Йорк: IESNA (Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) LM-79-08: 2008. Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. — New York: IESNA), 2008.
 15. Піа М.С. Предлагаемая система фотометрии / Піа М.С., Буллоф І.Д., Фрейсін'єр-Нова І.П., Бірман А. // Світлові дослідження та технології (Rea M.S. A proposed unified system of photometry / Rea M.S., Bullough J.D., Freyssinier-Nova J.P., Bierman A. // Lighting Research & Technology). — 2004. — № 36(2). — С/Р. 85—111.

Отримано / received: 03.12.2015.

Стаття рекомендована до публікації д. ф.-м. н., проф. В.І. Карасем (Україна).
Prof. V.I. Karas, D. Sc. (Phys.-Mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 620.93

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ У СПОЖИВАЧІВ КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВОГО СЕКТОРУ

І. Петришин, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник,

Т. Присяжнюк, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

О. Бас, кандидат технічних наук, науковий співробітник,

ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»

Описано проблему відбору представницької проби природного газу з трубопроводів низького тиску у споживачів комунально-побутового сектору. Представлено розроблені спеціалізований пробовідбірник поршневого типу та методику проведення відбору проби. Проаналізовано процес визначення теплоти згоряння непрямым методом з урахуванням впливу теплоти згоряння сірководню, меркаптану та вологості газу і негорючих компонентів, які містяться в ньому. Досліджено, що зміна потужності газоспоживального обладнання пов'язана зі зміною надлишкового тиску в будинковому трубопроводі.

It is describes the problems of selection of a representative sample of the natural gas pipelines of low pressure at the consumer household sector, presented developed a specialized sampler piston type and the method of sampling. The processes determining the calorific value indirect method with the influence of the heat of combustion of hydrogen sulfide, mercaptan, moisture and non-combustible gas components are contained therein. It is proved that the change of power gas consumption equipment is connected with the change of the overpressure in the pipeline houses.

Ключові слова: представницька проба газу, поршневий пробовідбірник, теплотворна здатність, хроматограф.

Keywords: representative gas sample, piston sampler, calorific value, chromatograph.

У ситуації, що склалася щодо цінової політики за сплату комунальних послуг населенням, у тому числі такого енергоносія як природний газ, першочерговим завданням газопостачальних (газозбутових) організацій є забезпечення його кількісних та якісних показників. Нарікання населення на його теплотворну здатність (калорійність) небезпідставні, у першу чергу в зв'язку з тим, що до газових мереж надходить природний газ із різних джерел: з газотранспортних магістралей, підземних газових сховищ, газовидобувних родовищ тощо, — і його калорійність може змінюватися в широких межах. Відповідно, для опалення однакових приміщень або підігрівання води в них може витрачатися його різний об'єм, адже газу з нижчим значенням теплотворної здатності необхідно спожити більше.

Відзначимо, що в Україні затверджений в установленому порядку і діє від 12 січня 2015 року відповідний «Порядок відшкодування збитків, завданих споживачеві природного газу внаслідок порушення газопостачальним підприємством Правил надання населенню послуг із газопостачання» [1]. Згідно з цим документом споживач має право звернутися з відповідною скаргою відносно неякісного постачання природного газу і отримати певну компенсацію. Газопостачальне підприємство зобов'язано забезпечити проведення перевірки величини надлишкового тиску та/або якісних показників газу відповідно до вимог цього порядку. Величину надлишкового тиску газу перевіряють перед газовими приладами споживача в години максимального



І. Петришин



Т. Присяжнюк



О. Бас

його споживання. Мінімальний надлишковий тиск газу перед газовими приладами, пристроями повинен становити не менше мінімально допустимого значення, що передбачено нормативними документами та нормативно-технічними актами на газоспоживальні прилади (пристрої). Якщо надлишковий тиск газу або його якісні характеристики менші від мінімально допустимих величин, зазначених у нормативних документах та нормативно-технічних актах на газоспоживальні прилади, плата за газопостачання з дня подання заяви до дня відновлення подавання газу зі значеннями надлишкового тиску та якісних характеристик, більшими за мінімально допустимі, не здійснюється.

За технічними угодами між газотранспортними (газовидобувними) та газопостачальними організаціями регулярно здійснюють відбір проб газу для оцінки його якісних показників в акредитованих відомчих лабораторіях ПАТ «Укртрансгаз» або газорозподільних організацій. Як правило, відбір проб здійснюється типовими пробовідбірниками на спеціально обладнаних для такої мети дільницях газорозподільних станцій (ГРС) чи газорозподільних пунктів (ГРП). Разом з тим, під час транспортування газу місцевими мережами безпосередньо до населення, його якісні показники можуть суттєво змінюватися, особливо його теплота згоряння. Адже не секрет, що в «години пік», коли кондиційного газу не вистачає або його потрібно зекономити, газозбутові організації мають змогу закачувати низькокалорійний, технологічно не підготовлений газ з місцевих родовищ з підвищеною вологістю, наявністю в ньому негорючих компонентів, таких як азот N_2 чи вуглекислий газ CO_2 , парів етиленгліколю і метанолу, які застосовують в установках підготовки газу для попередження утворення гідратних пробок, або ж змінювати параметри роботи газопроводів, особливо ця процедура має сенс за зниження надлишкового тиску. Окрім того, відібрана безпосередньо у споживача проба газу буде представницькою, оскільки у подальшому для аналізування вона не повинна проходити відповідну підготовку, в тому числі й осу-

шування, як це передбачено [2]. Отже, реальна теплота згоряння газу, відібраного для аналізування безпосередньо у споживача, не відповідатиме задекларованій газотранспортною чи газопостачальною організацією.

Відповідно постає серйозна об'єктивна потреба кваліфікованого відбору проби газу у споживача. Зокрема, у [3] відзначено проблему відсутності технічної можливості проведення вимірювання фактичного значення теплоти згоряння безпосередньо у кінцевого споживача. Потрібно відзначити, що на ГРС та ГРП є спеціально обладнані місця на трубопроводах з передбаченою можливістю здійснення відбору проби газу за допомогою типового балона-пробовідбірника. У споживача ж здійснити відбір проби аналогічним способом достатньо складно з декількох об'єктивних причин. По-перше, необхідно здійснювати втручання у систему трубопроводів постачання газу, тобто встановлювати пробовідбірник послідовно із газоспоживальним обладнанням. По-друге, в газопроводах для подавання газу в комунально-побутову сферу, тобто населенню, передбачений лише низький надлишковий тиск з максимальним значенням 3 кПа [4], а на вхід хроматографічного обладнання, для адекватного проведення аналізу компонентного складу, газ необхідно подавати за значно більшого надлишкового тиску.

Після проведеного аналізу наявних способів здійснення відбору проби газу у споживача встановлено, що для газопроводів з низьким надлишковим тиском у переважній більшості використовують пробовідбірники двох типів: скляну колбу та балон з рухомих поршнем [5]. Застосування скляної колби як пробовідбірника передбачає обережне поводження з ним та певні обмеження за проведення відбору проби газу у побутового споживача, окрім того, в цілому його застосування не вирішує проблеми низького надлишкового тиску в пробовідбірнику. В ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» на основі типового пробовідбірника — балона з рухомих поршнем розроблено конструкцію універсального пробовідбірника з можливістю його застосування

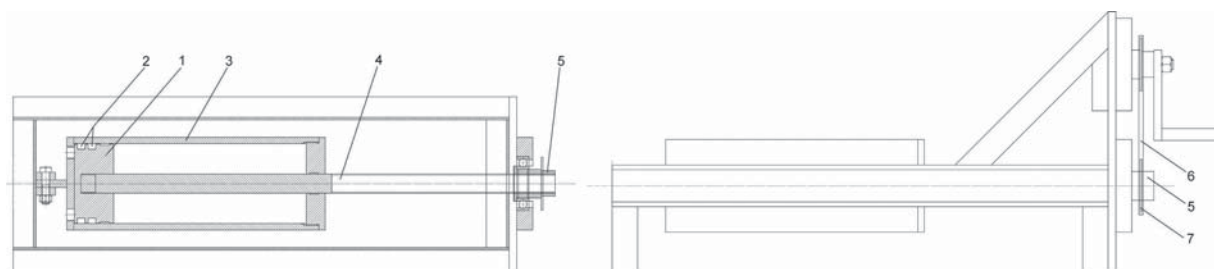


Рис. 1. Схематичне зображення поршневого пробовідбірника.

Fig. 1. Schematic representation piston sampler.

для газопровідних мереж з різними значеннями надлишкового тиску. Розроблення такого універсального пробовідбірника спеціальної конструкції має на меті здійснення відбору представницької проби газу безпосередньо у споживача та убезпечення споживачів від недостовірного обліку та неякісного постачання енергоресурсів. На рис. 1 представлено схематичне зображення поршневого пробовідбірника.

Конструктивно пробовідбірник є гідравлічним циліндром односторонньої дії. Його конструкція передбачає використання поршневого розділювача 1 з ущільненням у виді двох манжет 2 пневматичного принципу дії для забезпечення герметичності та відсутності перетоків газу, який переміщується в циліндрі 3 з внутрішньою хонінговою поверхнею. Шток 4 поршневого розділювача виконано із суцільного вала з полірованою зовнішньою поверхнею тієї частини, яка міститься в циліндрі, й з різьбовою гвинтовою канавкою з протилежної частини. При цьому переміщення штока 4 із поршнем 1 здійснюється з використанням механічної передачі гвинт — гайка кочення 5. Привід гайки кочення 5 виконано у виді ланцюгової передачі 6, ведому зірочку 7 якої закріплено на гайці кочення 5.

Для поршневого пробовідбірника розроблено методику проведення відбору та накопичення кількості проби газу. На рис. 2 представлено схему проведення відбору проби у споживача з газопроводу низького надлишкового тиску.

Для здійснення відбору проби газу у споживача комунально-побутової сфери необхідно від'єднати газоспоживальне обладнання від газової мережі, вентиль 2 при цьому необхідно встановити у закритому положенні і від'єднати від нього гнучкий шланг, закріплений на штуцері 10 газоспоживального об-

ладнання. Наступний етап — послідовне встановлення поршневого пробовідбірника 6 і балона-пробовідбірника 8 в газову мережу. Після монтажу пробовідбірників усі вентилі системи встановлюють у відкрите положення і здійснюють перевірку герметичності системи. Разом з тим слід відзначити перевагу послідовного встановлення пробовідбірників: у систему, за необхідності проведення аналізу в кількох незалежних лабораторіях або здійснення відбору арбітражної представницької проби, можна додатково встановити ще один балон-пробовідбірник, який за присутності операторів газопостачальної організації та споживача газу опломбовують відповідним чином.

Після під'єднання системи відбору проби проводять операцію технологічного продування для видалення залишків повітря і послідовного спалювання газу в пальнику газоспоживального обладнання. Наступним етапом виконують безпосередній відбір проби газу. Протягом проведення процедури відбору проби газу здійснюють безперервний контроль надлишкового тиску газу з використанням манометра 3. Для наповнення поршневого пробовідбірника 6 шток за допомогою приводу відводять у крайнє нижнє положення (рис. 2), яке інформує, що циліндр пробовідбірника повністю заповнений газом. У процесі заповнення циліндра здійснюється самовільне заповнення балона 8 газом з тиском, рівним тиску мережі. Далі вентилі 4 і 9 переводять у закриті положення і приводом штока здійснюють нагнітання об'єму газу з циліндра поршневого пробовідбірника 6 у балон-пробовідбірник 8. Після проведення етапу заповнення балона-пробовідбірника додатковим об'ємом газу з циліндра вентилі 5 і 7 встановлюють у закриті положення, і балон 8 можна: або від'єднати від системи (замінити), або повторити

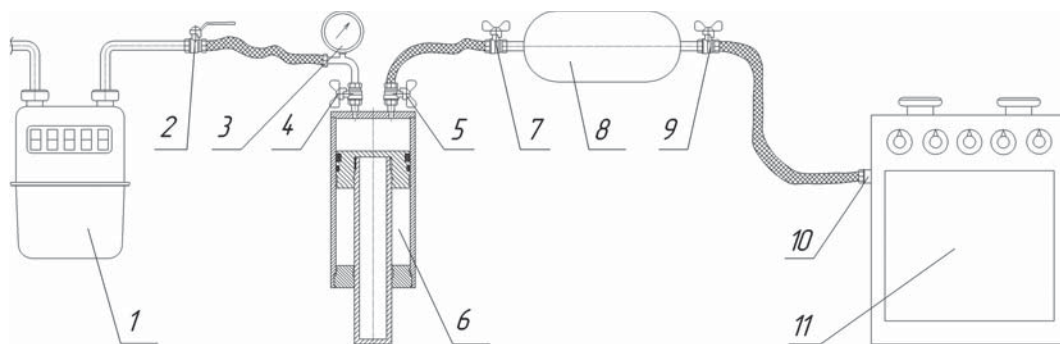


Рис. 2. Схема проведення відбору проби у споживача з газопроводу низького надлишкового тиску
1 — лічильник газу; 2, 4, 5, 7, 9 — вентилі; 3 — манометр; 6 — поршневий пробовідбірник (балон з рухомих поршнем); 8 — балон-пробовідбірник; 10 — штуцер під'єднання газоспоживального обладнання; 11 — газоспоживальне обладнання.

Fig. 2. Scheme of sampling in consumer gas pipeline of low overpressure
1 — gas meter; 2, 4, 5, 7, 9 — valves; 3 — manometer; 6 — piston sampler (with movable piston); 8 — cylinder-sampler; 10 — fitting connecting the gas consuming equipment; 11 — gas consuming equipment.

процедуру нагнітання для збільшення надлишкового тиску. У разі від'єднання балона 8 необхідно гнучкий шланг від вентиля 5 приєднати до газоспоживального обладнання. Після під'єднання вентилю 4 і 5 встановлюють у відкрите положення і здійснюють повторне заповнення поршневого пробовідбірника газом з мережі. Останнім етапом методики проведення відбору проби газу вентиля 2, 4 і 5 переводять у закриті положення і від'єднують пробовідбірник від газової мережі. Гнучкий шланг від вентиля 2 приєднують до газоспоживального обладнання. Поршневий та балон-пробовідбірники транспортують до лабораторії для проведення аналізу складу газу і визначення теплоти згорання та інших параметрів за необхідності. Для проведення аналізу необхідно за допомогою вузла приводу витіснити газ із циліндра поршневого пробовідбірника.

Згідно з [6] теплоту згорання природного газу певного об'єму вимірюють прямими методами (калориметрами згорання), непрямими методами (газовими хроматографами) та опосередкованими методами (на основі кореляційних залежностей результатів вимірювання одного або кількох фізичних параметрів газу, наприклад, його густини та вмісту CO_2 та N_2). Як правило, в Україні газотранспортні та газопостачальні організації для інформованості населення подають дані розрахунку теплоти згорання газу непрямим методом на основі вимірювання компонентного складу хроматографічним методом (згідно з аналізом паспортів вимірювальних лабораторій, акредитованих у відповідній галузі). Проте результати таких вимірювань, як правило, «обтяжені» суттєвою методичною похибкою, оскільки газовим хроматографом проводять вимірювання компонентного складу за винятком води, і тому обчислене значення теплоти згорання стосується сухого газу. Насправді відібрана з газової магістралі представницька проба газу обов'язково містить певну кількість парів води, аналіз та вимірювання якої не передбачений та не є складовою частиною первинної методики визначення теплоти згорання, а регламентований іншими методиками (наприклад, проведення гігрометричного вимірювання або вимірювання точки роси природного газу).

Для виконання вимог безпеки природний газ обов'язково проходить процедуру одоризації, основним компонентом якої є меркаптан. Норма введення меркаптану до природного газу становить 16 г ($19,1 \text{ см}^3$) на 1000 м^3 , приведених до стандартних умов [7]. Окрім того, до компонентного складу природного газу можуть входити меркаптано-ва сірка та сірководень. Максимально допустимий вміст цих речовин нормується в $[\text{г}/\text{м}^3]$ згідно з [8].

Визначення вмісту сірковмісних речовин у природному газі проводять методом їх поглинання за пропускання газу через розчин сполук цинку або кадмію [9]. Окрім того, іноземні стандарти регламентують визначення вмісту цих речовин хроматографічним методом з використанням спеціалізованих хроматографів, вимоги до яких наведено у [10]. Згідно з [11] нижча теплотворна здатність сірководню становить $21,53 \text{ МДж}/\text{м}^3$, що складає 64,5 % відносно метану як основного складника природного газу. Отже, за проведення аналізу компонентного складу природного газу для розрахунку теплоти згорання хроматографічним методом сірковмісні сполуки не будуть визначені та враховані. Окрім того, внаслідок дії високої температури в хроматографічній колонці ці сполуки розпадаються на вуглеводні, водень і сірку, які у сукупності змінюють компонентний склад природного газу. Сірка як окремий хімічний елемент може або забруднювати колонку і чинити вплив на якість хроматографічного аналізу, або за дії певних чинників (наприклад, електричного потенціалу в детекторі) вступати в реакцію з іонами металів. У результаті такої взаємодії виникають сульфіді, які за тривалої дії також можуть пошкодити хроматографічну колонку.

Для визначення теплоти згорання сірководню необхідно оцінити його вміст $X_{\text{H}_2\text{S}}$ у природному газі згідно з [9]:

$$X_{\text{H}_2\text{S}} = V_{\text{H}_2\text{S}} / V_p, \quad (1)$$

де V_p — об'єм газу, приведений до стандартних умов, який міститься у пробовідбірнику;

$V_{\text{H}_2\text{S}}$ — об'ємний вміст сірководню в об'ємі газу, відібраному до пробовідбірника, який визначається як

$$V_{\text{H}_2\text{S}} = m_{\text{H}_2\text{S}} / \rho_{\text{H}_2\text{S}}, \quad (2)$$

де $m_{\text{H}_2\text{S}}$ — маса сірководню, вимірена згідно з [9],

$\rho_{\text{H}_2\text{S}}$ — густина сірководню.

Після відповідних перетворень та підстановки (1) у (2) можна визначити теплоту згорання сірководню:

$$H_{\text{H}_2\text{S}} = (m_{\text{H}_2\text{S}} / \rho_{\text{H}_2\text{S}} \cdot V_p) \cdot H_{i(\text{H}_2\text{S})}, \quad (3)$$

де $H_{i(\text{H}_2\text{S})}$ — теплотворна здатність сірководню згідно з [11].

Відповідно теплота згорання меркаптану H_{RHS} визначається аналогічним способом:

$$H_{\text{RHS}} = (m_{\text{RHS}} / \rho_{\text{RHS}} \cdot V_p) \cdot H_{i(\text{RHS})}, \quad (4)$$

де m_{RHS} — маса меркаптану, вимірена згідно з [9];

ρ_{RHS} — густина меркаптану;

$H_{i(\text{RHS})}$ — теплотворна здатність меркаптану згідно з [11].

Нормативний документ [12] встановлює методи обчислення теплоти згорання (нижчої або вищої)

сухого природного газу на основі молярної частки або масової концентрації компонентів газової суміші. Очікувана систематична похибка результату обчислення теплоти згоряння — в межах 0,1%, якщо в ній вміст компонентів проби обмежуватиметься такими критеріями:

* молярна частка метану в газі складатиме не менше ніж 0,5;

* молярна частка N_2 не повинна перевищувати 0,3;

* молярна частка CO_2 і C_2H_6 (кожного) не повинна перевищувати 0,15;

* молярна частка жодного іншого компонента не повинна перевищувати 0,05.

Необхідно відзначити, що хроматографічний метод не застосовують до проб газу, що містять будь-який вимірюваний вуглеводневий конденсат, воду або технологічну рідину, наприклад, метанол або гліколіз [3]. Разом з тим відібрані для аналізу проби не є пробами «сухого природного газу», в якому молярна частка парів води не перевищує 0,00005 [12]. Тому обчислення згідно з вимогами [13, 14] значення нижчої об'ємної теплоти згоряння H_n є теоретичним значенням, яке потребує для практичного застосування певного коригування. Повне або так зване стехіометричне згоряння газу проходить за умови відсутності в продуктах згоряння газу горючих газових компонентів або компонентів неповного окислення [15]. Разом з тим у продуктах згоряння газу однозначно міститься водяна пара, утворена наявною у газі з проби вологістю, окисленням водню, що є компонентом газу, та вологістю повітря, яке бере участь у горінні газу. Якщо відібрану пробу газу перед аналізуванням піддати охолодженню до температури, нижчої за температуру точки роси газу (згідно з ДСТУ не повинна перевищувати 5 °C), то тоді відбудеться конденсація водяної пари, для пароутворення якої за горіння потрібна додаткова теплота, яка умовно «відбирається від газу». Проте на практиці такого охолодження проби газової суміші не здійснюють, і долю цієї теплоти, відповідної цьому значенню вологості, не враховують за визначення H_n .

Отже, для отримання реального значення теплоти згоряння H_p необхідно вводити поправку на вміст парів води, яку можна виразити як один із компонентів суміші [12] з певною молярною часткою. Відтак, якщо парціальний тиск води p_v у пробі природного газу може досягти насичення p_n за стандартних умов вимірювання складу газу, то оцінювання впливу парів води є виключенням їхньої частки з об'єму дійсно сухого газу і тим самим знижен-

ням певного значення теплоти згоряння на цю частку до значення [12]:

$$H = H_{gr} [(p_c - p_v) / p_c], \quad (5)$$

де H — реальне значення (вище або нижче) об'ємної теплоти згоряння;

H_{gr} — теплота згоряння сухого газу;

p_c — тиск за стандартних умов вимірювання (101325 Па).

Значення теплоти згоряння можна подати у виді значень молярної, масової або об'ємної частки, проте найбільш коректним для обчислень є результат хроматографічного аналізу, визначений в одиницях молярної частки. Для збереження суми молярних часток горючих компонентів такою, щоби дорівнювала одиниці, потрібно молярну частку кожного компонента помножити на коефіцієнт $(p_c - p_v) / p_c$. Оскільки значення теплоти згоряння є сумою пропорційних часток горючих компонентів, обчислене значення реальної теплоти згоряння буде меншим на цю частку.

За оцінювання масової або об'ємної теплоти згоряння приховану питому теплоту пароутворення водяної пари, яка міститься в продуктах згоряння природного газу H_{Δ} , можна визначити за формулою:

$$H_{\Delta} = q_{\Delta} m_{H_2O}, \quad (6)$$

де q_{Δ} — питома кількість тепла, необхідна для нагрівання 1 кг води до температури кипіння та випаровування, МДж/кг;

m_{H_2O} — масова частка води у складі газу, кг.

Значення питомої кількості тепла q_{Δ} за нагрівання 1 кг води від 0 до 100 °C за тиску p_c (101325 Па) складає 2,51 МДж/кг [16].

Концентрацію в г/м³ водяних парів у газі W за температури 20 °C і тиску 101,325 кПа обчислюють за формулою [17]:

$$W = A \cdot 101,325 / p + B, \quad (7)$$

де A — коефіцієнт залежності вмісту води від тиску водяної пари за виміреної точки роси;

p — тиск газу, за якого проводять вимірювання;

B — коефіцієнт залежності вмісту води від температури точки роси і компонентного складу.

Коефіцієнти A і B наводяться в додатку [17], проміжні значення отримують шляхом інтерполяції.

Концентрація водяних парів пов'язана з масовою часткою води m_{H_2O} через одиницю об'єму V_p , в якому перебуває відібрана проба газу:

$$m_{H_2O} = W \cdot V_p. \quad (8)$$

Одним із найбільш присутнім у природному газі негорючим компонентом є азот N_2 , який має суттєвий вплив на теплотворну здатність, оскільки збільшує його об'єм. Є випадки, коли його концентрацію штучно збільшують, щоби знизити калорійність

газу, якщо вона суттєво перевищує номінальну за нормою [18].

Також у природному газі можуть бути інші негорючі компоненти, на які діють обмеження щодо їх вмісту в суміші природного газу [8]. Тому доцільно ввести поправку до отриманого хроматографічним методом значення теплоти згоряння для врахування частки цих негорючих компонентів у газі. Інформативний параметр цієї поправки — густина природного газу. Сумарна густина суміші ρ_c включає всі добуток вмісту компонентів природного газу X_i і X_j на горючі ρ_g і негорючі частки $\rho_{нг}$ (кг/м³).

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n X_i \cdot \rho_{ig} + \sum_{j=1}^m X_j \cdot \rho_{jнг} \quad (9)$$

Поправку для визначення нижчої теплотворної здатності H_n реального газу, який містить горючі та негорючі компоненти, можна визначити за формулою:

$$\Delta H_p = H_n (\rho_{нг} / \rho_c). \quad (10)$$

Отже, реальну нижчу теплоту згоряння H_p з урахуванням впливу теплоти згоряння сірководню, меркаптану та вологості газу і негорючих компонентів, які містяться в ньому можна визначити:

$$H_p = H_n + H_{H_2S} + H_{RHS} - H_n (\rho_{нг} / \rho_c) - q_{\Delta} m_{H_2O}. \quad (11)$$

Разом з тим, стосовно інших компонентів природного газу, на основі аналізу протоколів досліджень природного газу на газовидобувних підприємствах можна констатувати, що кисень у видобутому з надр природному газі зазвичай відсутній або міститься в незначній кількості. Якщо ж вміст кисню за проведення аналізу компонентного складу виявлено в помітній кількості, то можна з певною достовірністю стверджувати, що газ попередньо змішано з повітрям. Процедура потрапляння повітря в газову суміш має велику ймовірність, оскільки, навіть за наповнення трубопроводів природним газом, він змішується з наявним там повітрям, якщо трубопроводи не пройшли процедури вакуумування.

Проте невідповідність газу його нормованим якісним показникам не єдина причина скарг споживачів. У загальному випадку пересічний споживач може об'єктивно оцінити два ключові параметри газу: колір під час його згоряння та час підігрівання води, які на його думку повинні свідчити щодо низького значення теплоти згоряння. Стосовно кольору, в [19] детально аналізується співвідношення кольору полум'я до процесу горіння. Разом з тим вимірені споживачем різні значення часу, витраченого на підігрівання води, свідчать не лише щодо якості газу, а також і його кількості, що надходить споживачу, пов'язаної з надлишковим тиском газу в трубопроводі. Обґрунтовано це твердження.

Зазвичай теплова потужність газоспоживального обладнання встановлена у нормативних (або експлуатаційних) документах і визначена на основі приймальних випробувань цього обладнання. Вона визначається добутком значень об'ємної витрати газу q на теплоту згоряння цього газу H_p [20]. Отже встановлено два впливних фактори, зміна яких у результаті призведе до незадоволення споживача.

$$N = q \cdot H_p / 3600, \quad (12)$$

де q — годинна витрата газу, яка визначається як

$$q = V/\tau, \quad (13)$$

де V — приведений об'єм сухого газу, м³;

τ — час у год, протягом якого вимірюють об'єм газу, що витрачається, у разі його спалювання через пальники газоспоживального обладнання;

H_p — нижча теплота згоряння природного газу, кДж/м³.

Незалежно від типу газоспоживального обладнання (колонка, котел або ж плита), результатом споживання газу є його перетворення в теплову енергію, тобто спалювання. Здійснюється воно в пальнику, основний елемент якого — сопло або форсунка. Сопло за своїм принципом дії — це звукувальний пристрій; відповідно значення об'ємної витрати газу q , який проходить через сопло, можна визначити як добуток поперечної площі отвору сопла S на швидкість газу в соплі v . У свою чергу, швидкість газу пов'язана з надлишковим тиском газу в трубопроводі p (кПа) згідно з формулою швидкісного напору Бернуллі [21]:

$$p = \rho_c \cdot v^2 / 2. \quad (14)$$

Відповідно значення об'ємної витрати газу через сопло визначається кореневою залежністю від надлишкового тиску газу та його густини, а саме:

$$q = S \cdot \sqrt{2 \cdot p / \rho_c}. \quad (15)$$

Для переважної більшості газоспоживального обладнання в експлуатаційних документах подано значення надлишкового тиску газу, за якого процес горіння проходить оптимально і без додаткових втрат. Таке значення становить від мінімального 1,3 кПа до максимального 2,0 кПа. Також у системі побутового газопостачання встановлюють лічильник газу, зазвичай, мембранного типу. Для таких лічильників характерні нормовані втрати тиску, які складають (0,2—0,3) кПа.

Відповідно за застосування формули (15) можна встановити, що зміна надлишкового тиску газу в допустимих межах від 2,0 до 1,3 кПа спричинить зменшення значення об'ємної витрати газу, а отже і потужності на 19,4%, а за падіння значення надлишкового тиску до 1 кПа об'ємна витрата зміниться на 29,3%. Із цього випливає, що час τ , витрачений,

у загальному випадку, на підігрівання води, стане майже на третину більшим. Разом з тим за здійснення реальних замірів встановлено, що вимірене значення часу більше за попередньо розраховане. Це пов'язано з низькою ефективністю довготривалих процесів, спричиненою появою додаткових неконтрольованих і важковраховуваних втрат, які за своєю суттю зміщують тепловий баланс. Окрім того, процес горіння проходить не за оптимальних умов, оскільки діаметр сопла в пальнику розрахований для роботи в іншому діапазоні надлишкового тиску за іншої потужності, тобто суміш газу з повітрям, яка згорає, містить надлишок повітря. Основну долю додаткових втрат, які виникають, складають теплові втрати. Пов'язані вони зі зміною співвідношення загальних теплових втрат у бік збільшення внеску випромінювання та конвекції відносно теплопровідності, іншими словами — підвищується пароутворення води через більшу тривалість дії й інтенсивності її теплообміну з навколишнім середовищем.

У загальному випадку можна обґрунтовано стверджувати, що зміна режиму роботи газотранспортних мереж побутового призначення, спричинена у переважній більшості зниженням величини надлишкового тиску в трубопроводі, зумовлює зміну режиму роботи газоспоживального обладнання у споживача, для якого цей режим чітко нормується. Разом з тим потрібно відзначити таку особливість: якщо у споживача встановлено редуційний вузол, принцип якого передбачає незалежне регулювання значення надлишкового вихідного тиску від вхідного з прив'язкою до атмосферного тиску, то зміна режиму роботи газопроводу має незначний вплив на роботу газоспоживального обладнання у споживача.

ВИСНОВКИ

Зважаючи на необхідність проведення кваліфікованого відбору проби природного газу у кінцевого споживача, тобто в комунально-побутовій сфері, в трубопроводах з низьким надлишковим тис-

ком, у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» розроблено спеціалізований пробовідбірник поршневого типу для здійснення відбору представницької проби газу безпосередньо у споживача згідно з розробленою методикою (рис. 2) та проведення подальшого аналізу.

Теплота згоряння природного газу зазвичай визначається непрямим розрахунковим методом за вимірювання компонентного складу за допомогою хроматографа. Установлено, що за проведення аналізу хроматографом не враховують: наявність водяної пари в газі, вміст сірковмісних речовин та зміну густини газу залежно від вмісту негорючих складників. Окрім того, сірка як окремий хімічний елемент може або забруднювати колонку і впливати на якість хроматографічного аналізу, або за дії певних чинників вступати в реакцію з іонами металів; в результаті такої взаємодії виникають сульфідні, які за тривалої дії також можуть пошкодити хроматографічну колонку. В результаті за обчислення реальної теплоти згоряння природного газу необхідно вводити відповідні поправки. Така процедура вимагає додаткових досліджень і достатньо витратна, відповідно рекомендовано проводити визначення теплоти згоряння природного газу іншими методами. Фахівці ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» активно працюють задля вирішення цього науково-прикладного завдання.

Із проведеного детального дослідження маємо як результат, що впливними факторами потужності газоспоживального обладнання є два основних чинники: об'ємна витрата природного газу та його теплотворна здатність. Установлено, що основна причина зміни об'ємної витрати газу пов'язана зі зміною надлишкового тиску в будинковому трубопроводі, зокрема, за зменшення надлишкового тиску від 2 до 1 кПа об'ємна витрата зміниться на 29,3%. Із цього випливає, що час, витрачений, у загальному випадку, на підігрівання води стане майже на третину більшим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Порядок відшкодування збитків, завданих газопостачальному або газорозподільному підприємству внаслідок порушення споживачем природного газу Правил надання населенню послуг з газопостачання, а також споживачеві природного газу внаслідок порушення газопостачальним або газорозподільним підприємством Правил надання населенню послуг з газопостачання: Постанова № 184 — [Чинний від 2015-01-12]. — Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, 2015 (The procedure for damages caused gas supply or gas distribution company due to violations of the Rules consumer of natural gas provision of gas supply services, and consumer of natural gas due to viola-
2. Природний газ. Розширений аналіз. Метод газової хроматографії (ISO 6975:1997, IDT): ДСТУ ISO 6975:2012. — [Чинний від 2013-07-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2012 (Natural gas. Extended analysis. Gas-chromatographic method (ISO 6975:1997, IDT): DSTU ISO 6975:2012. — [Effective as of 2013-07-01]. — K.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2012. — 24p.) — 24 c/p.
3. Андрієшин М.П. Вплив фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів / М. Андрієшин,

- Р. Домницький, С. Дехтярук, М. Гладисhevський, А. Едель // Нафтогазова галузь України. — 2014 (Andriishyn M.P. Effect of gas physicochemical parameters on gas appliance operating efficiency / M. Andriishyn, R. Domnytskyi, S. Dehtyarchuk, M. Gladyshevskiy, A. Edel // Oil & gas industry of Ukraine. — 2014. — № 6. — Р. 34—39). — № 6. — С/Р. 34—39.
4. Державні будівельні норми України. Інженерне обладнання будинків і споруд, Зовнішні мережі та споруди. Газопостачання: ДБН В.2.5-20-2001 — [Чинний від 2001-08-01]. — К.: Держбуд України, 2001 (State building codes Ukraine. Engineering equipment of buildings and structures. External networks and facilities. Gas supply: DBN V.2.5-20-2001. — [Effective as of 2001-08-01]. — К.: Derzhbud Ukraine, 2001. — 131p.). — 131 с/р.
 5. Природний газ. Настанови щодо відбирання проб (ISO 10715:1997, IDT): ДСТУ ISO 10715:2009. — [Чинний від 2011-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2010 (Natural gas. Sampling guidelines (ISO 10715:1997, IDT): DSTU ISO 10715:2009. — [Effective as of 2011-01-01]. — К.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2010. — 36p.). — 36 с/р.
 6. Природний газ. Визначення енергії (ISO 15112:2007, IDT): ДСТУ ISO 15112:2009. — [Чинний від 2011-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2010 (ISO 15112:2007, IDT): DSTU ISO 15112:2009. — [Effective as of 2011-01-01]. — К.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2010. — 54p.). — 54 с/р.
 7. Справочник: Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности, М.: Инфра-Инженерия, 2008 (Handbook: Operating equipment and gas industry facilities, M: Infra-Engineering, 2008. — 607p.). — 607 с/р.
 8. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия: ГОСТ 5542-87. — [Введен с 1988-01-01]. — М.: Изд-во стандартов, 1987 (Natural gases for commercial and domestic use. Specifications: GOST 5542-87. — [Effective as of 1988-01-01]. — М.: ИПК, Standart Publishing House, 1987 — 6p.). — 6 с/р.
 9. Газы горючие природные. Методы определения сероводорода и меркаптановой серы: ГОСТ 22387.2-97. — [Введен с 1999-07-01]. — Минск.: МГС, 1997 (Combustible natural gases. Methods for determination of hydrogen sulphide and sulphur mercaptan: GOST 22387.2-97. [Effective as of 1988-01-01]. — Minsk, MGS, 1997 — 24p.). — 24 с/р.
 10. Газ горючий природный. Определение серосодержащих компонентов хроматографическим методом: ГОСТ Р 53367-2009. — [Введен с 2010-07-01]. — М.: Стандартифо, 2010 (Combustible natural gas. Determination of sulfur-containing components using chromatographic method: GOST R 53367-2009. — [Effective as of 2010-07-01]. — М.: Standartinfo, 2010 — 27 p.). — 27 с/р.
 11. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96. — [Введен с 1997-07-01]. — М.: Изд-во стандартов, 1997 (Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Definition of physical properties of natural gas, its components and processing products: GOST 30319.1-96. — [Effective as of 1997-07-01]. — М.: Standart Publishing House, 1997. — 16p.). — 16 с/р.
 12. Природный газ. Обчислення теплоти згорання, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1995/Cor.2:1997, Cor.3:1999, IDT): ДСТУ ISO 6976:2009. — [Чинний від 2011-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2010 (Natural gas. Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition. (ISO 6976:1995/Cor.2:1997, Cor.3:1999, IDT): DSTU ISO 6976:2009. — [Effective as of 2011-01-01]. — К.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2010. — 55p.). — 55 с/р.
 13. Природний газ. Визначення складу із заданою невизначеністю методом газової хроматографії. Частина 1. Настанови щодо спеціалізованого аналізування (ISO 6974-1:2000, IDT): ДСТУ ISO 6974-1:2007. — [Чинний від 2008-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2008 (Natural gas. Determination of composition and associated uncertainty by gas chromatography. Part 1. General guidelines and calculation of composition (ISO 6974-1:2000, IDT): DSTU ISO 6974-1:2007. — [Effective as of 2008-01-01]. — К.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2008. — 20p.). — 20 с/р.
 14. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа «Воббе»: ГОСТ 22667-82. — [Чинний від 1983-07-01]. — М.: ИПК, Издательство стандартов, 1983 (Combustible natural gases. Calculation method for determination of calorific value, specific gravity and Wobbe index: GOST 22667-82. — [Effective as of 1983-07-01]. — М.: ИПК, Standart Publishing House, 1983 — 9 p.). — 9 с/р.
 15. Природний газ. Вимірювання властивостей. Теплота згорання та число Воббе (ISO 15971:2008, IDT): ДСТУ ISO 15971:2014. — [Чинний від 2015-05-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2014 (Natural gas. Measurement of properties. Calorific value and Wobbe index (ISO 15971:2008, IDT): DSTU ISO 15971:2014. — [Effective as of 2015-05-01]. — К.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2014. — 50p.). — 50 с/р.
 16. Щетников Е.С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965 (Shchetnikov E.S. Combustion gases. — М.: Science, 1965. — 740 p.). — 740 с/р.
 17. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги: ГОСТ 20060-83. — [Чинний від 1984-07-01]. — М.: ИПК, Издательство стандартов, 1983 (Natural combustible gases. Methods for determining water vapour content and dew-point of moisture: GOST 20060-83. — [Effective as of 1984-07-01]. — М.: ИПК, Standart Publishing House, 1983 — 11 p.). — 11 с/р.
 18. Halm M. The right partner for improving your process creating stable conditions (Надійний партнер для покращення вашого процесу створення стабільних умов) // M. Halm // Elster-Instromet Profiles. — 2013. — № 3. — Р. 8—9.
 19. Петришин І.С. Аналіз показників якості природного газу, які впливають на процес горіння / І. Петришин, В. Соколовський, Н. Петришин, І. Дарвай // Стандартизація. Сертифікація. Якість. — 2012 (Petryshyn I.S. The analysis of a natural gas that affect the burning process / I. Petryshyn, V. Sokolovskiy, N. Petryshyn, I. Darvay // Standardization. Certification. Quality. — 2012. — № 3. — Р. 51—56). — № 3. — С/Р. 51—56.
 20. Плити газові побутові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2204-93. — [Чинний від 1995-05-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 1993 (Domestic gas ranges. General specifications: DSTU 2204-93. — [Effective as of 1995-05-01]. — К.: Derzhspozhyvstandart Ukraine, 1993. — 23p.). — 23 с/р.
 21. Френкель Н.З. Гидравлика, Госэнергоиздат, М. — Л.: 1956 (Frankel N.Z. Hydraulics, Gosenergoizdat, Moscow — L.: 1956. — 456p.). — 456 с/р. ■

Отримано / received: 06.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. Г.Ю. Народницьким (Україна).
D. Sc. (Techn.) G.Yu. Narodnytskyi, Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 53.088.23

THE EVALUATION OF COOLED PARTICLES' PARAMETERS BY INSTRUMENTS OF NONLINEAR METROLOGY

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ОХОЛОДЖЕНИХ ЧАСТОК ІНСТРУМЕНТАМИ НЕЛІНІЙНОЇ МЕТРОЛОГІЇ

Yu. Machekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Physical Foundations of Electronic Engineering Department,
Yu. Kurskoy, Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Physical Foundations of Electronic Engineering Department, Kharkov National University of Radioelectronics, Kharkov

Ю. Мачехін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичних основ електронної техніки,
Ю. Курський, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

In the article the task of laser Doppler cooling of particles (atoms, ions and molecules), which has important applications for physics and metrology, is considered. It is shown that the laser cooling is the interaction process between a deterministic system of laser radiation and a chaotic system of moving particles. For monitoring and estimation of the cooling particles' parameters it's proposed to use the methods and instruments of Nonlinear Metrology that were designed for measurement of nonlinear dynamic systems parameters. The formula for estimating of the laser radiation Shannon entropy, as a function of a laser frequency, is obtained. The results allow to evaluate the change of the entropy of the cooling particles system after a given number of cycles "absorption — spontaneous emission of photons", which opens the new possibility for control of laser cooling process and estimate of temperature with small discrete values.

У роботі розглянуто задачу лазерного доплерівського охолодження частинок (атомів, іонів і молекул), яка має важливе прикладне значення для фізики і метрології. Показано, що лазерне охолодження є процесом взаємодії детермінованої системи лазерного випромінювання з хаотичною системою рухомих частинок. Для оцінки параметрів охолоджених часток і контролю процесу охолодження запропоновано використовувати методи та інструменти нелінійної метрології, розроблені для вимірювання параметрів нелінійних динамічних систем. Отримано вираз для оцінки ентропії лазерного випромінювання, як функцію частоти. Результати роботи дають можливість оцінки зміни ентропії системи охолоджених часток після заданої кількості циклів «поглинання — спонтанне випромінювання фотонів», що відкриває можливість контролю процесу охолодження та оцінки температури з малими дискретними значеннями.

Keywords: laser cooling, Nonlinear Metrology, Shannon entropy.

Ключові слова: лазерне охолодження, нелінійна метрологія, ентропія Шеннона.

The Introduction

One of the outstanding tasks in physics of the last quarter of the XX century was the task of cooling of gaseous substances to absolute zero temperature by braking the Brownian motion of particles (atoms, ions, molecules) using a laser radiation. The successful implementation of the cooling and retention of particles is important for physics, metrology and electronics. The particles, cooled to stop the thermal motion, can be observed more longer than moving particles, that is important for the high-resolution spectroscopy and the stabilization of laser frequency. When the temperature of particles' ensemble becomes close to 0oK it's possible to obtain the superfluidity status and the Bose-Einstein condensate, which can be used to create the quantum memory. The development of the cooling technology and retain of the cooled particles opens the new opportunities for metrological science to improve standard base, allows to obtain new reference points of frequency standards and improves the accuracy of global navigation systems. The perspective metrological tasks include the creating of optical clocks based on cooled single ions in electromagnetic traps and atoms trapped in the optical grid. It is assumed that the relative uncertainty of such clock frequency reaches values in 10⁻¹⁷–10⁻¹⁸ [1].



Yu. Machekhin



Yu. Kurskoy

The laser cooling process bases on quantum-mechanical ideas about the absorption and radiation of energy by particles. Localized moving particles are irradiated by laser radiation with a frequency that is lower than a frequency of the atomic transition by the Doppler shift quantity. The particle absorbs a photon, is transferred from the primary energy state to an excited energy state. The particle's speed changes by the quantity of the recoil velocity. Then a particle, returning to the ground state, emits a photon with a frequency greater than the frequency of the absorbed photon. This process causes the loss of energy, slowdown the particles and, consequently, the decrease of substance's temperature. Thus, an impulse of a photon is passed to a particle when stimulated absorption and subsequent spontaneous emission of a photon.

For the next «excitation — spontaneous emission of photon» cycle the laser radiation frequency is reduced, adjusts to the particles' velocity. For N cycles, the one particle loses the impulse equal $\Delta p = N\hbar k$, here $\hbar k$ — the impulse of a photon. The number of cycles and the frequency of the cooling radiation are determined by the electronic configuration and velocity of particles [2]. This is the first stage of the laser cooling — the «Doppler laser cooling». It allows reach the temperature at the hundreds of μK . For example, after Doppler cooling of the atoms of alkali metals their temperature is about $100 \mu\text{K}$. For more low temperatures other mechanisms of laser cooling are used: the subdoppler and cooling below the recoil level mechanisms. The minimum temperature at subdoppler colling atoms is about $1 \mu\text{K}$. Laser cooling below the one-photon level of recoil allows to obtain a temperature about 100 nK [3].

The theory of laser cooling and subsequent localization of the particles was proposed and developed by A. Letokhov and V Balykin in the 1970-s [4]. In 1997 S. Chu, C. Cohen-Tannoudji and W. Phillips were awarded the Nobel prize for research in the sphere of cooling and trapping of atoms using the laser technologies [5].

The practical realization of laser cooling and retaining of cooled particles requires a development of special methods for assessing and monitoring of particles' condition. The group of cooled particles may be represented in the form of an open nonlinear dynamic system with energy dissipation (NDS). Understanding of a specific character of such systems has led to create the methods and instruments of Nonlinear Metrology [6]. The universality of approaches, models and measurement instruments of variables of Nonlinear Metrology allows use them for measurement in various NDS physical and biological origin.

Like an important instrument of Nonlinear Metrology theory the information Shannon entropy is accepted. It's used like a degree of order or chaotic condition of a system. In the framework of Nonlinear Metrology theory proposed the entropy scales for assessment and management of NDS's parameters [7]. The application of this instrument for estimation of cooled particles parameters will improve the reliability of the received information and to ensure control and management of desired parameters.

The research of using the Nonlinear Metrology approaches and instruments for estimate of the particles' parameters during the Doppler laser cooling process is the task of this work.

The Interaction of Two Systems

Let consider the Doppler laser cooling process as the interaction of two corresponded systems. The first system is an ensemble of N localized particles of the same substance — the «atom» system. The «atom» system is characterized by the mean velocity of particles and by the temperature T , which related by next expression:

$$T = \frac{\pi m}{8R} \langle v \rangle^2, \quad (1)$$

here: m — the molecular mass of the particles; R — the universal gas constant.

If the «atom» system is in equilibrium, the velocity distribution of particle $p(v)$ is expressed by the Maxwell distribution law [8].

$$p(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[-\frac{mv^2}{2kT} \right] v^2. \quad (2)$$

here: k — the Boltzmann constant.

The Brownian motion of «atom» system's particles, absorption and emission of photons during the cooling process let describe such system like an open, chaotic and dissipative NDS [9].

The second system is a laser radiation that characterized by a radiation frequency f_0 and the radiation line broadening Δf_0 — the «laser» system. In this case, the frequency distribution of intensity obeys the normal law or the Gaussian distribution [10]:

$$p(f) = \frac{1}{\Delta f_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(f - f_0)^2}{2\Delta f_0^2} \right]. \quad (3)$$

The frequency stabilized laser radiation is characterized by a high degree of coherence $\Delta f_0 / f_0 = 1$ (in scientific laboratories values $\Delta f_0 / f_0$ obtained at special units reach $\sim 10^{-15} - 10^{-17}$). So the «laser» system can be described like a deterministic system. Its parameters stay in the certain frameworks during

the time of observation. The laser operates in a pulsed mode, the pulse duration is determined by the interaction of laser radiation with particles [4].

Let consider the interaction of two systems from the position of the Information theory of measurement. For control of the systems conditions let use the information Shannon entropy that associated with the probability density $p(X)$, here X — the researched variable, by next expression $H = -p(X) \ln p(X)$ [11]. As it was said before it's often used like a degree of order or chaotic condition of NDS. The minimal value the Shannon entropy takes in the case of the normal Gaussian distribution, the maximum value — in the case of the uniform distribution. The entropy of a laser radiation is small, in a case of monochromatic radiation it equates zero. The entropy of an ensemble of particles is determined by the Maxwell distribution. Its value is intermediate between the entropy values for the normal and uniform distributions.

At the initial moment of time the «atom» system is characterized by the average velocity of the particles v_0 , temperature T_0 , and entropy $H_A(v_0, t_0)$. The «laser» system is characterized by the frequency of radiation $f_0 \pm \Delta f_0$, and entropy $H_L(f_0, t_0)$. After stop of interaction at the moment of time $t = \tau$ the systems' parameters are changed. The velocity of the particles decreases, the frequency of the spontaneous emission f increases in comparison with the frequency f_0 , the spectral line of radiation Δf broadens. The «atom» system takes the next characteristics: v , T and $H_A(v, t)$; the «laser» system takes the next characteristics: $f \pm \Delta f$ and $H_L(f, \tau)$. This interaction continues for the number of cycles required to reach a given temperature of the material. For the «atom» system and the «laser» system the formulas for the Shannon entropy at the moments of time t_0 and τ have the next form:

$$\begin{aligned} H_A(v, t_0) &= -p(v_0) \ln p(v_0), \\ H_L(f, t_0) &= -p(f_0) \ln p(f_0), \end{aligned} \quad (4)$$

$$H_A(v, \tau) = -p(v) \ln p(v), \quad H_L(f, \tau) = -p(f) \ln p(f). \quad (5)$$

Here: $H_A(v, \tau) < H_A(v, t_0)$ and the «atom» system becomes more orderly; $H_L(f, \tau) > H_L(f, t_0)$ the «laser» system becomes more chaotic. This situation is caused by the dependence of the Shannon entropy from the distribution density functions and the interval of values. Thus, when particles emit the photons with the frequency higher than the frequency of absorbed photons the particles velocity decreases, the peak of the Maxwell distribution function (2) increases and displaces to the direction of the small velocities. The entropy of the «atom» system reduces. The peak of the distribution function for laser intensity shifts toward the higher frequencies and corresponds to the resonant transition

frequency for a given type of particles. Thus the value of Δf_0 increases in the due to the Doppler broadening, the value of line radiation broadening increases too.

The changing of systems conditions can be expressed using an information, which is acquired (information about the «atom» system I_A) or is lost (information about the «laser» system I_L) in the process of systems interaction [11]:

$$\begin{aligned} I_A &= H_A(v, t_0) - H_A(v, \tau) = \Delta H_A, \\ I_L &= H_L(f, t_0) - H_L(f, \tau) = \Delta H_L. \end{aligned} \quad (6)$$

Using the information conservation law according to which «the amount of information in a closed system remains constant» [11] from the (6) we obtain the equality:

$$|\Delta H_A| = |\Delta H_L|. \quad (7)$$

According to expression (7) the change of the «laser» system entropy by the module equals to the entropy change of the «atom» system. This equality allows analyzing the «laser» system settings change to estimate the parameters of the «atom» system.

The «atom» system entropy takes the minimum value $H_A(v) = 0$ in the case when a thermal motion of the particles stops. The expression (7) at any moment of time can be represented in the next form:

$$|\Delta H_A(\Delta T)| = |\Delta H_L(\Delta f)| \quad (8)$$

The expression (8) solution taking into account expressions (2), (3), (6) will allow to determine the connection between the entropy change of the «laser» system, the entropy and temperature of the «atom» system:

$$\Delta T = \Delta T [|\Delta H_L(\Delta f)|] \quad (9)$$

The expressions (3)–(9) allow to determine the entropy and temperature change of the «atom» system at the moments t_0 and τ the expression for the entropy difference (6) ΔH_L :

$$\begin{aligned} H_L(f, t_0) &= \ln(\Delta f_0 \sqrt{2\pi e}), \quad H_L(f, \tau) = \ln(\Delta f \sqrt{2\pi e}), \\ |\Delta H_L(\Delta f)| &= \left| \ln \frac{\Delta f_0}{\Delta f} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

Thus, the value of the «laser» system entropy depends of Δf changing (the value of the line radiation broadening). Measuring the frequency of spontaneous radiation and evaluating the entropy change (10) it's a possible to estimate the changes of entropy and temperature of the cooling particles system after any number of cycles «absorption – spontaneous emission of photons». It opens the new possibility for control of the cooling process and temperature estimates with small discrete values ΔT .

The Conclusions


The task of laser Doppler cooling of particles (atoms, ions and molecules), which has important

applications for physics and metrology, is considered. It is shown that the laser cooling is the interaction process between a deterministic system of laser radiation and a chaotic system of moving particles.

For monitoring and estimation of the cooling particles' parameters it's proposed to use the methods and instruments of Nonlinear Metrology that were designed for measurement of nonlinear dynamic systems parameters.

The formula for estimating of the laser radiation Shannon entropy, as a function of a laser frequency, is obtained. The results allow to evaluate the change of the entropy of the cooling particles system after a given number of cycles «absorption — spontaneous emission of photons», which opens the new possibility for control of laser cooling process and estimate of temperature with small discrete values.

References

1. Brazhnikov, D.V. Research of possibility of deep laser cooling of magnesium atoms for creating of new generation frequency standard. // Bulletin of NSU, Series «Physics», 2012, Vol. 7, Iss. 14, p.p. 6—18.
2. Letokhov V.S., Minogin V.G., Pavlik, B.D. Cooling and trapping of atoms and molecules by resonance laser field. // JETP. — 1977. — Vol. 72. — pp. 1328—1342.
3. Balykin A, Atom optics and its applications // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. — 2011. — Vol. 81, No. 4. — pp. 291—315.
4. Balykin V.I., Letokhov V.S., V.G. Minogin. Cooling of atoms by laser radiation pressure. // Phys.— 1985. — Vol. 147, Iss. 1. — p.p. 117—156.
5. D.W. Philips. Laser colling and trapping of neutral atoms. Nobel lecture. — 1997.
6. Machekhin Yu.P., Kurskoy Y.S. Fundamentals of nonlinear metrology. // LAP Lambert Academic Publishing. — 2014. — 240 p.
7. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Features of entropy analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems // Metrology and devices. — 2013 — Vol. 06 (44). — p.p. 17—21.
8. Klimontovich Yu.L. Statistical physics. — M.: Nauka, 1982. — 608 p.
9. Loskutov A.Yu. Charm of chaos // UFN. — 2010. — 180. — No. 12. — pp. 1304—1329.
10. Zvelto O. Principles of lasers. — M.: Lan, 2008, — 720 p.
11. Wolkenstein M.V. Entropy and information. — M.: Nauka, 1986. — 192 p. 

Отримано / received: 12.11.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.М. Одаренком (Україна).
Prof. E.M. Odarenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 53.083:621.2.08:658.56

АНАЛІЗ І СИНТЕЗ КВАЛІМЕТРИЧНИХ ШКАЛ

А. Мотало, кандидат технічних наук, начальник відділу,

Газопромислове управління «Львівгазвидобування»,

В. Мотало, доктор технічних наук, доцент кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології»,

Б. Стадник, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,

Національний університет «Львівська політехніка»

Розглянуто і проаналізовано основні питання теорії шкал вимірювань; види властивостей емпіричних об'єктів і відповідні їм шкали вимірювань; основні критерії систематизації шкал вимірювань: метрична детермінованість, форма отримання емпіричних даних і число відображуваних властивостей емпіричних об'єктів. Розроблено методологію синтезу кваліметричних шкал для отримання числових оцінок якості продукції. Вибір і використання тієї чи іншої шкали залежить від виду вимірюваної величини та способу отримання вимірювальної інформації.

The basic principles of the theory and systematization types of measurement scales are reviewed and analyzed. The area of modern metrology research extends to such sectors of human activity as medicine, trade, economy, industry, education, psychology, sociology, qualimetry etc., which significantly expanded the range of measured values. A major expansion of the range of measured values requires, in turn, improve the methodology of measurement scales synthesis for measuring these quantities, including issues of reproduction units and the creation of standards measured values.

Ключові слова: метрологія, кваліметрія, вимірювання, шкали вимірювань, кваліметричні шкали, шкали найменувань, шкали порядку, шкали інтервалів, шкали відношень, абсолютні шкали.

Keywords: metrology, qualimetry, measurements, measurement scales, qualimetric scales, nominal scales, ordinal scales, interval scales, ratio scales, absolute scales.

Питання означення та аналізу поняття «шкала вимірювань» як одного із ключових понять теорії вимірювань, трактування його суті та специфіки реалізації викликає зацікавленість і дослідження протягом всієї тисячолітньої історії розвитку метрології. Особливу актуальність ці питання набули сьогодні у зв'язку із введенням у метрологічну практику Міжнародного словника з метрології VIM3 [1], який відображає розвиток поняттєво-термінологічного забезпечення сучасної метрології й суттєво розширює сферу її досліджень, а також рекомендацій Міжнародного Комітету з мір та вагів щодо становлення нових завдань метрології в таких сферах людської діяльності, як медицина, торгівля, економіка, промисловість, освіта, психологія, соціологія, кваліметрія тощо [2].

The purpose of this paper is to analyze the modern theory of qualimetric scales and criteria for their organization, making recommendations on measurements methodology synthesis scales and their application for obtain of the numerical estimates of product quality.

The basic principles of systematization of measurement scales types are describes and analyses in this article. According to the metric determination, depending on the type of the investigated empirical object, in particular, of its properties, and therefore the type of measured value, measurement scales are divided into the following types: non-metric scales: nominal scales and ordinal scales; metric scales: intervals scales, ratios scales and absolute scales. According to the form of empirical data obtaining, measurement scales are divided into verbal, numerical and graphic. According to the number of the displayed properties of empirical objects, measurement scales are divided into one-dimensional and multidimensional.

The choice and application of the scale type and, therefore, methods of measurement, depends on the type of measured value and of the method of obtaining of the measurement information, i.e. of the way of comparison of the of the quantities sizes.



А. Мотало



В. Мотало



Б. Стадник

Насамперед йдеться стосовно розширеного трактування ключового поняття метрології — «вимірювання» і пов'язаних з ним понять «величина» та «вимірювана величина»:

- *вимірювання* (англ. — *measurement*) — процес експериментального визначення одного або декількох значень величини, які обґрунтовано можна приписати величині;

- *величина* (англ. — *quantity*) — властивість явища, тіла або речовини, яку можна визначити кількісно у виді числа із відмітною ознакою як основою для порівняння. Основою для порівняння може бути одиниця вимірювання (одиниця величини), методика вимірювання, стандартний зразок або їх комбінація.

- *вимірювана величина* (англ. — *measurand*) — величина, що підлягає вимірюванню.

Такий підхід до сфери дослідження сучасної метрології відображає відхід від звуженого зведення поняття вимірюваної величини до «фізичної величини» [3], оскільки фізична величина — лише одна із ряду можливих вимірюваних величин — фізичних, хімічних, біологічних, психологічних, соціологічних, економічних, оцінок якості продукції тощо [4]. Суттєве розширення номенклатури вимірюваних величин потребує, у свою чергу, вдосконалення методології синтезу шкал вимірювань цих величин, включно із питаннями відтворення одиниць вимірювань та еталонів величин. Вирішення цих питань необхідне, зокрема, для забезпечення єдності вимірювань у зазначених вище галузях знань відповідно до вимог Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [5], що обумовлює їх актуальність і зумовило тематику цієї роботи.

Одна з нових сфер дослідження сучасної метрології — *кваліметрія* — наукова галузь, яка виникла на рубежі 60-70-х років минулого століття як результат вимоги науково-технічного прогресу та інноваційних технологій у сфері пізнання фізичних явищ і процесів, предмет дослідження якої — методологія та проблематика кількісного оцінювання якості продукції [6]. Сьогодні у кваліметрії через специфічність об'єкта дослідження — *продукції* — маємо низку невирішених теоретичних і методологічних проблем, зокрема, проблему аналізу та синтезу кваліметричних шкал.

Мета цієї статті — аналіз сучасних шкал вимірювань та вироблення рекомендацій щодо методології синтезу кваліметричних шкал для отримання числових оцінок якості продукції.

Основні завдання досліджень роботи:

- аналіз основних питань теорії шкал вимірювань та критеріїв їх систематизації;

- аналіз властивостей емпіричних об'єктів як об'єктів дослідження кваліметрії;

- аналіз кваліметричних шкал та вироблення рекомендацій щодо їх використання.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТИПІВ ШКАЛ ВИМІРЮВАНЬ

1.1. Аналіз відомих означень поняття «шкала вимірювань»

У наукових роботах і чинних сьогодні довідкових та нормативних документах у сфері метрології є різні означення шкали вимірювань. Згідно з VIM3 [1] *шкала вимірювань* (*шкала значень величини, шкала величини*) (англ. — *measurement scale, quantity-value scale*) — упорядкований набір значень величин певного роду, використовуваний для ранжування відповідно до розміру величин цього роду. Згідно з ДСТУ 2681-94 [3] *шкала фізичної величини* (англ. — *reference-value scale of a quantity or property*) — послідовний ряд значень однорідних фізичних величин, присвоєних цим величинам відповідно до узгоджених правил. Отже, у найпростішому розумінні *шкала вимірювань* — це послідовний ряд значень однорідної фізичної величини, присвоєних цій величині відповідно до узгоджених правил. Наприклад, Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ), шкала міцності матеріалів тощо.

Більш узагальнене означення *шкали вимірювань* наведено у [7]. *Шкала вимірювань* — це відображення множини різних проявів кількісної або якісної властивості емпіричного об'єкта на прийняту за згодою упорядковану множину чисел або іншу систему логічно пов'язаних знаків (позначень). Такими системами знаків є, наприклад, множина позначень (назв) кольорів, множина балів оцінювання стану емпіричного об'єкта, множина класифікаційних символів тощо. Елементи множин прояву властивостей емпіричних об'єктів перебувають у певних логічних співвідношеннях між собою: співвідношення «еквівалентності» чи «рівності», співвідношення «відмінності» чи «подібності (близькості)» цих елементів; кількісних відмінностях — «більше», «менше»; можливості виконання операцій додавання, віднімання, множення та ділення елементів множин та ін. Ці особливості прояву властивостей емпіричних об'єктів і визначають типи відповідних їм шкал вимірювань.

У теорії вимірювань шкалою вимірювань у найзагальнішому розумінні вважають впорядковану систему $\{A; N; F\}$, де **A** — емпірична реляційна система (емпірична система з відношеннями); **N** — числова

реляційна система (числова система з відношеннями); F — ізоморфне або гомоморфне відображення $A \ll N$ [8].

1.2. Критерії класифікації типів шкал вимірювань

Усі відомі класифікації *типів* шкал вимірювань (вимірювальних шкал) [7—12], ґрунтуються на трактуванні поняття вимірювання, а також на взаємозв'язку між поняттями величина, вимірювана величина та вимірювання.

Одне із концептуальних понять у теорії шкал вимірювань — початкова точка відліку або «нуль» шкали: нульову точку шкали трактують як *точку рівноваги* — так званий «абсолютний нуль», наприклад, «нуль» на температурній шкалі Кельвіна, або як *точку віднесення* — так званий «умовний нуль», наприклад, 0°C на температурній шкалі Цельсія. Цю відмінність часто трактують як відмінність між послідовними значеннями величин, які об'єктивно мають певний мінімум, наприклад, температура, і не мають його, наприклад, час.

Важлива класифікаційна ознака шкал вимірювань, прийнята американським вченим Стенлі Стівенсом [10], — їх *метрична детермінованість*: метричні шкали — це шкали, які мають одиниці вимірювання (наприклад, метр, м/с), а неметричні — це шкали, які їх не мають. Інші важливі ознаки класифікації шкал вимірювань — форма отримання емпіричних даних і число відображуваних властивостей емпіричних об'єктів.

Отже, основні критерії класифікації шкали вимірювань:

- ♦ типи і властивості емпіричних об'єктів;
- ♦ види і властивості вимірюваних величин;
- ♦ способи порівняння розмірів величин;
- ♦ метрична детермінованість вимірюваних величин;
- ♦ форма отримання емпіричних даних;
- ♦ число відображуваних властивостей емпіричних об'єктів.

2. ТИПИ І ВЛАСТИВОСТІ ЕМПІРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1. Формальні та емпіричні об'єкти

Припустимо, що (X, Z) — незліченна множина властивостей емпіричних об'єктів X , які перебувають між собою в незліченній множині фактичних відношень, а (X_N, Z_N) — зліченна множина формальних об'єктів X_N , тобто числових характеристик властивостей, які перебувають між собою в зліченній множині відношень Z_N .

У цьому випадку *емпіричні об'єкти*, відображені числами:

* незліченна підмножина властивостей об'єктів $X_1 \in (X, Z)$;

* незліченна підмножина фактичної залежності між властивостями різних об'єктів $Z_1 \in (X, Z)$.

Формальні об'єкти, тобто результати відображення:

* зліченна підмножина сукупності чисел, які відображають властивості об'єктів $X_{1N} \in (X_N, Z_N)$;

* зліченна підмножина числової залежності Z_{1N} між числовими характеристиками властивостей об'єктів $Z_{1N} \in (X_N, Z_N)$.

Отже, *відображення числами* залежно від характеру об'єкта відображення можна розділити на *відображення властивостей* та *відображення залежності* між різними властивостями.

2.2. Властивості емпіричних об'єктів.

Співвідношення понять «властивість»

і «величина»

Об'єктом вимірювання чи досліджуваним об'єктом може бути будь-який емпіричний об'єкт: явище, тіло, речовина чи процес, — одна або декілька кількісних чи якісних властивостей якого підлягають вимірюванню. Об'єкти вимірювання, загалом, — це як фізичні, так і нефізичні об'єкти, біологічні, психологічні, соціальні, економічні тощо. Отже йдеться стосовно вимірювання як кількісних, так і якісних властивостей об'єктів. Оскільки, згідно з VIM3 [1] поняття «величина» не належить до якісних властивостей, описуваних шкалами найменувань, то поняття «властивість» загальніше порівняно із поняттям «величина» і повніше відтворює суть вимірювань у нефізичних сферах, тобто «нефізичних вимірювань» у сучасному розумінні.

Загалом, емпіричні об'єкти мають багато властивостей, які проявляються в тій чи іншій формі. Однак, серед великої різноманітності властивостей об'єктів у метрології встановлено три основні типи їх прояву — у відношенні *еквівалентності*, *порядку (рівня)* та *адитивності* [6], відповідні постулати яких наведено у табл. 1.

Відношення еквівалентності $R(\approx)$ — найзагальніша характеристика емпіричних об'єктів, коли певна властивість спільна для ряду об'єктів, тобто об'єкти можуть бути подібні або неподібні між собою, наприклад, різні види сигналів, різні типи систем вимірювальних механізмів аналогових електромеханічних вимірювальних приладів, показники якості продукції тощо. Відношення еквівалентності позначають символом $a \approx b$ або $\approx(a; b)$, а постулати, які його описують, наведені у табл. 1, п. 1.

Таблиця 1. Постулати відношення еквівалентності, порядку та адитивності

Table 1. Postulates of equivalence, order and additivity relations

1. Постулати відношення еквівалентності				
Назва постулату	Дихотомії (подібності або неподібності)	Симетричності (симетричність відношення еквівалентності)	Транзитивності за якістю (перехід відношення еквівалентності)	
Математична модель	Або $X(A) \approx X(B)$, або $X(A) \neq X(B)$	Якщо $X(A) \approx X(B)$, то $X(B) \approx X(A)$	Якщо $X(A) \approx X(B)$ і $X(B) \approx X(C)$, то $X(A) \approx X(C)$	
2. Постулати відношення порядку				
Назва постулату	Трихотомії	Антисиметричності	Транзитивності за інтенсивністю властивості (перехід відношення порядку)	
Математична модель	Або $X(A) \approx X(B)$, або $X(A) > X(B)$, або $X(A) < X(B)$	Якщо $X(A) > X(B)$, то $X(B) < X(A)$	Якщо $X(A) > X(B)$ і $X(B) > X(C)$, то $X(A) > X(C)$	
3. Постулати відношення адитивності				
Назва постулату	Монотонності (однонаправленості адитивності)	Комутативності (перемішуваності доданків)	Дистрибутивності (розподільчий закон)	Асоціативності (закон сполучності)
Математична модель	Якщо $X(A) = X(C)$ і $X(B) > 0$, то $X(A) + X(B) > X(C)$	$X(A) + X(B) =$ $= X(B) + X(A)$	$X(A) + X(B) =$ $= X(A + B)$	$[X(A) + X(B)] + X(C) =$ $= X(A) + [X(B) + X(C)]$

Відношення порядку (інтенсивності) $R(<)$ проявляється у тому разі, коли певна властивість більша або менша в різних об'єктах, наприклад, «більш тепле — менш тепле», «більш тверде — менш тверде» тощо. Постулати, які описують відношення порядку, наведені у табл. 1, п. 2.

Відношення адитивності $R(+)$ проявляється у тому, що над однорідними властивостями різних об'єктів можна виконувати арифметичні дії. Це, наприклад, електричні опори різних резисторів, маси різних гирьок тощо. Постулати, які описують відношення адитивності, наведені у табл. 1, п. 3.

2.3. Зв'язок властивостей емпіричних об'єктів і вимірюваних величин

Отже, як зазначено одним із засновників основ класичної теорії вимірювань англійським вченим-фізиком Н. Кемпбелом [10], залежно від прояву найзагальніших відношень еквівалентності, порядку та адитивності розрізняють три види властивостей емпіричних об'єктів і, відповідно, вимірюваних величин:

► $X_{екв}$ — властивості емпіричних об'єктів, які проявляють себе лише у відношенні еквівалентності. У кваліметрії це, наприклад, групи показників якості продукції, які утворюють сукупність класів еквівалентності, — показники функціональної придатності, технологічності, ресурсоощадності, надійності продукції тощо [13, 14];

► $X_{инт}$ — інтенсивні величини, які проявляють себе у відношеннях еквівалентності й порядку. У квалімет-

рії це, наприклад, коефіцієнти вагомості одиничних показників якості продукції, які відображають рівень впливу окремих показників на рівень якості продукції [14];

► $X_{екс}$ — екстенсивні величини, які проявляють себе у відношеннях еквівалентності, порядку та адитивності. У кваліметрії це, наприклад, рівень якості продукції, який є комплексною оцінкою її якості, а також властивості продукції — механічні, електричні, теплові тощо [4, 13].

2.4. Критерії класифікації типів шкал вимірювань залежно від прояву властивостей емпіричних об'єктів

Якщо властивість певного емпіричного об'єкта X_1 проявляється лише у відношенні еквівалентності, то залежність між елементами числових підмножин x_{1N_1} та x_{1N_2} (його відображеннями), відсутня, оскільки в цьому випадку кожна емпірична підмножина властивостей емпіричних об'єктів може бути відображена будь-якою числовою підмножиною. Шкалу вимірювань у цьому випадку називають шкалою найменувань (назв) або шкалою класифікацій.

Якщо властивість певного емпіричного об'єкта X_1 проявляється у відношенні еквівалентності й порядку, то шкала вимірювань — це залежність між його відображеннями x_{1N_1} та x_{1N_2} , яка є функцією, що монотонно спадає або зростає, тобто якщо $x'_1 > x''_1$, то $x'_{1N_1} > x''_{1N_1}$ і $x'_{1N_2} > x''_{1N_2}$. Шкалу вимірювань у цьому випадку називають шкалою порядку або ранговою шкалою.

Якщо властивість певного емпіричного об'єкта X_1 проявляється у всіх трьох відношеннях — *еквівалентності*, *порядку* та *адитивності*, то залежність між елементами числових підмножин x_{1N_1} та x_{1N_2} описується рівнянням $x_{1N_1} = \alpha \cdot x_{1N_2} + \beta$ у шкалі, яку називають *шкалою інтервалів*, та рівнянням $x_{1N_1} = \alpha \cdot x_{1N_2}$ у шкалі, яку називають *шкалою відношень* (тут α — безрозмірний коефіцієнт або масштаб шкали; β — початкова точка відліку шкали, яка має розмірність вимірюваної величини).

3. СПОСОБИ ПОРІВНЯННЯ РОЗМІРІВ ВЕЛИЧИН

Вибір і використання тієї чи іншої шкали і, відповідно, методику вимірювання залежать від виду вимірюваної величини та способу отримання вимірювальної інформації, тобто способу порівняння розмірів величин.

Згідно із *другою аксіомою* метрології вимірювання за своєю суттю полягає у порівнянні розмірів величин дослідним шляхом [11]. Загалом є три способи порівняння двох розмірів величини Q_i та Q_j між собою:

▲ порівняння розмірів величини Q_i та Q_j стосовно їх *еквівалентності* — однакові чи різні:

$$Q_i \geq Q_j; \quad (1)$$

► визначення *різниці* між розмірами величини Q_i та Q_j :

$$Q_i - Q_j = DQ_{i,j}; \quad (2)$$

► визначення *відношення* між розмірами величини Q_i та Q_j :

$$Q_i/Q_j = q_{i,j}. \quad (3)$$

4. КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ШКАЛ ВИМІРЮВАНЬ. КВАЛІМЕТРИЧНІ ШКАЛИ

4.1. Типи шкал вимірювань

Типи шкал вимірювань, систематизованих за розглянутими вище ознаками, наведено у табл. 2.

Загалом, більшість шкал, використовуваних у практичній метрології, змішані: вербально — числові, вербально — графічні, число — графо — вербальні тощо.

Важлива характеристика шкали вимірювань — її *специфікація*, прийнятий за згодою документ, який містить означення шкали та (або) описання правил та процедур відтворення цієї шкали або одиниці шкали, якщо вона існує [12].

4.2. Означення поняття

«кваліметрична шкала»

Насамперед слід зазначити, що сьогодні окремого трактування поняття «кваліметрична шкала», відмінного від загального поняття «шкала вимірювань» у метрологічній практиці немає. У роботах, тематика яких пов'язана з кваліметриєю, автори використовують загальну класифікацію шкал для визначення оцінок якості продукції [15, 16]. Це пояснюється тим, що кваліметричні дослідження безпосередньо ґрунтуються на наукових і практичних основах метрології, а кваліметричні вимірювання чи вимірювання у кваліметрії — одні з видів вимірювань [17]. Специфіка вимірювань у кваліметрії, насамперед, — необхідність встановлення виду вимірюваної величини, ординальна чи адитивна, і вибір відповідної шкали. Подальший аналіз характеристик кваліметричних шкал і рекомендації щодо їх використання у практичній кваліметрії здійснено, зважаючи на зазначені вище міркування.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЛІМЕТРИЧНИХ ШКАЛ

5.1. Шкали найменувань

(номінальні шкали, шкали класифікації)

(англ. — *nominal scales*)

Шкалу найменувань чи *номінальну шкалу* утворюють у тому разі, коли певна властивість емпіричних об'єктів проявляється лише у відношенні *еквівалентності* (табл. 1, п.1). Таку властивість можна відобразити будь-якою цифрою чи іншим знаком, що не містять жодної інформації щодо розміру величини, якій притаманна ця властивість. У разі використання шкал найменувань досліджувані

Таблиця 2. Класифікація типів шкал вимірювань

Table 2. The classification of types of measurement scales

Класифікаційні ознаки	Метрична детермінованість		Форма отримання емпіричних даних	Число відображуваних властивостей
Типи шкал	Неметричні шкали	Метричні шкали	♦ вербальні; ♦ числові; ♦ графічні	♦ одновимірні; ♦ багатовимірні
	♦ шкали найменувань (номінальні шкали); ♦ шкали порядку (ординальні шкали);	♦ шкали інтервалів; ♦ шкали відношень; ♦ абсолютні шкали		

Таблиця 3. Шкала найменувань показників якості природного газу

Table 3. Nominal scale of the quality parameters of natural gas

№, з/п	1	2	3	4	5	6	7
Позначення показника якості	$P_{b,1} = P_{b,H_H}$, МДж/м ³	$P_{b,2} = P_{b,B}$, МДж/м ³	$P_{b,3} = P_{b,\rho}$, кг/м ³	$P_{b,4} = P_{b,W}$, г/м ³	$P_{b,5} = P_{b,C_{N_2}}$, %	$P_{b,6} = P_{b,C_{CO_2}}$, %	$P_{b,7} = P_{b,C_{H_2S}}$, г/м ³

об'єкти розділяють на непересічні підмножини, порівнюють один з одним і визначають їх *еквівалентність* — *нееквівалентність*. У результаті цієї процедури утворюється сукупність класів еквівалентності. Шкали найменувань використовують за вимірювань таких об'єктивних ознак, як запахи, кольори, групи крові, фізико-хімічні властивості об'єктів, компонентний склад речовин тощо.

У кваліметрії шкали найменувань доцільно використовувати для формування *номенклатури показників якості* досліджуваної продукції, необхідних для визначення рівня її якості. Наприклад, у табл. 3 наведено шкалу найменувань абсолютних базових показників якості природного газу $P_{b,i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $n = 7$), що відповідають 7-ми найважливішим властивостям газу, за якими визначають рівень якості газу як енергоносія: питома об'ємна теплота згоряння газу, нижча H_H , МДж/м³; число Воббе B , МДж/м³; густина газу ρ , кг/м³; абсолютна вологість газу W , г/м³; концентрація азоту C_{N_2} , %; концентрація вуглекислого газу C_{CO_2} , %; вміст сірководню C_{H_2S} , г/м³ [18].

Інформативний параметр такої шкали — лише число показників якості (сім), а послідовність їх розміщення і відповідне позначення порядковим номером не має ніякого значення.

Ключові ознаки шкал найменувань: неприйнятність (відсутність) поняття «нуля» та «одиниці вимірювання» і, відповідно, «розмірності» величини; відсутність будь-яких арифметичних операцій; недопустимість зміни специфікацій, які описують окремі шкали; допустимість лише ізоморфних (еквівалентних) перетворень, а також деяких статистичних операцій за опрацювання результатів вимірювань у цих шкалах, наприклад, визначення модального або найчисленнішого за результатами вимірювання класу еквівалентності.

Операції, допустимі у шкалах найменувань за опрацювання результатів вимірювань: набір членів та їх класифікація; категорії рівності та еквівалентності; адекватна статистика — мода як оцінка центрування, тобто відображення найчисленнішого за результатами вимірювань класу еквівалентності.

5.2. Шкали порядку (ординальні шкали, рангові шкали) (англ. — ordinal scales)

Шкалу порядку (ординальну шкалу, рангову шкалу) утворюють у тому разі, коли певна властивість емпіричних об'єктів проявляється у відношеннях *еквівалентності* й *порядку (рівня)* (табл. 1, п. 2). Шкали порядку використовують для порівняння розмірів порядкових величин відповідно до (1). *Порядкова величина* (англ. — ordinal quantity) — величина, визначена за узгодженою методикою вимірювання і для якої можна встановити у відповідності з її розміром загальне порядкове співвідношення з іншими.

Розміщені за порядком зростання або зменшення, тобто за рангом, розміри вимірюваних величин Q_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, власне, і становлять шкалу порядку (ординальну шкалу):

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_n. \quad (4)$$

Стосовно розмірів величини Q_i відомо, що один із них завжди менший від наступного і більший від попереднього, але самі розміри невідомі. Шкали порядку дають змогу визначати ступінь вираження ознаки і повинні містити не менше 3-х класів, які утворюють послідовність: *погано* — *середньо* — *добре*.

Для вдосконалення вимірювань за допомогою порядкових шкал точки на них фіксують як *опорні (реперні)* і присвоюють їм певні цифри, які називають *балами*, а вимірювальну шкалу, утворену із використанням реперних точок, називають *реперною шкалою порядку* або *реперною ранговою шкалою*.

У кваліметрії шкали найменувань доцільно використовувати для ранжування нормалізованих коефіцієнтів вагомості показників якості досліджуваної продукції m_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ (тут n — число показників якості), тобто $m_1 < m_2 < m_3 < \dots < m_n$ [17, 18].

Основний недолік реперних рангових шкал — невизначеність розмірів інтервалів між реперними точками. Тому відповідні бали не можна піддавати математичним операціям — додавати, віднімати, ділити, перемножувати тощо.

Ключові ознаки шкал порядку: неприйнятність (відсутність) понять «одиниці вимірювання» та «розмірності»; необов'язковість наявності

«нуля» шкали, тобто «нуль» може бути у шкалі порядку або може не бути; допустимість будь-яких монотонних перетворень; недопустимість зміни специфікацій, які описують окремі шкали. Результати вимірювань у шкалах порядку виражають у балах, ступенях або рівнях, які можна позначити дискретними рядами натуральних чисел (у числових шкалах порядку). Властивості *трихотомії* і *транзитивності* показують, що на шкалах порядку можна виконувати *логічні операції*.

Операції, допустимі у шкалах порядку за опрацювання результатів вимірювань: набір членів та їх класифікація; категорії еквівалентності та порядку; адекватні *статистики* — оцінки центрування *мода* і *медіана*, тобто певна $(k+1)$ -та величина серед $n = 2k+1$ величин, розміщених за зростанням; *розмах вибірки* як характеристика розкиду і оцінка непевності (невизначеності) отриманого результату; відносна частість появи і порядкова кореляція випадкових величин. Однак отримання середнього значення як оцінки центрування неможливе.

5.3. Шкали інтервалів (англ. — interval scales)

Значно досконаліші шкали, утворені зі строго визначених інтервалів, тобто так звані *шкали інтервалів*, які описуються рівнянням (2): $Q_i - Q_j = \Delta Q_{i,j}$, а інтервал $\Delta Q_{i,j}$ між розмірами величини Q_i та Q_j точно відомий. *Шкали інтервалів*, які умовно позначають знаком $\Delta Q_{i,j}$, утворюють у тому разі, коли певна властивість емпіричних об'єктів проявляється у відношеннях *еквівалентності*, *порядку* та *адитивності* (табл. 1, п. 3) і можна встановити *масштаб* величини. Також на шкалі інтервалів встановлюють прийнятий за згодою «умовний нуль», тобто початок відліку значень величини. Наприклад, у температурних шкалах Цельсія та Реомюра за початок відліку або «умовний нуль» (0°C) прийнято температуру танення льоду, у шкалі Фаренгейта — температуру суміші льоду з сіллю та нашатирем. Це дає змогу встановити на шкалі інтервалів «*одиницю*» величини та її «*розмірність*», що характеризує таку шкалу як *метричну*.

На шкалі інтервалів можна виконувати лише *адитивні* математичні операції — додавання та віднімання. Отримати інформацію, у скільки разів один розмір *більший* чи *менший* від іншого, на шкалі інтервалів неможливо, оскільки на ній строго відомий лише масштаб величини, а початок відліку вибрано довільно. Тому визначити за шкалою інтервалів абсолютне значення розміру вимірюваної величини неможливо, що є її суттєвим недоліком.

У *кваліметрії* шкали інтервалів доцільно використовувати для визначення рівня якості досліджуваної продукції Q [17]. Значення рівня якості досліджуваної продукції Q , визначене за шкалою інтервалів, змінюється від 0 до 1 або від 0 до 100 %, що дає змогу визначати різницю $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ між рівнями продукції Q_1 та Q_2 . Наприклад, значення рівня якості природного газу як енергоносія, визначене за методологією кваліметричних вимірювань [18], до його осушування та очищення $Q_1 = 0,813$ або $Q_1 = 81,3\%$, а після осушування та очищення $Q_2 = 0,95$ або $Q_2 = 95\%$. Отже, операції осушування та очищення газу дають змогу підвищити рівень якості природного газу на $\Delta Q = 0,137$ або $\Delta Q = 13,7\%$. (*Примітка.* У цьому аналізі нульове значення рівня якості газу прийнято умовно на основі аналізу чинних НД стосовно нормування фізико-хімічних властивостей природного газу [18]).

Ключові ознаки шкал інтервалів: наявність установлених за згодою «умовного нуля» та «*одиниці вимірювання*»; прийнятність поняття «*розмірності*»; допустимість лінійних перетворень; допустимість зміни специфікацій, які описують окремі шкали.

Операції, допустимі у шкалах інтервалів за опрацювання результатів: набір членів та їх класифікація; категорії еквівалентності, порядку та адитивності; *математичні операції*: додавання і віднімання, а також логарифмування; адекватні *статистики*: оцінки *центрування* — мода і медіана, а також середнє арифметичне; оцінки *розсіювання* — дисперсія та стандартне відхилення; *стандартна невизначеність* (*непевність*) як оцінка точності отриманого результату вимірювання; відносна частість появи і лінійна кореляція випадкових величин.

5.4. Шкали відношень (англ. — ratio scales)

Якщо у шкалі інтервалів за початок відліку вибрати таку реперну точку, в якій розмір величини дійсно дорівнює нулю, а не приймається умовно, то за такою шкалою можна визначити абсолютне значення розміру і не лише наскільки один розмір більший (менший) від іншого, але й, відповідно до (3), у скільки разів він більший (менший); а така шкала називається *шкалою відношень*. Отже, *шкалу відношень* утворюють у тому разі, коли певна властивість емпіричних об'єктів проявляється у відношеннях *еквівалентності*, *порядку* та *адитивності* (табл. 1, п.3), а за початок відліку прийнято реперну точку з дійсно *нульовим розміром* величини. Приклад шкали відношень — температурна шкала Кельвіна. У ній за початок відліку, як вже

Таблиця 4. Вербально-числова шкала Харрінгтона

Table 4. Verbal-numerical Harrington scale

Змістовне описання	Дуже низький рівень	Низький рівень	Середній рівень	Високий рівень	Дуже високий рівень
Числове значення	0,00 — 0,20	0,20 — 0,37	0,37 — 0,64	0,64 — 0,80	0,80 — 1,00

зазначено вище, прийнято «абсолютний нуль» температури, за якого припиняється тепловий рух молекул. Шкали відношень — найдосконаліші, найінформативніші та найпоширеніші з усіх вимірювальних шкал. На них можна виконувати всі арифметичні операції: додавання, віднімання, множення та ділення. У зв'язку з цим шкали відношень широко використовують у метрології, зокрема, для вимірювань електричних величин: сили струму, напруги, електричного опору тощо. Однак, на жаль, побудова шкал відношень не завжди можлива. Час, наприклад, можна вимірювати лише за шкалою інтервалів.

Шкали відношень, в яких не має сенсу операція «підсумовування», називаються *пропорційними* шкалами відношень або шкалами відношень 1-го роду. Шкали відношень, в яких операція «підсумовування» має сенс, називаються *адитивними* шкалами відношень або шкалами відношень 2-го роду. Наприклад, шкала термодинамічних температур — пропорційна, а шкали маси чи сили стуму — адитивні.

У *кваліметрії* шкали інтервалів використовують для визначення значень абсолютних оцінюваних показників якості продукції P_{oi} , $i = 1, 2, \dots, n$, які є числовими оцінками (результатами вимірювання) відповідних властивостей досліджуваної продукції.

Ключові ознаки шкал відношень: наявність природних, тобто незалежних від прийнятої системи одиниць, «абсолютного нуля» та арифметичної «одиниці вимірювання»; використання поняття «розмірності»; допустимість лінійних та нелінійних перетворень; допустимість зміни специфікацій, які описують окремі шкали.

Операції, допустимі у шкалах відношень за опрацювання результатів вимірювань: набір членів та їх класифікація; категорії еквівалентності, порядку та адитивності; *математичні операції*: додавання, віднімання, множення і ділення, а також логарифмування; *адекватні статистики*: оцінки *центрування*: мода, медіана і середнє арифметичне, а також середнє геометричне і середнє гармонійне; оцінки *розсіювання*: дисперсія та стандартне відхилення; *стандартна невизначеність (непевність)* як оцінка точності отриманого результату вимірювання; відносна частість появи і лінійна кореляція випадкових величин.

5.5. Абсолютні шкали (англ. — absolute scales)

Абсолютна шкала — це шкала відношень (пропорційна чи адитивна) *безрозмірної* величини. Результати вимірювань в абсолютних шкалах можна виражати не лише в арифметичних одиницях, але й у процентах, мільйонних частках (р.р.м.), проміле, бітах, байтах та децибелах. Абсолютні шкали використовують для вимірювання відносних величин, тобто відношень однойменних величин. Наприклад, це *шкали коефіцієнтів* підсилення, ослаблення, відбиття, поглинання, корисної дії, нелінійних спотворень тощо; *шкали відносної* діелектричної та магнітної проникності; *шкали добротності* індуктивних елементів та коливних систем; *шкали вологості* тощо.

5.6. Вербально-числові шкали (англ. — verbal-numerical scales)

До складу вербально-числової шкали входять змістове (словесне) описання виділених градацій і відповідні їм числові значення. Найвідоміша вербально-числова шкала — шкала Харрінгтона [19], зображена у табл. 4.

Визначення числових значень градацій шкали здійснюють шляхом так званої *арифметизації* вербальних шкал, яка полягає у присвоєнні відповідних дійсних чисел градаціям шкали зі збереженням заданих відношень. Відповідність між множиною градацій шкали і множиною дійсних чисел, що задає *арифметизацію* вербальної шкали, — гомоморфізм емпіричної системи у числову. Процедура арифметизації вербальних шкал особливо часто використовують для синтезу ординальних шкал для отримання оцінок якості об'єктів складної структури [16, 20].

ВИСНОВКИ

1. Суттєве розширення номенклатури вимірюваних величин, зумовлене становленням нових задач метрології в таких сферах людської діяльності, як кваліметрія, медицина, торгівля, економіка, промисловість, освіта, психологія, соціальна сфера тощо, потребує вдосконалення методології синтезу шкал вимірювань цих величин, включно із питаннями відтворення одиниць вимірювань та еталонів величин.


2. Кваліметричні шкали, які використовуються для отримання оцінок якості продукції, входять до загальної структури шкал вимірювань, й їх аналіз та синтез здійснено на основі загальної методології систематизації та синтезу шкал вимірювань.

3. Вибір і використання тієї чи іншої шкали і, відповідно, методики вимірювання залежить від влас-

тивостей емпіричних об'єктів, виду вимірюваної величини та способу отримання вимірювальної інформації, тобто способу порівняння розмірів величин.

4. Питання методології систематизації та синтезу шкал вимірювань потребує подальшого дослідження, зокрема, глибшого математичного аналізу точності шкал вимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms (VIM3). JCGM 200:2012 (E/F). — 90 p.
2. Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of the BIPM. A report prepared by the CIPM for the governments of the Member States of the Metre Convention. — Intergovernmental Organization of the Metre Convention, 2007. — 164 p.
3. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. — [Чинний від 1995-01-01]. — Київ: Держстандарт України (Metrology. Terms and Definitions: DSTU 2681-94. — [In force of 1996-01-01]. — Kyiv: State Standard of Ukraine), 1994. — 68 с/р. — (Державний стандарт України) (State Standard of Ukraine).
4. Мотало В.П. Аналіз основних проблем теорії кваліметричних вимірювань / В.П. Мотало, А.В. Мотало // Стандартизація, сертифікація, якість (Motalo V.P. Analysis of the main problems of qualimetric measurements theory / V.P. Motalo, A.V. Motalo // Standardization, certification, quality). — 2011. — № 1. — С/Р. 60—64.
5. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», № 1314-VII від 05.06.2014р. / Верховна Рада України. — Офіц. вид. — К.: Парлам. вид-во (The Law of Ukraine «On metrology and metrological activity», №1314-VII of 05.06.2014 year / Verkhovna Rada of Ukraine. — Official kind. — K.: Parliament publishing house), 2014. — 28 с. — (Бібліотека офіційних видань). — (Закон України) ((Library official publications). — (The Law of Ukraine)).
6. Азгальдов Г.Г. Кваліметрія — наука об измерении качества / Г.Г. Азгальдов, А.В. Гличев, З.Н. Крапивенский // Стандарты и качество (Azhdalov G.G. Qualimetry — the science of the quality measuring / G.G. Azgaldov, A.V. Glitchov, Z.N. Krapivenskiy // «Standards and Quality»). — 1968. — № 1. — С/Р. 34—40.
7. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. — К.: Вища школа (Ornatskiy P.P. Theoretical Foundations of information and measuring equipment / P.P. Ornatskiy. — Kyiv: «Vishcha Shkola»), 1983. — 455 с/р.
8. Берка К. Измерения: понятия, теории, проблемы / К. Берка. — Пер. с чеш. К. И. Иванова. — М.: Прогресс (Berka K. Measurements: concept, theory, problems / K. Berka. — Moscow: «Progres»), 1987. — 320 с/р.
9. Пфанцагль И. Теория измерений / И. Пфанцагль. — Пер. с англ. В. Б. Кузьмина. — М.: Мир (Pfanzagl J. Theory of measurement / J. Pfanzagl. — Moscow: «Mir»), 1976. — 166 с/р.
10. Stevens S.S. Philosophy of Science: On the theory of scales of measurement. — Cleveland — New York, Science, 1946.
11. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд. / И.Ф. Шишкин. — СПб.: Питер (Shishkin I.F. Theoretical metrology. Part 1: General theory of measurement. Textbook for universities. 4th ed. / I.F. Shishkin. — SPb.: «Peter»), 2010. — 192 с/р.
12. Шкалы измерений. Термины и определения: ГСИ. РМГ 83-2007. — [Дата введения — 2008-08-01]. — М.: Стандартиформ (Scales of measurements. Terms and Definitions: RMG 83-2007. — [In force of 2008-08-01]. — Moscow: «Standartinform»), 2008. — 24 с/р. — (Рекомендации) ((References on interstate standardization)).
13. Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення: ДСТУ 2925-94. — [Чинний від 1996-01-01]. — К.: Держстандарт України (Product quality. Estimation of quality. Terms and definitions: DSTU 2925-94. — [In force of 1996-01-01]. — Kyiv: State Standard of Ukraine), 1995. — 27 с/р. — (Державний стандарт України) ((State Standard of Ukraine)).
14. Методи та засоби визначення показників якості продукції: [навчальний посібник] / [Т.З. Бубела, П.Г. Столярчук, Є.В. Походило та ін.] — Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка» (Methods and means for determining of the quality parameters: [Textbook] / [T.Z. Bubela, P.G. Stolyarchuk, E.V. Pokhodylo et al.] — Lviv: Publishing House of the Lviv Polytechnic National University), 2012. — 292 с/р.
15. Азгальдов Г.Г. Кваліметрія для всех: Учебн. пособие / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин. — М.: ИД ИнформЗнание (Azhdalov G.G. Qualimetry for anybody/ G.G. Azhdalov, A.V. Kostin. — Moscow: «Standard publishing house»), 2012. — 165 с/р.
16. Хованов Н.В. Математические основы теории шкал измерений качества/ Н.В. Хованов. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та (Hovanov N.V. Mathematical foundations of the theory of quality measurement scales / N.V. Hovanov. — Leningrad: «University Press»), 1982. — 188 с/р.
17. Мотало В.П. Використання методології багатовимірної шкалювання у кваліметричних вимірюваннях / В.П. Мотало // Метрологія та прилади (Motalo V.P. Using of the methodology of multidimensional scaling in the qualimetric measurements / V.P. Motalo // «Metrology and Instruments»), 2012. — № 3 — С/Р. 61—66.
18. Мотало А.В. Определение качества природного газа как источника энергии по методологии кваліметрических измерений / А.В. Мотало, В.П. Мотало // Мир измерений (Motalo A.V. Determination of the quality of natural gas as an energy source for the qualimetric measurement methodology / A.V. Motalo, V.P. Motalo // «Mir of measurements»). — 2014. — № 5. — С/Р. 37—44.
19. Орлов А.И. Прикладная статистика / А.И. Орлов. — М.: Экзамен (A.I. Orlov. Applied Statistics / A.I. Orlov. — Moscow: «Examination»), 2006. — 672 с/р.
20. Редьога Ю.В. Арифметизация ординальных шкал вимірювання якості програмних засобів / Ю.В. Редьога, Н.А. Яремчук // Інформаційні системи, механіка та керування: науково-технічний збірник (Redyoha O.Y. Aryfmetyzatsiya of the ordinal scales for the quality measurement of software / O.Y. Redoha, N.A. Yaremchuk // «Information systems, mechanics and management: scientific and technical collection»). — 2011. — Вип. 7. — С/Р. 5—15. 

Отримано / received: 03.12.2015.

Стаття рекомендована до публікації проф. Є.В. Походилом (Україна).

Prof. Ye. V. Pokhodulo, Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 669.35:669.788

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ВОДНЮ В МІДНИХ СПЛАВАХ

М. Калинюк, кандидат технічних наук, завідувач лабораторії,
Л. Адєєва, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Р. Козін, молодший науковий співробітник,
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ

Представлено літературний огляд робіт з вивчення впливу водню та кисню на якість міді та її сплавів і методів визначення вмісту водню та кисню в цих сплавах. Розроблено методи визначення вмісту водню в мідних сплавах. Наведено основні чинники, що впливають на правильність результатів аналізів мідних сплавів на вміст водню.

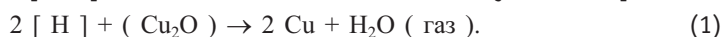
Literature review of the articles about investigation of hydrogen and oxygen influence on quality of copper and its alloys and methods of the determination hydrogen and oxygen contents in that alloys are presented. Methods of the determination of hydrogen content in copper alloys are prepared. Main causes, that influences on correct results of the analysis of copper alloys on hydrogen content, are led.

Ключові слова: Водень, кисень, мідь, визначення, сплави.
Keywords: Hydrogen, oxygen, copper, determination, alloys.

Існує велика бібліографія з вивчення взаємодії водню та кисню з міддю (розчинності, дифузії, утворення сполук) та впливу цих елементів на якість мідних сплавів [1—6]. За температури плавлення тверда мідь розчиняє 0,00018 % мас. водню, а розплавлена — 0,00054 % мас. [3, 4]. Мідь створює з киснем тверді та рідкі розчини та два оксиди (закис Cu_2O та окис CuO). Розчинність кисню в твердій міді — від 0,0032 до 0,01 % мас. за 900 °С. У розплавленій міді розчиняються значно більші кількості кисню (до 0,03 % мас.) [5, 6]. Розбіжності в кількісній оцінці розчинності водню та кисню в міді, наявні в літературі, зумовлені різним ступенем чистоти металу.

Водень — винуватець більшості дефектів міді та її сплавів (литого та деформованого металу, а також зварних з'єднань):

1. *Водневої крихкості першого роду* — водневої хвороби міді [1, 2, 7—9]. Вона виникає в результаті взаємодії розчиненого в міді водню із закисом міді, що міститься в металі у виді неметалевих включень, з утворенням пари води високого тиску на поверхні розділу фаз «метал — закис міді». Це сприяє утворенню субмікроскопічних та мікроскопічних несуцільностей, газових пор та тріщин. Взаємодія водню з киснем відбувається за реакцією:



Вирішальне значення має не стільки визначений аналізом середній вміст кисню, скільки його фактичне розподілення у виді закису міді за межами зерен.

2. *Водневої крихкості другого роду*, зумовленої молекулярним воднем [1—4, 7—9]:

а. *первинна газова пористість* утворюється через виділення молекулярного водню із розплаву міді та в процесі її кристалізації. За $T_{\text{пл}}$ тверда мідь розчиняє майже у 3 рази менше водню, ніж розплавлена;



М. Калинюк



Л. Адєєва



Р. Козін

б. вторинна газова пористість спричиняється розпадом пересичених воднем твердих розчинів з утворенням дрібних субмікроскопічних пор, заповнених воднем. Вони значно менші від первинних пор і мають майже сферичну форму.

Газова пористість — характерний дефект зварних з'єднань та литого металу [7, 10, 11].

Методики визначення вмісту водню і кисню в міді та її сплавах наведено в роботах [12, 13, 21–35 (кисень); 12–20, 34–37 (водень)]. Часто ці елементи визначають одночасно з однієї проби:

1) *Визначення вмісту кисню:*

- плавленням у вакуумі:
без ванни — [12, 13, 28, 30, 33],
з Al — ванною — [34, 35];
- плавленням у потоці газу-носія — [12, 24, 28];
- хімічним методом — [28, 29, 33];
- електрохімічним методом — [27];
- спалюванням у потоці водню — [26];
- металографічним методом — [30–32];
- активаційними методами — [21–23].

2) *Визначення вмісту водню:*

- * нагріванням у вакуумі — [12, 15, 16, 19];
- * плавленням у вакуумі:
без ванни — [12–15, 20, 34],
з Sn — ванною — [10, 12, 16, 35],
з Al — ванною — [35–37];
- * плавленням в потоці газу-носія — [12, 17, 18];
- * екстракцією з розплавленої міді — [12, 19, 20];
- * спалюванням у потоці кисню — [2, 12].

Автори роботи [12] порівняли результати, отримані методами вакуумного нагрівання та розчинення зразків міді в олов'яній ванні, і показали, що останній метод забезпечує більш повну екстракцію водню з міді та меншу тривалість аналізу (15–20 хвилин). Визначення водню в міді шляхом плавлення зразка краще, ніж за нагрівання, оскільки плавлення дає вищу продуктивність аналізів та повноту видалення водню [16].

Для визначення вмісту водню в мідних сплавах використовують кварцові та керамічні [12–16, 19–37] або графітові [17, 18] тиглі. Вміст кисню в мідних сплавах визначають у графітових тиглях.

В Інституті електрозварювання Національної академії наук України вміст газів у мідних сплавах визначають методом відновлювального плавлення проби в потоці газу-носія на аналізаторах RH — 2, — 3, — 402 (водень) та TC — 436, RO — 316 (кисень) фірми «LECO» (США), а раніше — методами вакуум — плавлення (кисень, водень) та нагрівання (водень) на аналізаторі VH — 8 фірми «Leybold — Heraeus» (Німеччина) з використанням графітових

тиглів та на саморобних приладах — у кварцових тиглях. Мідні зразки плавлять за 1200 °С, а нагрівають — за 800 °С. Вміст водню в мідних сплавах, який визначали методом нагрівання в графітових тиглях у вакуумі чи в потоці газу-носія, завжди був нижчим, ніж за плавлення. Під час аналізу мідних сплавів у кварцових тиглях часто взагалі не фіксували наявності водню ні за нагрівання, ні за плавлення аналітичного зразка. Літературних посилань з цього питання не знайдено.

Ось чому виникла необхідність вирішити ці прогалини в результатах аналізів міді та її сплавів на вміст водню.

АНАЛІЗАТОРИ ТА МЕТАЛИ,

ВИКОРИСТАНІ В РОБОТІ

1. Мідь і бронза у виді дрітків діаметром 2 мм з вмістом кисню згідно з ДСТУ 859 — 2001 (Мідь. Марки та ОСТ 90054 — 72 (Бронзи):

а. мідь M00 — < 0,03 % мас.

б. мідь M16 — < 0,003 % мас.

в. бронза БрХ — < 0,002 % мас.

2. Стандартні зразки України з міді на вміст кисню та водню, які мають міжнародну сертифікацію:

а) ДСЗУ CRM MQ CA 021

кисень — $(0,0074 \pm 0,0005) \%$ мас., водень — $(0,00019 \pm 0,00002) \%$ мас.

б) ДСЗУ CRM MQ CA 023

кисень — $(0,0158 \pm 0,0003) \%$ мас., водень — $(0,00021 \pm 0,00002) \%$ мас.

3. Аналізатори фірми «LECO» (США) для визначення вмісту:

а) кисню — TC — 436, RO — 316,

б) водню — RH — 2, RH — 3, RH — 402,

в) вуглецю — CS — 600.

ПІДГОТУВАННЯ МІДІ

ТА БРОНЗИ ДО АНАЛІЗІВ

Виготовлення аналітичних зразків проводили у такий спосіб. Мідні або бронзові дріткі затискали в цангу гнучкого валу електричного точила TE 75 (до 10000 об/хв.) і без перегрівання зачищали терпугом з дрібною насічкою. Гострозубцями відрізали аналітичні зразки довжиною ~10 мм. Ці зразки промивали в етиловому спирті та ацетоні, сушили в струмені теплового повітря. Стандартні зразки ДСЗУ постачаються у виді циліндрів діаметром ~3 мм, довжиною ~(8...9) мм, готовими до використання. Зразки мідного та бронзового дрітків до аналізів зберігали в екзикаторі, який заповнювали осушеними повітрям або аргоном.

ПІДГОТУВАННЯ ГРАФІТОВИХ ТИГЛІВ І ГАЗУ-НОСІЯ ДО АНАЛІЗІВ

У аналізаторах RH — 2, — 3, — 402 порожні графітові тиглі звичайно дегазують у високочастотному індукторі ~60 с за температури ~2000 °C. Після виключення нагрівання тигель піднімають під шлюз. Температура тиглю в цей час за нашими спостереженнями дорівнює ~300 °C (олово плавиться). Аналітичну пробу скидають у тигель (на RH — 2, — 3 вручну, а на RH — 402 автоматично). Для проведення аналізу тигель зі зразком опускають у зону високочастотного індуктора (у зону нагрівання). Час з моменту піднімання тигля під шлюз, розміщення в ньому зразка та опускання його в зону нагрівання дорівнює ~30 с. Щоби унеможливити видалення водню зі зразка під час цієї процедури, проведено експерименти з додатковим охолодженням графітового тигля ~10 хв до моменту піднімання тигля або з використанням попередньо дегазованого «холодного» тигля.

Газ-носії — азот (99,998% об.) додатково очищали від домішок O₂, H₂O, H₂, щоби усунути мож-

ливий їхній вплив на видалення водню з аналізованого зразка.

Використовували графітові кришки на графітові тиглі, щоб запобігти можливому вилученню водню у виді води з аналітичного зразка міді або бронзи.

Математичне опрацювання результатів аналізів проводили згідно з рекомендаціями роботи [38].

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

а) Аналіз міді та бронзи на вміст водню

На приладах TC — 436, RO — 316 фірми «LECO» (США) визначено вміст кисню в мідному та бронзовому дротах:

M00 — (0,0265 ± 0,0111) % мас.

M16 — (0,0033 ± 0,0008) % мас.

BrX — (0,0018 ± 0,0009) % мас.

У таблиці 1 наведено результати визначення вмісту водню в міді (стандарти України, M00, M16) і бронзі BrX. Основну частину експериментів проведено на міді M00 з використанням додаткового очищення азоту, охолодження графітових тиглів

Таблиця 1. Вміст водню в міді та бронзі, % мас. × 10⁻⁴

Table 1. Hydrogen content in copper and bronze, % mas. × 10⁻⁴

Метал	Аналізатор, принцип нагрівання, газ-носії (вакуум), матеріал тигля		<i>T</i> аналізу,°C	<i>n</i> *	Вміст водню
Мідь М00	VН — 8 фірма «Leybold — Heraeus» вакуум, піч опору, графіт. тигель		800	18	0,5 ± 0,2
			1200	20	1,5 ± 0,4
	RН — 2,- 3,- 402 фірма «LECO» високочастотне нагрівання потік азоту	тигель графітовий	800	32	0,3 ± 0,1
			1200	59	1,5 ± 0,5
		тигель квар- цовий	800	7	прилад не реєструє
			1200	5	
Мідь М16	VН — 8		800	9	0,3 ± 0,2
			1200	11	1,6 ± 0,2
	RН — 2, — 3, — 402	тигель графітовий	800	9	0,3 ± 0,2
			1200	11	1,6 ± 0,4
		тигель квар- цовий	800	6	прилад не реєструє
			1200	5	
Бронза BrX	VН — 8		800	8	1,8 ± 0,3
			1200	8	2.2 ± 0,3
	RН — 2, — 3, — 402	тигель графітовий	800	6	1.5 ± 0,2
			1200	11	2,2 ± 0,3
		тигель квар- цовий	800	5	0,4 ± 0,2
			1200	6	1.1 ± 0,4
ДСЗУ CRM MQ CA021 Мідь	RН — 2, — 3, — 402	тигель графітовий	800	5	0,4 ± 0,2
			1200	5	1,9 ± 0,2
		тигель квар- цовий	800	5	прилад не реєструє
			1200	5	
ДСЗУ CRM MQ CA023 Мідь	RН — 2, — 3, — 402	тигель графітовий	800	5	0,5 ± 0,2
			1200	5	2,1 ± 0,2
		тигель квар- цовий	800	5	прилад не реєструє
			1200	5	

* — n — кількість паралельних визначень

до аналізів ~ 10 хв, «холодного тигля» та графітових кришок на тиглі.

Аналіз цих результатів засвідчує:

1. Визначення вмісту водню в міді та бронзі плавленням чи нагріванням у кварцових тиглях на приладах RH не дає ніякого результату.

2. Визначення вмісту водню в міді та бронзі в графітових тиглях (у вакуумі — VH — 8, у потоці азоту — RH):

а. нагріванням за 800 °C дає занижені результати;

б. плавленням за 1200 °C — результати можна вважати правильними, оскільки стандартні зразки міді на вміст водню добре відтворюються.

Ураховуючи результати, наведені в табл. 1, та інформацію з літературного огляду, припущено, що під час аналізів мідних сплавів на вміст водню особливу роль грають кисень, що міститься в міді як закис, та матеріал тигля: графіт або кварц.

Проведено дослідження, в яких мідь та бронза після їх аналізів на вміст водню на приладах RH — 2, — 3, — 402 без додаткового пробопідготування відразу аналізували на вміст кисню на аналізаторах RO — 316, TC — 436 (таблиця 2). Спостерігається:

► по — перше, зменшення вмісту кисню в міді та бронзі порівняно з початковим металом;

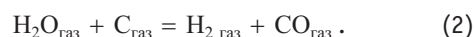
► по — друге, зменшення розкиду результатів аналізів мідних та бронзових зразків на вміст кисню порівняно з початковим металом;

► по — третє, результати аналізів мідних та бронзових зразків, нагрітих у кварцових або графітових тиглях, на вміст кисню практично однакові;

► по — четверте, для зразків міді та бронзи, розплавлених у кварцових чи графітових тиглях, ре-

зультати аналізів на вміст кисню практично однакові.

Це свідчить, що водень під час нагрівання або плавлення зразка реагує із закисом міді й видаляється з міді та бронзи як H_2O . Остання за плавлення зразка в графітовому тиглі взаємодіє з вуглецем у парогазовій фазі з утворенням H_2 та CO (рис. 1) за реакцією:



Припущення, що Cu_2O у міді може бути відновлено вуглецем, розчиненим у матриці металу, не має підстав:

► по — перше, вуглець не дифундує крізь тверду мідь [39];

► по — друге, розчинність вуглецю в міді (твердій чи розпавленій) за температури плавлення дуже незначна і дорівнює $(5 \times 10^{-7} \dots 1 \times 10^{-4})$ % мас. [39, 40].

► по — третє, на аналізаторі CS — 600 визначили вміст вуглецю в мідних зразках M00, M16 і бронзі БрХ: $\sim 5 \times 10^{-5}$ % мас.

Якби відновлення закису міді вуглецем, розчиненим у міді, відбувалося в процесі її плавлення в кварцовому тиглі, частина Cu_2O витрачалася би на взаємодію з вуглецем, а не з воднем. Тоді мали б які-небудь результати аналізів на вміст водню. Але їх немає (табл. 1). У графітовому тиглі за плавлення міді така реакція, якщо і можлива, та вона не може заважати відновленню водню за реакцією (2).

б) Металографічні дослідження

На оптичному мікроскопі Neophot 32 із системою цифрового фотографування зображення проведено металографічні дослідження задля отримання

Таблиця 2. Вміст кисню в міді та бронзі після їх аналізів на вміст водню, % мас. $\times 10^{-4}$

Table 2. Oxygen content in copper and bronze after their analysis on hydrogen content, % mas. $\times 10^{-4}$

Метал	Вихідний вміст кисню	Вміст кисню після визначення кількості водню в міді та бронзі			
		Кварцовий тигель		Графітовий тигель	
		800 °C	1200 °C	800 °C	1200 °C
Мідь M00	265 ± 111 $n = 19$ *	237 ± 29 $n = 15$	190 ± 17 $n = 15$	232 ± 20 $n = 15$	193 ± 14 $n = 15$
Мідь M16	33 ± 8 $n = 18$	28 ± 4 $n = 9$	15 ± 3 $n = 9$	28 ± 3 $n = 8$	16 ± 1 $n = 10$
Бронза БрХ	18 ± 9 $n = 20$	10 ± 3 $n = 11$	8 ± 4 $n = 11$	10 ± 3 $n = 9$	9 ± 3 $n = 10$
ДСЗУ CRM MQ CA021 Мідь	74 ± 5 $n = 5$	64 ± 5 $n = 5$	55 ± 4 $n = 5$	63 ± 4 $n = 5$	54 ± 4 $n = 5$
ДСЗУ CRM MQ CA023 Мідь	158 ± 3 $n = 5$	145 ± 4 $n = 5$	133 ± 3 $n = 5$	143 ± 3 $n = 5$	132 ± 3 $n = 5$

* — n — кількість паралельних визначень

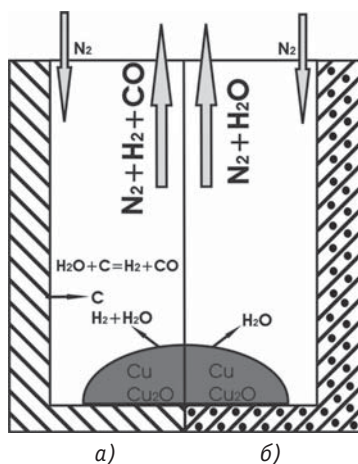


Рис. 1. Схема процесів, які проходять під час аналізу міді на вміст водню в графітовому (а) та кварцовому (б) тиглях

Fig. 1. The diagram of processes, which passing during analysis of copper on hydrogen content in carbon (a) and quartz (b) crucibles

додаткових доказів розкислення міді воднем під час аналізу, тобто наявності якісного та кількісного розподілення кисню (закису міді) у зразках міді та бронзи після їхніх аналізів на вміст водню в кварцових і графітових тиглях шляхом плавлення чи нагрівання.

На рис. 2 (а–д) наведено фотографії неметалевих включень у міді М00 (це закис міді). У світлому полі закис міді має голубувато-сірий колір, а в поляризованому світлі — малиново-червоний [30–32]. Характер розподілення неметалевих включень у зразках, розплавлених у графітових (рис. 2 а, в) та кварцових (рис. 2 б, г) тиглях, однаковий. Розподілення закису міді в зразках нерівномірне. Біля краю — у виді сітки евтектичного типу ($Cu_2O + Cu$) (рис. 2 а, б), а в середині — у виді окремих ділянок евтектики (рис. 2 в, г). Вміст кисню біля краю зразка відповідає еталонам № 9, 10 для литого металу ((0,035...0,06) % мас. кисню), а в середині зразка — еталонам № 6–9 для литого металу ((0,01...0,035) % мас. кисню) [30–32]. Якщо порівняти характер розподілення кисню в переплавлених зразках (рис. 2 а, б, в, г) з початковим металом (рис. 2 д) (еталон № 2 — 0,03 % мас. кисню для деформованої міді) [30–32], то можна бачити, що відбувається перерозподілення кисню в зразках з поступовим віддаленням закису міді від середини до краю зразка. Це відповідає напрямку потоку водню, що видаляється з міді в газову фазу.

У графітових тиглях за плавлення зразка відбувається розкислення воднем центральної частини зразка з видаленням пари води та частково молекулярного водню та відтісненням закису міді до краю

зразка. Цей висновок добре корелює з інформацією з робіт [1, 6–9].

У кварцових тиглях за плавлення зразка ми фіксували перерозподілення неметалевих включень від центру до краю проби (рис. 2 б, г). Відновлення воднем закису міді за реакцією (1) відбувається, але реакція (2) з утворенням водню неможлива, оскільки аналіз проводили у кварцовому тиглі без участі графіту. Це підтверджується результатами з табл. 1.

Характер розподілення закису міді в зразках, які нагрівали, практично такий же, що і у початковій міді, тобто не відбувається відновлення закису міді воднем (рис. 2 д). Та й водень практично не виділяється, бо температура аналізу замала (табл. 1). Неметалеві включення закису міді мають форму дрібних округлих включень. Вміст кисню оцінюється на рівні ~0,03 % мас. (еталон № 2 для деформованої міді) [32], що добре узгоджується з нашими визначеннями вмісту кисню в міді (табл. 2).

Мідь М16 та бронза БрХ мають незначні забруднення дрібними неметалевими включеннями. У міді М16 — це глобулярної форми силікати та закис міді. У розсіяному світлі силікати мають білу точку в центрі включення, в поляризованому — характерний для них «чорний хрест», а закис міді — малиново-червоний колір. Для зразків бронзи БрХ

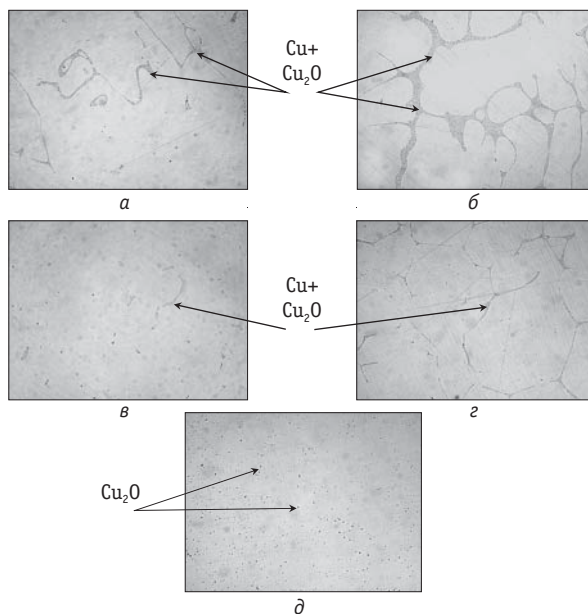


Рис. 2. Неметалеві включення в міді М00 — ($\times 200$): а, в — графітовий тигель; б, г — кварцовий тигель; а, б — край зразка; в, г — середина зразка; а, б, в, г — плавлення зразка; д — початкова мідь; нагрівання зразка (графіт. та кварц. тигель)

Fig. 2. Nonmetallic inclusions in copper M00 — ($\times 200$): а, в — graphite crucible; б, г — quartz crucible; а, б — border of sample; в, г — middle sample; а, б, в, г — melting sample; д — initial copper; heating of sample (graphite or quartz crucible)

основні включення — це інтерметаліди типу Cu₂Sn. Вони мають зеленувато-голубуватий колір і розташовані на межах зерен твердого розчину. У поляризованому світлі вони темніші від загального фону, а в темному полі — світліші. Поблизу інтерметалевих плівок містяться дрібні та рідкі неметалеві включення оксидного типу. В поляризованому світлі деякі з них мають малиново-червоний колір, характерний для закису міді. Більшість оксидних включень у бронзі БрХ — оксиди хрому. За температур аналізу бронзи водень не взаємодіє з оксидом хрому з утворенням H₂O. Ось чому завжди отримували результати аналізів бронзи на вміст водню. Умови нагрівання або плавлення зразків з міді М16 та бронзи БрХ не вплинули на характер розподілення в них закису міді. Він практично такий же, як у початкових міді та бронзі. Це можна пояснити низьким вмістом кисню у початкових міді М16 та бронзі БрХ — 0,003 та 0,002 % мас. відповідно.

Вміст водню в міді практично не змінюється залежно від тривалості зберігання готових аналітичних зразків в екзикаторі в атмосфері осушених повітря або аргону за кімнатної температури протягом 20 днів (рис. 3). Але намагалися аналізувати зразки в той самий день, коли їх виготовляли.

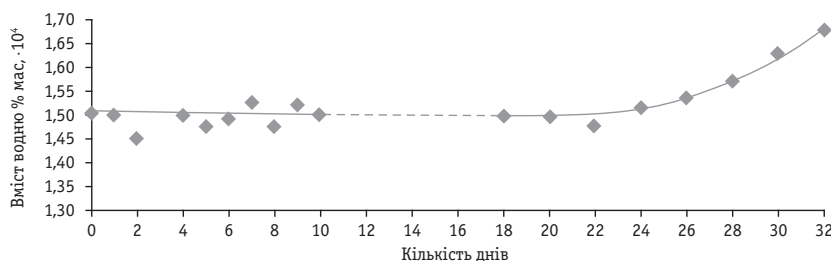


Рис. 3. Залежність вмісту водню в міді М00 (0,0265 % мас. кисню) від тривалості зберігання зразків

Fig. 3. The dependence of hydrogen content in copper (0.0265 % mas.) oxygen on keeping time of the samples

ВИСНОВКИ

1. Видалення водню з мідних сплавів залежить від умов їх нагрівання або плавлення (температури, матеріалу тигля тощо) і концентрації в них кисню та проходить багатостадійно:

а. взаємодія водню, що виділяється, із закисом міді (або з розчиненим у металі киснем) з утворенням води;


б. видалення води та молекулярного водню в газову фазу;

в. взаємодія води з вуглецем у парогазовій фазі з утворенням H₂ та CO за плавлення зразка, що аналізується, в графітовому тиглі.

2. Аналіз мідних сплавів на вміст водню необхідно проводити у потоці газу-носія або у вакуумі в графітовому тиглі за температури 1200 °С.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Колачев Б.А., Водородная хрупкость металлов, М., Металлургия (Kolachev B.A., Hydrogen brittleness of metals, M., Metallurgy), 1985, 217 с/р.
2. Чернега Д.Ф., Бялик О.М., Иванчук Д.Ф., Ремизов Г.А., Газы в цветных металлах и сплавах, М., Металлургия (Chernega D.F., Bjalyk O.M., Ivanchuk D.F., Remizov G.A., Gases in non — ferrous metals and Alloys, M., Metallurgy), 1982, 176 с/р.
3. Kato Ejiti, Ueno Harunabu, a) Solubility of hydrogen in liquid copper alloys, measuring by method of selection samples. b) Solubility of hydrogen in liquid copper and its alloys, measuring by Sieverts method. Journal Japan Inst. Metals, 1969, 33, № 10, 1027—1035.
4. Линчевский Б.В., Дегтярев Ю.В., Чурсин В.М., Растворимость водорода в бинарных сплавах на основе меди, Кинетика и термодинамика взаимодействия газов с жидкими металлами, М., Наука (Linchevski B.V., Degtarev Y.V., Chursin V.M., Solubility of hydrogen in binary alloys, basing of copper, Kinetic and thermodynamic of interaction gases with liquid metals, M., Nauka), 1974, 15—20.
5. Hammer B., Lenz D., Reimers, Dudzus T., Schmitt B.F., Die löslichkeit des sauerstoff in reinst — kupfer metal, (W. Berlin), 1984, 38, № 1, 41—45.
6. Hofmann W., Schneider H., Über das wasserstoff — sauerstoff gleichgemischt in schmelzen aus kupfer und kupferlegierungen, Z. Erzberg. und Metallhüttenwesen, 1960, 13, № 10, 484—493.
7. Бутамо Д.Г., Хрупкость меди, Цветные металлы (Butamo D.G., Brittleness of copper, Non — ferrous metals), 1964, № 5, 63—64.
8. Kauczor E., Die Wasserstoffkrankheit des Kupfers, Metall, 1965, № 11, 1185—1187.
9. Мороз Л.С., Чечулин Б.Б., Водородная хрупкость металлов, М., Металлургия (Moroz L.S., Chechulin B.B., Hydrogen brittleness of metals, M., Metallurgy), 1967, 256 с/р.
10. Коренюк Ю.М., Петров Г.Л., Зарождение и развитие пузырьков в медных сварных швах, Труды ЛПИ, Обработка металлов давлением и сварка (Koreniuk Y.M., Petrov G.L., Nucleation and development of the bubbles in copper welding joint, Transactions of LPI, Processing of menals by pressure and welding). 1969, № 308, 176—183.
11. Погодин — Алексеев Г.И., Сыроваткин А.А., О газонасыщенности меди после электрошлакового переплава, Сварочное производство (Pogodin — Alekseev G.I., Syrovatkin A.A., About Gassaturability of copper after electroslog remelting, Welding production), 1964, № 1, 13—14.

12. Вассерман А.М., Кунин Л.Л., Суровой Ю.Н., Определение газов в металлах, М., Наука (Vasserman A.M., Kunin L.L., Surovoj Y.N., Determination gases in metals, M., Nauka), 1976, 344 с/р.
13. Зеленов А.Н., Иванов Н.Т., Симоишвили Т.В., Славянов И.Н., Содержание газов в литой меди вакуумной плавки, Цветные металлы (Zelenov A.N., Ivanov N.T., Simonishvili T.V., Slavjanov I.N., Content gases in cast copper of the vacuum melting, Non — ferrous metals), 1967, № 5, 84—85.
14. Чурсин В.М., Пименов А.М., Газы в медных сплавах, Литейное производство (Chursin V.M., Pimenov A.M., Gases in copper alloys, Foundry production). 1966, № 6, 36—38.
15. Зязев В.Л., Фурашова Н.М., Газы в слитках меди и их определение, Изв. АН СССР, Metallurgia и горное дело (Zjazev V.L., Furashova N.M., Gases in copper ingots and its determination, Izv. AN SSSR, Metallurgy and mining), 1964, № 2, 132—136.
16. Шеметов Г.Ф., Лебедев К.П., Определение содержания водорода в медных сплавах, Литейное производство (Shemetov G.F., Lebedev K.P., Determination of hydrogen content in copper alloys, Casting production), 1970, № 3, 29—30.
17. Hydrogen in copper, Application bulletin, LECO Corp., Form № 203 — 601 — 059, March, 1986.
18. Determination of hydrogen in copper, Application bulletin, LECO Corp., Form № 203 — 601 — 137, July, 1987.
19. Oja Sigeo, Kato Ejiti, Simidzu Hidej, Takada Takajasi, Determination of hydrogen in liquid copper and copper — tin alloys by method of hot extraction, Journ. Japan Inst. Metals, 1967, 31, № 10, 1149—1153.
20. Kato Ejiti, Ueno Harunobu, Determination of hydrogen in liquid Cu and Cu — Sn alloys by method vacuum — melting with application of Sn — bath, Journ Japan Inst. Metals, 1967, 31, № 10, 1154—1157.
21. Vandecasteele C., Hoste J., Activation analysis with helium — 3 particles for traces of oxygen in copper, Anal. chem. Acta, 1975, 76, № 3, 302—312.
22. Vandecasteele C., Adams F., Hoste J., The determination of oxygen in copper by α — particles activation analyses, Anal. chem. Acta, 1975, 76, № 1, 27—36.
23. Sterlinski S., Szopa Z., Dubovski K., Oznaczenie tlenu w miedzi metoda aktywacji neutronami predcimi 14 MeV, Chem. Anal. (PRL), 1979, 24, № 2, 28.
24. Oxygen in Copper, Application bulletin, LECO Corp., Form № 203 — 601 — 043, August, 1984.
25. Oxygen in Cuprous oxide (Cu₂O), Application bulletin, LECO Corp., Form. № 203 — 601 — 208, August, 1988.
26. Топорева В.В., Качнев М.И., Влияние примесей при определении кислорода в черновой меди, Заводск. лаб. (Toporeva V.V., Kachnev M.I., Influence of admixture under determination of oxygen in black copper, Zavodsk. Labor.), 1964, 30, № 5, 543.
27. Dias C.M., Richardson F.D., Electrochemical measurement of oxygen in molten copper, Trans. Inst. Mining and Metallurgy, 1967, C76, Sept., 196—203.
28. Opravil O., Stanoveme kyslika v medi a ich zvaroch, Hut. Listy, 1967, 22, № 4, 265—267.
29. Книжник А.Г., Стукан Р.А., Еременко Г.О., Химическое определение содержания кислорода, Cu³⁺, Cu¹⁺ в высокотемперат. сверхпроводниках EuBa₂Cu₃O_{7.8}, Сверхпроводимость, Физ., Хим., Техн., 1990, 3, № 4, 757—762.
30. Б.Г. Лившиц, Metallographia, М., Metallurgizdat (B.G. Livshits, Metallography, M., Metallurgizdat), 1963, 422 с/р.
31. М.В.Мальцев, Т.А.Бардакова, Ф.А.Бобрик, Metallographia цветных металлов и сплавов, М., Metallurgizdat (M.V. Maltsev, T.A. Baradkova, F.A. Bobrik, Metallography of the non — ferrous metals and alloys, M., Metallurgizdat), 1960, 372 с/р.
32. Медь. Методы определения кислорода. Межгосударственный стандарт ГОСТ 13938.13 — 93 (Copper. Methods of the determination of oxygen. Interstate standard GOST 13938.13 — 93).
33. Филиппова Н.А., Самохвалова Л.Г., Тарасов В.В., Кулонометрическое определение кислорода в медных порошках, Научн. труды Мин. цвет. мет. (Filippova N.A., Samohvalova L.G., Tarasov V.V., Culonometric determination of oxygen in copper powders, Nauch.trudy Min. zvet. met.), 1977, № 43, 61—63.
34. Мещеряков С.И., Шейнина Л.Р., Определение содержания водорода, кислорода и углерода в меди методом вакуумн. плавки, Бюл. центр. инст. информ. цветн. метал. (Mescherakova S.I., Sheinina L.R., Determination of hydrogen, oxygen and carbon content in copper by method of vacuum melting, Bul. centr. inst. inform. non — ferrous metal.), 1956, № 2, 30—33.
35. Arnaud D., Sosnovski G., Los gases en las aleaciones de cobre, Determinacion analitica del hidrogeno en los cuproaluminios, Colada, 1976, 9, № 5, 173—176.
36. Colombo A, Vacuum — aluminium bath method for the determination of hydrogen in copper, Anal. chem. acta, 1974, 72, № 2, 401—406.
37. Thomas C.L., Grifford J.C., The determination of water vapour in toughpitch copper wire bar by an aluminium reduction technique, Trans. Metallurg.Soc. AIME, 1968, 242, № 6, 1009—1011.
38. Зайдель А.И., Элементарные оценки ошибок измерений, Л., Наука (Zajdel A.I., Elementary evaluation of the mistakes of measuring, L., Nauka), 1968, 96 с/р.
39. Hansen M., Anderko K., Constitution of binary alloys, N-Y,T, L., McGraw Co., 1958, 608 p.
40. Лякишев Н.П., Диаграммы состояния двойных металлических систем, М., Машиностроение (Lakishev N.P., Diagrams of condition of the binary metallic systems, M., Mashengineering), 1996, № 1, 713—714. 

Отримано / received: 05.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. В.М. Ілющенком (Україна).
D. Sc. (Techn.) V.M. Ilyuschenko, Ukraine, recommended this article to be published.



ДО 50-РІЧЧЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СЛУЖБИ ННЦ «ХФТІ»

У п'ятдесяті роки на пустирі (на околиці Харкова), де було всього п'ять «хат», почалося будівництво нових корпусів Харківського фізико-технічного інституту (ХФТІ) й разом з ними – великого наукового містечка П'ятихатки. Зводилися перші житлові будинки, школа, їдальня, котельня. Після завершення будівництва останньої надійшло різноманітне обладнання, у тому числі й засоби виміральної техніки (ЗВТ), яке потрібно було встановити відповідно до монтажних схем. Знайшлося чотири спеціалісти, які взялися виконати цю роботу в котельні. Із введенням її в експлуатацію виникла потреба в організації теплотехнічної групи, працівники якої могли б обслуговувати, ремонтувати та повіряти ЗВТ тиску. З метою підвищення кваліфікації у частині повірки та ремонту декількох працівників групи направили на курси повірників.

Після закінчення ними навчання для групи придбали необхідні для повірки приладів з вимірювання тиску еталонні ЗВТ. Були підготовлені відповідні документи на право ремонту та повірки зазначених приладів, і невдовзі отримано перше реєстраційне посвідчення від 25.03.1965 на право ремонту та повірки манометрів технічних, витратомірів, тягомірів технічних.

На той час у ХФТІ вже було вирішено на базі теплотехнічної групи створити відділ контрольно-вимірвальних приладів і автоматики (КВПА). Положення про відділ було розроблено 01.03.1965. Воно визначало структуру відділу у такому складі: бюро вимірвальних приладів, лабораторії повірки

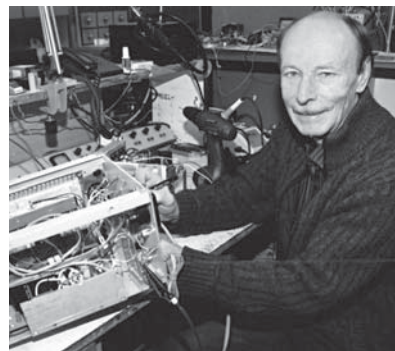


та нових розроблень приладів і систем автоматики, ремонтний цех. Наказ №83 по ХФТІ стосовно організації відділу КВПА був підписаний 13.01.1966. За ним з 01.01.1966 із інших підрозділів до відділу переведено 10 співробітників, скасована теплотехнічна група, еталонне теплотехнічне обладнання передано до відділу.

З метою ефективної організації роботи метрологічної служби перш за все провели інвентаризацію ЗВТ, які перебували в експлуатації в усіх підрозділах інституту. Вони були систематизовані, згруповані за типами, діапазонами вимірювання, класами точності. З отриманням збірників нормативних документів на ремонт і повірку ЗВТ визначили нормативи часу на їх виконання. Було складено план розроблення ТД, НД, СТП, визначено нормативи часу на проведення метрологічної експертизи розроблених у конструкторському бюро документів.

У жовтні 1968 року почалося розроблення проекту технічного завдання на будівництво корпусу і розміщення відділу КВПА відповідно до рекомендацій щодо розміщення метрологічних служб та їх структури. Конкретні пропозиції щодо розміщення лабораторій, груп, установок, механічної





майстерні надали співробітники відділ. На початок 1969 року їх було 38 осіб.

Безпосередньо будівництво розпочалося у квітні 1969 року. Разом з ним активно проводилася робота з планування робочих місць. Співробітники відділу надали пропозиції щодо підведення електроенергії, води, вентиляції, стисненого повітря, зв'язку тощо.

У процесі обліку було виявлено 42530 одиниць ЗВТ з різних видів вимірювань. Відповідно створювалися дільниці з ремонту й повірки ЗВТ з вимірювань геометричних, механічних, фізико-технічних, електромагнітних, радіотехнічних, оптико-фізичних величин, температури, маси, тиску та вакууму, часу і частоти, характеристик іонізуючих випромінювань; з розроблень ЗВТ (виготовлення, розроблення ТД, атестації, метрологічної експертизи). За затвердженою новою структурою почався набір спеціалістів. Переважно на роботу приймали випускників шкіл для навчання на повірників і слюсарів з ремонту ЗВТ. Технічне навчання було обов'язковим для всіх співробітників. Після відповідної підготовки і набуття досвіду роботи вони направлялися на курси до інституту стандартизації та метрології. Таке навчання пройшли 39 осіб, отримавши право виконувати державну повірку ЗВТ певних видів вимірювань. Частина співробітників навчалася у вищих і середньотехнічних профільних навчальних закладах Харкова і Одеси. Для підвищення кваліфікації співробітників створили бібліотеку з фондом матеріалів близько 300 одиниць, направляли їх на заводи-виготовлювачі для приймання складних ЗВТ. Відділ мав повну інформацію стосовно підприємств-виготовлювачів ЗВТ не лише для потреб метрологічної служби, а й усіх наукових і виробничих підрозділів інституту; через нього проходили щорічні заявочні компанії на ЗВТ для всіх підрозділів ХФТІ, особливо інтенсивними були поставки еталонних ЗВТ, обладнання, устаткування, починаючи з 1985 року. Повністю корпус, де розмістився відділ КВПА, було здано в експлуатацію у грудні 1986 року.

Співробітники відділу постійно брали участь у проведенні складних вимірювань у наукових підрозділах ХФТІ, були співавторами і виконавцями нових розроблень вимірювачів, зокрема, нових типів пірометрів для установок з напilenня типу «Булат». Такі установки широко впроваджені у виробництво і застосовуються у всіх галузях промисловості України і ряду країн за її рубежами.

У відділі були підготовлені необхідні документи на право ремонту і державної повірки ЗВТ, які перебували в експлуатації в ХФТІ. Були отримані відповідні посвідчення, державні клейма, організовано ревізію стосовно утримання ЗВТ у підрозділах інституту. Запроваджений відділом прокат ЗВТ усередині інституту дозволив підняти коефіцієнт їх використання до 85 %. Такий прокат діє й сьогодні. Систематично складалися графіки планово-попереджувальних ремонтів і повірки ЗВТ, які чітко виконувалися. Усі ЗВТ, які надходили до інституту, проходили технічне приймання і вхідний контроль.

Наказом по інституту від 01.12.2004 відділ КВПА отримав назву «Метрологічна служба ННЦ ХФТІ». Усе обладнання, установки, робочі місця, кладові служби розміщено в 45 приміщеннях на площі 2756 м³. Із них два приміщення для ремонту та повірки НВЧ техніки, стіни яких обшиті металом, і 41 – для повірки ЗВТ, чутливих до завад. Маємо також спеціальні приміщення, де розміщено установку «Еталон-1» для повірки та градування дозиметричних ЗВТ.

Протягом багатьох років у Метрологічній службі склався дружній колектив висококваліфікованих фахівців-метрологів, які мають великий досвід і знання, віддані своїй справі. Саме завдяки їхній праці в ХФТІ створено потужну метрологічну базу, забезпечується виконання на високому рівні всього комплексу метрологічних робіт у підрозділах інституту, які мають унікальні експериментальні установки для досліджень у різних напрямках сучасної фізики.

Б. Тищенко,
головний метролог ННЦ «ХФТІ», м. Харків

ХАРКІВСЬКА ФІЛІЯ ДП «УкрНДНЦ»

Харківська філія ДП «Український і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» запрошує державних повірників, повірників метрологічних служб підприємств та організацій, фахівців калібрувальних, випробувальних та вимірювальних лабораторій, керівників та фахівців метрологічних служб підприємств, а також спеціалістів, які працюють у напрямках стандартизації, сертифікації та управління якістю, пройти курс підвищення кваліфікації (**Ліцензія Міністерства освіти і науки України Серія АЕ № 636067. Дата видачі ліцензії — 10.03.2015 р.**). Після закінчення курсу слухачі отримують посвідчення або посвідчення з сертифікатом ДП «УкрНДНЦ».

Заняття проводяться: на базі підприємств-замовників за узгодженими напрямками і вартістю навчання;
на базі Харківської філії ДП «УкрНДНЦ» згідно з планом набору слухачів.

План набору слухачів на 2016 рік

Ч/ч	Курс	Період навчання
1. Підвищення кваліфікації фахівців повірочних та калібрувальних лабораторій з повірки та калібрування:		
1.1	ЗВ геометричних величин	28.03 — 08.04; 05.12 — 16.12
1.1.1	спеціалізованих ЗВ геометричних величин на залізничному транспорті	28.03 — 01.04; 05.12 — 09.12
1.1.2	колієвимірювальних шаблонів	
1.1.3	шаблонів вагонного господарства	
1.2	ЗВ механічних величин	16.05 — 27.05
1.2.1	ЗВ маси	
1.2.2	локомотивних швидкостемірів	
1.3	ЗВ маси, об'єму, місткості та витрати	16.05 — 27.05; 04.07 — 15.07
1.4	ЗВ температури, тиску, витрати	14.03 — 25.03; 14.11 — 25.11
1.4.1	ЗВ температури, тиску	
1.5	ЗВ електричних величин	08.02 — 19.02; 19.09 — 30.09
1.5.1	ЗВ електричних величин на залізничному транспорті	08.02 — 12.02; 19.09 — 23.09
1.6	ЗВ радіотехнічних величин	08.02 — 19.02; 19.09 — 30.09
1.6.1	ЗВ радіотехнічних величин на залізничному транспорті	08.02 — 12.02; 19.09 — 23.09
*Вартість навчання з ПДВ: за 1 тиждень — 2 496,00 грн.; за 2 тижні — 3 792,00 грн.		
2. Підвищення кваліфікації фахівців за курсами:		
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві	08.02 — 19.02; 11.04 — 22.04; 13.06 — 24.06; 17.10 — 28.10
2.1.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві (для метрологів з досвідом роботи)	13.06 — 17.06
2.2	Метрологічна експертиза технічної документації	11.04 — 22.04; 13.06 — 24.06; 17.10 — 28.10
2.3	Забезпечення єдності вимірювань в закладах охорони здоров'я	08.02 — 12.02; 11.04 — 15.04; 13.06 — 17.06; 17.10 — 21.10
2.4	Забезпечення єдності вимірювань ВК ВІС та АСК ТП. Метрологічний контроль ВК	08.02 — 19.02; 11.04 — 22.04; 13.06 — 24.06; 17.10 — 28.10
2.5	Забезпечення компетентності калібрувальних лабораторій підприємств	13.06 — 17.06
2.6	Забезпечення єдності вимірювань при проведенні контролю технічного стану транспортних засобів	У міру комплектування, 1 тиждень
2.7	Забезпечення обліку кількості та контролю якості вугілля при прийманні на підприємствах	
2.8	Розроблення і валідація методик вимірювань та випробувань. Оцінка похибки та невизначеності вимірювань	15.02 — 19.02; 14.11 — 18.11
2.9	Технічне регулювання в Україні. Оцінювання відповідності продукції	25.01 — 29.01; 12.09 — 16.09
2.10	Розробка, впровадження, забезпечення функціонування та проведення внутрішнього аудиту систем управління якістю	18.01 — 22.01; 24.10 — 28.10
2.11	Стандартизація, розробка та впровадження нормативних документів	25.01 — 29.01; 12.09 — 16.09
2.12	Тепловізійні вимірювання. Тепловізійні методи контролю і діагностика	01.02 — 05.02; 28.11 — 02.12
2.13	Забезпечення єдності вимірювань та проведення випробувань в електротехнічних лабораторіях	
2.13.1	Проведення вимірювань та випробувань електротехнічними лабораторіями	
2.14	Забезпечення компетентності повірочних лабораторій	31.10 — 04.11
2.15	Вимоги до калібрувальних та випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Внутрішній аудит в лабораторіях	29.02 — 04.03; 04.07 — 08.07; 03.10 — 07.10; 19.12 — 23.12
2.15.1	Вимоги до калібрувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань	
2.15.2	Вимоги до випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань	
2.16	Підготовка підприємств до проведення метрологічного нагляду	31.10 — 04.11
*Вартість навчання з ПДВ: за 1 тиждень — 2 496,00 грн.; за 2 тижні — 3 792,00 грн.		
3. Тематичні семінари:		
3.1	Особливості забезпечення єдності вимірювань в сучасних умовах. Вимоги Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»	09.02 — 10.02; 12.04 — 13.04; 14.06 — 15.06; 18.10 — 19.10 *Вартість з ПДВ — 1 266,00 грн.
3.2	Стандартизація. Актуальні питання сьогодення. Вимоги Закону України «Про стандартизацію»	26.01 — 27.01; 13.09 — 14.09 *Вартість з ПДВ — 792,00 грн.
4. Підготовка кандидатів в аудитори:		
4.1	Підготовка кандидатів в аудитори з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (1-й модуль)	25.01 — 29.01; 12.09 — 16.09 *Вартість з ПДВ — 2 520,00 грн.
4.2	Підготовка кандидатів в аудитори з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (2-й модуль)	У міру комплектування груп, 4 дні *Вартість з ПДВ — 2 016,00 грн.
*Вартість навчання подано на 31.08.15 р. і може бути змінено		

На замовлення підприємств:

- проводимо комплектування додаткових груп;
- надсилаємо інформаційні листи з тематикою запланованих курсів навчання;
- розробляємо нові курси з урахуванням потреб замовника.

61002, м. Харків, вул. Мироносицька, 40, кімн. 3;
моб. тел: 050-403-84-90; тел./факс: (057) 752-00-89, 752-00-69; e-mail: hf_ukrndnc@i.ua
Навчально-методичний відділ