УДК 621.317

[1, 2]О. М. Василевський, к.т.н., доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ЗУСИЛЛЯ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

[1]Міністерство освіти і науки України, м. Київ,
[2]Вінницький національний технічний університет, wasilevskiy@mail.ru

Досліджено якість результатів вимірювань зусилля на основі міжнародних нормативних документів щодо подання результатів вимірювань (концепції невизначеності).

Ключові слова: *вимірювання зусилля, якість вимірювань, стандартна невизначеність, комбінована невизначеність, розширена невизначеність, бюджет невизначеностей.*

Вступ та постановка задачі

Під час представлення результатів вимірювань потрібно подавати кількісне значення якості експерименту так, щоб можна було порівняти їх з іншими результатами виконаними різними лабораторіями у різних країнах світу [1 - 6]. Тому під час наукових дослідженнях якості результатів вимірювань доцільно використовувати прийняту міжнародними організаціями з метрології та стандартизації концепцію невизначеності.

Розробка методології оцінювання якості результатів вимірювань зусилля на основі теорії невизначеності з використанням наукового знання про фізичні процеси, що протікають у використовуваному засобі вимірювання зусилля є *актуальною науковою задачею*, вирішення якої дозволить використовувати запропоновану методологію для метрологічного забезпечення вимірювань у цій сфері та забезпечить єдність вимірювань.

З огляду на вищевикладене, *метою статті* є розробка методології оцінювання якості результатів вимірювань зусилля на основі концепції невизначеності для забезпечення єдності вимірювань.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Відомі роботи [7 - 12], в яких розглянута загальна теорія оцінювання та вираженя невизначеностей вимірювань. Однак єдиного підходу та математичного апарату для оцінювання якості результатів вимірювань саме зусилля в існуючих на теперішній час літературних джерелах не існує. Тому доцільно окремо розробити і описати методологію (процедуру) оцінювання якості результатів вимірювань зусилля на основі теорії невизначеності.

Викладення основного матеріалу

Під час виконання експериментальних досліджень розробленого засобу вимірювання зусилля отримано ряд результатів спостережень, що наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q_i, кг	10,1	10,3	10,1	10,2	9,8	10	10,2	10,5	10,1	9,7	9,8	9,9	10,3	10,4	10	9,7

Рівняння вимірювання зусилля описується виразом

$$Q = \frac{4RS_т h}{U_а U_м}\Delta UN, \qquad (1)$$

де Q - зусилля (вимірювана величина); k – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача ($k = U_а/\Delta U = 40$); ΔU – напруга на виході сенсора зусилля (вхідна напруга масштабного перетворювача); $U_а$ – напруга на виході мастабного перетворювача; $S_Т$ - чутливість сенсора зусилля; h – крок квантування АЦП; $U_м$ – напруга, якою живиться мостова схема сенсора зусилля ($U_м$ = 6,5 В ± 0,25 мВ); R – опір мостової схеми тензорезисторів (R = 3,25 ± 0,03 кОм); N – кількість імпульсів на виході АЦП.

Вимірювання виконувались в лабораторних умовах при температурі навколишнього повітря + 25 °С.

З технічної документації на елементи, які входять до складу засобу вимірювання зусилля відомо:

- дрейф напруги зміщення нуля мастабного перетворювача (операційного підсилювача) складає $U_{зм}$ = 3 мкВ/°С;

- розрядність АЦП m = 10;

- допустиме відхилення напруги джерела живлення сенсора зусилля складає $\Theta_{Uм}$ = 0,25 мВ;

- допустиме відхилення опору мостової схеми сенсорів зусилля складає Θ_R = 0,03 кОм;

- температурний коефіцієнт опору складає $\alpha_t = 2{,}5 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$.

Методологія дослідження якості результатів вимірювань зусилля на основі концепції невизначеності є наступною.

Визначаємо оцінку результату вимірювання зусилля. Найкращою оцінкою результату вимірювання є середньоарифметичне значення зусилля $\overline{Q}$, що дорівнює (таблиця 1) [7]

$$\overline{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{n} = 10{,}07 \text{ кг}. \quad (2)$$

Стандартну невизначеність типу А результатів Q_i, що обумовлені джерелами невизначеності, які мають випадковий характер при вимірюванні зусилля розрахуємо за формулою [7]

$$u_A(Q_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_i - \overline{Q})^2}{(n-1)}} = 0{,}24 \text{кг} \quad (3)$$

.

Перевіряємо результати вимірювань на наявність промахів. Для цього розрахуємо два співвідношення [7]:

$$u_1 = \frac{\overline{Q} - Q_{min}}{u_A(Q_i)} = 1{,}54 \quad (4)$$

$$u_2 = \frac{Q_{min} - \overline{Q}}{u_A(Q_i)} = 1{,}79 \quad (5)$$

.

Далі, приймемо довірчий рівень рівним 0,95 та визначимо надійність α = 1 – p = 1 – 0,95 = 0,05. В залежності від кількості виконаних вимірювань (n = 16) з таблиці 2 вибиремо допустиму величину, яка для даного випадку складає $u_{доп}$ = 2,44.

Таблиця 2

Допустимі значення нормованих відхилень

Об'єм вибірки	Надійність α			
n	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71

Оскільки розраховані за формулами (4) та (5) значення співвідношень u_1 та u_2 менші за допустиме табличне значення $u_{доп}$, то гіпотеза про наявність анормальних результатів в ряді спостережень відкидається. Якщо значення одного або двох співвідношень було б більшим за допустиме значення $u_{доп}$, то необхідно було б вилучати з результатів спостережень найменше або найбільше значення, оскільки це означало б, що в результатах вимірювань присутні промахи.

Розраховуємо стандартну невизначеність типу А середнього значення за формулою [7, 8]

$$u_A(\overline{Q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \overline{Q})^2}{n(n-1)}} = 0{,}06 \text{кг} \quad . \tag{6}$$

Далі переходимо до оцінювання стандартних невизначеностей типу В, що вносяться за рахунок технічних обмежень засобу вимірювання зусилля.

Оскільки вимірювання зусилля виконувалися в лабораторних умовах при температурі навколишнього повітря t = 25 °С, яка відрізняється від температури при нормальних умовах $t_н$ = 20 °С, і із специфікації на складовий елемент засобу вимірювання зусилля (операційний підсилювач) відомо, що дрейф напруги зміщення нуля операційного підсилювача складає $U_{зм}$ = 3 мкВ/°С, то стандартну невизначеність типу В обумовлену дрейфом напруги зміщення нуля операційного підсилювача в припущенні про рівномірність закону розподілу визначимо за формулою

$$u_{B,t} = \frac{k|t - t_н|}{\sqrt{3}} U_{зм} = 40\frac{(25-20)}{1{,}73}3 = 0{,}35 \text{ мВ}. \tag{7}$$

Стандартну невизначеність типу В, що обумовлена обмеженою розрядністю АЦП (наявністю зони нечутливості АЦП) визначимо за формулою

$$u_{B,h} = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{U_o / 2^m}{3{,}46} = 0{,}85 \text{ мВ}. \tag{8}$$

Стандартну невизначеність типу В, що обумовлена відхилення напруги джерела живлення сенсора зусилля від номінального значення визначимо за формулою

$$u_{B,\Theta u} = \frac{\Theta_{Uм}}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}25}{1{,}73} = 0{,}14 \text{ мВ}. \tag{9}$$

Стандартну невизначеність типу В, що обумовлена невиключеною систематичною похибкою значення опору мостової схеми розрахуємо за формулою

$$u_{B,R} = \frac{\Theta_R}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}03}{1{,}73} = 17{,}34 \text{ Ом}. \tag{10}$$

Стандартну невизначеність типу В, що обумовлена температурною похибкою тензорезисторів при відхиленні температури оточуючого повітря від нормальних умов можна визначити на основі рівняння, що визначає залежність опору від температури $R = R_0\alpha_t\Delta t$ за формулою

$$u_{B,Rt} = \frac{\alpha_t|\Delta t|}{\sqrt{3}} R = 2{,}5\cdot 10^{-6}\frac{|298-293|}{1{,}73}3{,}25\cdot 10^3 = 0{,}02 \text{ Ом}. \tag{11}$$

Розраховуємо сумарну стандартну невизначеність типу В за формулою

$$u_{Bc} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial U_a}\right)^2 u_{B,t}{}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h}\right)^2 u_{B,h}{}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial U_м}\right)^2 u_{B,\Theta u}{}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial R}\right)^2 u_{B,R}{}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial R}\right)^2 u_{B,Rt}{}^2}, \tag{12}$$

де $\frac{\partial Q}{\partial U_a} = -\frac{4RS_т h}{kU_м U_a}N = -0{,}2\frac{кг}{В}$; $\frac{\partial Q}{\partial h} = \frac{4RS_т}{kU_м}N = 206{,}8\frac{кг}{В}$; $\frac{\partial Q}{\partial U_м} = -\frac{4RS_т h}{kU_м{}^2}N = -0.16\frac{кг}{В}$;

$\frac{\partial Q}{\partial R} = \frac{4S_т h}{kU_м}N = 0{,}3\cdot 10^{-3}\frac{кг}{Ом}$ - коефіцієнти чутливості.

Підставляючи значення коефіцієнтів чутливості і відповідні стандартні невизначеності типу В у рівняння (12), отримаємо значення сумарної стандартної невизначеності типу В, що дорівнює $u_{Bc} = 0{,}16$ кг.

Розраховуємо сумарну стандартну невизначеність результату вимірювання зусилля за формулою

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{c_B}^2} = 0{,}17 \text{ кг}. \quad (13)$$

Розраховуємо ефективне число ступенів вільності за формулою [7]

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4}{\nu_i}} = (n-1)\frac{u_c^4}{u_A^4} = 15\frac{0{,}16^4}{0{,}06^4} = 759 \quad (14)$$

.

Коефіцієнт охоплення k визначається через ефективне число ступенів вільності $\nu_{eff} \approx \infty$ та довірчу ймовірність, яку приймемо рівною p = 0,95, і дорівнюватиме k = 1,96.

Після визначення коефіцієнту охоплення розраховуємо розширену невизначеність вимірювання

$$U_{0,95} = ku_c = 0{,}33 \text{ кг}. \quad (15)$$

Кінцевим етапом в процедурі оцінювання якості результатів вимірювань зусилля є представлення результату вимірювання зусилля

$$Q = \overline{Q} \pm U_p = 10{,}07 \pm 0{,}33 \text{ кг}, \ p = 0{,}95. \quad (16)$$

На основі виконаних досліджень якості результатів вимірювань зусилля складаємо бюджет невизначеностей, що наведений в таблиці 3.

Таблиця 2

Бюджет невизначеності

Вхідні величини	**Оцінка вхідних величин**	**Стандартні невизначеності**	**Коефіцієнти чутливості**	**Вклади невизначеностей**
Q_i	$\overline{Q}$	0,06 кг (6)	1	$u_A(\overline{Q})$
$U_{зм}$	0	0,35 мВ (7)	$-\frac{4RS_т h}{kU_м U_a}N$	$\frac{\partial Q}{\partial U_a} u_{B,t}$
h	0	0,85 мВ (8)	$\frac{4RS_т}{kU_м}N$	$\frac{\partial Q}{\partial h} u_{B,h}$
$\Theta_{Uм}$	0	0,14 мВ (9)	$-\frac{4RS_т h}{kU_м^2}N$	$\frac{\partial Q}{\partial U_м} u_{B,\Theta u}$
Θ_R	0	17,34 Ом (10)	$\frac{4S_т h}{kU_м}N$	$\frac{\partial Q}{\partial R} u_{B,R}$
α_t	0	0,02 Ом (11)	$\frac{4S_т h}{kU_м}N$	$\frac{\partial Q}{\partial R} u_{B,Rt}$
Вихідна величина	**Оцінка вихідної величини**	**Сумарна (комбінована) невизначеність**	**Коефіцієнт охоплення**	**Розширена невизначеність**
$\overline{Q}$	**10,07 кг**	**0,17 кг (13)**	**1,96**	**0,33 кг (15)**

Висновки

В статті представлено методологію дослідження якості результатів вимірювань зусилля, яка розроблена на основі міжнародних нормативних документів, що використовуються у міжнародній практиці для вираження якості результатів вимірювань та дозволяє співставляти

результати вимірювань, які виконані різними лабораторіями в різник країнах світу, і тим самим забезпечує єдність вимірювань у зазначеній сфері досліджень.

Крім того, представлення якості результатів вимірювань на основі концепції невизначеності із зазначеним бюджетом невизначеності забезпечує конкурентноспроможність відчизняної продукції на світовому ринку.

Список літературних джерел

1. Guide to the Expression of Uncertainly in Measurement. – Switerland: ISO, 1993. – 101 p.
2. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement».
3. ГОСТ Р 54500.1 – 2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 «Неопределенность измерения – Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения». – М.: Стандартинформ. – 2012.
4. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector».
5. Руководство по выражению неопределенностей измерения = Guide to the Expression of Uncertainly in Measurement : [научн. редактор Слаев В. А.]. – Санкт-Петербург : НПО ВНИИМ им. Д. М. Менделеева, 1999. – 134 с.
6. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій : ДСТУ ISO/IEC 17025-2001. – [Чинний від 2001 – 01 – 01]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 31 с. – (Національний стандарт України).
7. Василевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань : [навчальний посібник] / О. М. Василевський, В. Ю. Кучерук. – Херсон: Олді-плюс, 2013. - 224 с. - ISBN 978-966-2393-86-6 (2-ге видання).
8. Захаров И. П. Теория неопределенности в измерениях : учеб. пособие [для студ. высш. учеб. зав.] / И. П. Захаров, В. Д. Кукуш; М-во образования и науки Украины. – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.
9. Василевський О. М. Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт / О. М. Василевський // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. – № 3 (7). – 2006. – С. 147–151.
10. Коцюба А. Процедура оцінювання невизначеності вимірювання випробувальної лабораторії / А. Коцюба, В. Новіков // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2003. – № 1. – С. 39–41.
11. Василевський О. М. Засіб вимірювання динамічного моменту електромоторів та аналіз його точності / О. М. Василевський // Вимірювальна техніка та метрологія. - № 73. - 2012. - С. 52 - 56.
12. Василевський О. М. Оцінка невизначеності вихідних сигналів засобів вимірювальної техніки в динамічних режимах роботи / О. М. Василевський // Системи обробки інформації. – 2010. – № 4 (85). – С. 81 - 84.