

УДК 621.317

<sup>1,2</sup>О. М. Васілевський, к.т.н., доц.

## МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЮЧИХ МОМЕНТІВ РОТОРНИХ СИСТЕМ З ВРАХУВАННЯМ МІЖНАРОДНИХ ВИМОГ ДО ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ

<sup>1</sup>Міністерство освіти і науки України, м. Київ,<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, [wasilevskiy@mail.ru](mailto:wasilevskiy@mail.ru)

Запропоновано методику метрологічної атестації засобів вимірювань, яка побудована на основі міжнародних вимог до оцінювання характеристик якості вимірювань, що дозволяє розраховувати міжповірочний інтервал ЗВ з використанням концепції невизначеності вимірювань. Виконано апробацію запропонованої методики метрологічної атестації на засобі вимірювання обертаючих моментів роторних систем.

**Ключові слова:** метрологічна атестація, міжповірочний інтервал, єдність вимірювань, якість вимірювань, стандартна невизначеність, комбінована невизначеність, розширена невизначеність, обертаючі моменти, бюджет невизначеностей.

### Вступ та постановка задачі

При поданні результатів вимірювань потрібно зазначати кількісне значення якості експерименту так, щоб можна було порівняти їх з іншими результатами виконаними різними лабораторіями у різних країнах світу [1 - 4]. Тому під час наукових досліджень якості результатів вимірювань доцільно використовувати прийняту міжнародними організаціями з метрології та стандартизації концепцію невизначеності. Однак, до сьогодення не розроблено методики визначення міжповірочного інтервалу засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), яка б спиралася на міжнародні вимоги до оцінювання характеристик якості вимірювань.

Тому, розробка методики визначення міжповірочного інтервалу ЗВТ та виконання на її основі метрологічної атестації засобу вимірювання обертаючих моментів роторних систем (РС) є актуальною науковою проблемою, вирішення якої дозволить створити математичний апарат, який забезпечить єдність вимірювань та випробувань і підвищить конкурентоспроможність вітчизняної продукції на світовому ринку.

З огляду на вищевикладене, метою статті є створення математичного апарату для визначення міжповірочного інтервалу на основі міжнародних вимог до оцінювання характеристик якості вимірювань та його апробація під час виконання робіт з метрологічної атестації засобу вимірювання (ЗВ) обертаючих моментів роторних систем (РС).

### Аналіз стану досліджень та публікацій

Відомі роботи [1 - 5], в яких розглянута загальна теорія оцінювання та вираження невизначеностей вимірювань. Однак єдиного підходу та математичного апарату для метрологічної атестації ЗВ обертаючих моментів РС із встановленням міжповірочного інтервалу на основі концепції невизначеності вимірювань в існуючих літературних джерелах не існує. Тому доцільно запропонувати і описати методику метрологічної атестації ЗВТ із встановленням міжповірочного інтервалу на основі концепції невизначеності на конкретному прикладі – метрологічній атестації ЗВ обертаючих моментів РС.

### Викладення основного матеріалу

Рівняння вимірювання ЗВ обертаючих моментів ЕД в статичному режимі роботи описується виразом

$$M_B = Qgl = \frac{4RS_T U_0}{U_a U_m (2^m - 1)} \Delta U N gl, \quad (1)$$

де  $U_m$  – напруга, якою живиться мостова схема сенсора зусилля ( $U_m = 6,5 \text{ В} \pm 0,25 \text{ мВ}$ );  $R$  – опір мостової схеми тензорезисторів ( $R = 3,25 \pm 0,01 \text{ кОм}$ );  $l$  – довжина вимірювального важеля,

що з'єднує вал випробовуваного ЕД із сенсором зусилля ( $l = 1$  м);  $\Delta U$  – напруга на виході сенсора зусилля (вхідна напруга масштабного перетворювача);  $U_a$  – напруга на виході масштабного перетворювача (операційного підсилювача);  $k$  – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача ( $k = U_a/\Delta U = 10^3$ );  $S_T$  – чутливість сенсора зусилля;  $U_o$  – опорна напруга АЦП ( $U_o = 3$  В);  $m$  – розрядність АЦП ( $m = 16$ );  $N$  – кількість імпульсів на виході АЦП, що відповідає значенню вимірюваного моменту і виводиться на дисплей [5, 6].

На основі проведених експериментальних вимірювань зразкового моменту (таблиця 1) на верхній межі вимірювання, розрахуємо стандартну невизначеність типу А за формулою

$$u_A(\bar{M}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{(n-1)n}} = 19,27 \cdot 10^{-3} \text{ Нм.} \quad (2)$$

Таблиця 1

**Результати експериментальних досліджень**

№ п. п.	Значення моменту, Нм	№	Значення моменту, Нм	№	Значення моменту, Нм
1	10,09	8	10,18	15	10,04
2	10,11	9	10,06	16	10,05
3	10,05	10	9,849	17	10,03
4	10,07	11	9,908	18	9,879
5	10,13	12	10,07	19	10,11
6	10,08	13	9,919	20	10,06
7	10,12	14	10,11	21	9,964

Далі виконаємо оцінювання складових стандартних невизначеностей типу В, які проявляються за рахунок невилучених залишків систематичних ефектів.

Оскільки, до складових елементів ЗВ обертаючих параметрів ЕД входить сенсор зусилля, то оцінимо складову невизначеності типу В, що вноситься сенсором зусилля за рахунок існування невилученого залишку зведеної похибки  $\gamma = 0,15$  % при дії максимального зусилля  $Q_n = 20$  кг за формулою [5]

$$u_{C3} = \frac{\gamma Q_n}{\sqrt{12} 100\%} = 0,15\% \frac{20}{3,46 \cdot 100\%} = 8,67 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (3)$$

Враховуючи те, що температура робочих умов застосування складових елементів ЗВ обертаючих параметрів ЕД знаходиться в межах від  $-10$  до  $+40$  °С, тобто максимально можлива зміна температури складає  $\Delta t = 50$  °С. А із специфікації на масштабний перетворювач (операційний підсилювач), який є складовим елементом вимірювального каналу засилля, відомо, що дрейф напруги зміщення нуля операційного підсилювача складає  $U_{zm} = 9$  нВ/°С, то теоретично можливу (максимальну) стандартну невизначеність типу В обумовлену дрейфом напруги зміщення нуля операційного підсилювача в припущенні про рівномірність закону розподілу визначимо за формулою

$$u_{B,t} = \frac{k \Delta t}{\sqrt{12}} U_{zm} = 10^3 \frac{50}{3,46} 9 \cdot 10^{-9} = 130,06 \text{ мкВ.} \quad (4)$$

Стандартну невизначеність типу В, що обумовлена обмеженою розрядністю АЦП послідовного наближення, який підсумовує кількість імпульсів, що надходять від генератора тактових імпульсів (наявність зони нечутливості АЦП)  $h = U_o / (2^m - 1)$ , при опорному значенні напруги  $U_o = 3$  В і розрядності  $m = 16$ , в припущенні про трикутний закон розподілу похибки квантування, визначимо за формулою

$$u_{B,m} = \frac{h}{\sqrt{24}} = \frac{U_o / (2^m - 1)}{\sqrt{24}} = \frac{3}{(2^{16} - 1)4,9} = 9,34 \text{ мкВ.} \quad (5)$$

Також із специфікації відомо, що допустиме відхилення напруги джерела живлення сенсора зусилля складає  $\Theta_{U_M} = \pm 0,25$  мВ, а стандартну невизначеність типу В, яка обумовлена таким відхиленням напруги від номінального значення, в припущенні про його рівномірний розподіл, можна оцінити за формулою [18]

$$u_{B,\Theta_U} = \frac{\Theta_{U_M}}{\sqrt{12}} = \frac{\pm 0,25}{\sqrt{3}} = 0,14 \text{ мВ.} \quad (6)$$

Оскільки, із технічної документації на сенсор зусилля відомо, що допустиме відхилення опору мостової схеми складає  $\Theta_R = \pm 0,01$  кОм, то стандартна невизначеність типу В, яка виникає за рахунок невилученого залишку систематичного ефекту, пов'язаного з можливим відхиленням опору, складає

$$u_{B,R} = \frac{\Theta_R}{\sqrt{12}} = \frac{\pm 10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ Ом.} \quad (7)$$

Стандартну невизначеність типу В, що обумовлена температурною похибкою опору тензорезисторів при максимально можливій зміні температури оточуючого повітря  $\Delta t = 50$  °C та відомому температурному коефіцієнту опору, що складає  $\alpha_t = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , можна визначити на основі рівняння, яке виражає залежність опору від температури  $R = R_0 \alpha_t \Delta t$ , за формулою

$$u_{B,R_t} = \frac{\alpha_t |\Delta t|}{\sqrt{12}} R = 2,5 \cdot 10^{-6} \frac{50}{3,46} 3,25 \cdot 10^3 = 117,41 \text{ мОм.} \quad (8)$$

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена наявністю невилученого систематичного ефекту пов'язаного із наявністю похибки визначення довжини вимірювального важеля, яка дорівнює  $\Delta_l = \pm 0,01$  мм, складає

$$u_{B,l} = \frac{\Delta_l}{\sqrt{12}} = \frac{\pm 0,01}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ мкм.} \quad (9)$$

Комбіновану стандартну невизначеність типу В із врахуванням розрахованих вище складових стандартних невизначеностей типу В, знайдемо як позитивний квадратний корінь з комбінованої дисперсії типу В, яка описується формулою

$$u_{B_c}^2 = \left(\frac{\partial M_B}{\partial Q}\right)^2 u_{C_3}^2 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial U_a}\right)^2 u_{B,t}^2 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial m}\right)^2 u_{B,m}^2 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial U_M}\right)^2 u_{B,\Theta_U}^2 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial R}\right)^2 [u_{B,R}^2 + u_{B,R_t}^2] + \left(\frac{\partial M_B}{\partial l}\right)^2 u_{B,l}^2, \quad (10)$$

де

$$\frac{\partial M_B}{\partial Q} = gl = 9,81 \left(\frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}\right); \quad \frac{\partial M_B}{\partial U_a} = -\frac{4RS_T U_o gl}{kU_M U_a (2^m - 1)} N = -3,33 \left(\frac{\text{Нм}}{\text{В}}\right);$$

$$\frac{\partial M_B}{\partial m} = -\frac{4RS_T U_o gl}{kU_M (2^m - 1)^2} 2^m N \ln(2) = -6,93 \left(\frac{\text{Нм}}{\text{В}}\right); \quad \frac{\partial M_B}{\partial U_M} = -\frac{4RS_T U_o gl}{kU_M^2 (2^m - 1)} N = -1,54 \left(\frac{\text{Нм}}{\text{В}}\right);$$

$$\frac{\partial M_B}{\partial R} = \frac{4S_T U_o gl}{kU_M (2^m - 1)} N = 3,08 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{Нм}}{\text{Ом}}\right); \quad \frac{\partial M_B}{\partial l} = \frac{4RS_T U_o g}{kU_M (2^m - 1)} N = 10(\text{Н}) \quad - \text{ коефіцієнти чутливості.}$$

Підставляючи розраховані значення коефіцієнтів чутливості та стандартних невизначеностей типу В у рівняння (10), отримаємо значення комбінованої стандартної невизначеності типу В, що складає  $u_{B_c} = 86,89 \cdot 10^{-3}$  Нм.

Комбіновану невизначеність результату вимірювання із врахуванням максимальної

експериментальної невизначеності типу А та комбінованої невизначеності типу В розрахуємо за формулою

$$u_c = \sqrt{u_A^2(\bar{M}) + u_{Bc}^2} = 889,99 \cdot 10^{-4} \text{ Нм.} \quad (11)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності, що буде нормуватися в технічній документації на ЗВ обертальних параметрів ЕД, розрахуємо ефективне число ступенів вільності за формулою

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \frac{u_c^4}{u_A^4(\bar{M})} = 20 \frac{88,99^4}{19,27^4} = 9100. \quad (12)$$

Далі за допомогою таблиці Стьюдента визначимо коефіцієнт охоплення  $k_p$  за допомогою значень ефективного числа ступенів вільності та довірчої ймовірності, яка прийнята рівною  $P = 0,95$  на основі інформації про ймовірність аналогів (підтверджена випробуваннями), та дорівнює  $k_p = 1,96$ .

Знаючи коефіцієнт охоплення та комбіновану невизначеність результату вимірювання, отримаємо розширену невизначеність, що нормуватиметься в технічній документації на досліджуваній ЗВ обертаючих параметрів ЕД, яка дорівнює

$$U_H = k_p u_c = 1,96 \cdot 889,99 \cdot 10^{-4} = 0,17 \text{ Нм.} \quad (13)$$

На основі виконаних досліджень невизначеностей вимірювань моменту складаємо бюджет невизначеностей, що наведений в таблиці 2. Ці складові невизначеностей вимірювань відповідають нормованим метрологічним характеристикам ЗВ обертаючих моментів РС, які прописуються в нормативних документах (технічній документації) на ЗВ.

Таблиця 2

Бюджет невизначеності

Вхідні величини	Оцінка вхідних величин	Стандартні невизначеності	Коефіцієнти чутливості	Вклади невизначеностей
$M_i$	10,04 Нм	$19,27 \cdot 10^{-3}$ Нм	1	$u_A(\bar{M})$
$\gamma$	0,15 %	$8,67 \cdot 10^{-3}$ кг	$9,81 \text{ м}^2/\text{с}^2$	$g   u_{c3}$
$U_{3M}$	9 нВ/°С	130,06 мкВ	-3,33 Нм/В	$\frac{\partial M_B}{\partial U_a} u_{B,t}$
$m$	16	9,34 мкВ	-6,93 Нм/В	$\frac{\partial M_B}{\partial m} u_{B,m}$
$\Theta_{UM}$	$\pm 0,25$ мВ	0,14 мВ	-1,54 Нм/В	$\frac{\partial M_B}{\partial U_M} u_{B,\Theta u}$
$\Theta_R$	$\pm 0,01$ кОм	5,77 Ом	$3,08 \cdot 10^{-3}$ Нм/Ом	$\frac{\partial M_B}{\partial R} u_{B,R}$
$\alpha_t$	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	117,41 мОм	$3,08 \cdot 10^{-3}$ Нм/Ом	$\frac{\partial M_B}{\partial R} u_{B,Rt}$
$l$	1 м	5,77 мкм	10 Н	$\frac{\partial M_B}{\partial l} u_{B,l}$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
$\bar{M}$	10,04 Нм	$88,99 \cdot 10^{-3}$ Нм	1,96	0,17 Нм

Для визначення чи уточнення міжповірного інтервалу ЗВ, припустимо, що ЗВ обертаючих моментів планується експлуатувати 7 годин на добу. Напрацювання даного ЗВ без метрологічних відмо складає 3500 годин. При такій інтенсивності експлуатації ЗВ – календарна протяжність експлуатації  $t$  відповідає 2-м календарним рокам.

Далі ЗВ передається в експлуатацію, і після деякого часу експлуатації, в реальних умовах експлуатації (за робочих температур) виконуємо перерахунок складових невизначеностей типу В та розрахунок розширеної невизначеності в реальних умовах експлуатації  $U_E$ .

Переглянемо складові невизначеності типу В.

Робоча температура оточуючого повітря під час експлуатації складає  $t_v = 25$  °С, атмосферний тиск та вологість знаходиться в допустимих межах.

Невизначеність типу В, що вноситься за рахунок відхилення температури оточуючого середовища від нормальних умов  $t_{н.у.} = 20$  °С при дрейфу напруги зміщення нуля операційного підсилювача  $U_{зм} = 9$  нВ/°С, перерахуємо за формулою

$$u_{B,tc} = \frac{k|t_{н.у.} - t_v|}{\sqrt{12}} U_{зм} = 10^3 \frac{|20 - 25|}{3,46} 9 \cdot 10^{-9} = 13,01 \text{ мкВ.} \quad (14)$$

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена обмеженням класом точності сенсора зусилля (3) залишається незмінною.

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена обмеженою розрядністю АЦП залишається рівною значенню, що розраховане за формулою (5).

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена відхилення напруги від номінального значення також залишається рівною значенню, що розраховане за формулою (6).

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена відхилення опору від номінального значення залишається рівною значенню, що розраховане за формулою (7).

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена температурною похибкою відхилення опору тензорезисторів при відхиленні робочої температури  $t_v = 25$  °С від температури за нормальних умов  $t_{н.у.} = 20$  °С, складе

$$u_{B,Rt} = \frac{\alpha_1 |t_{н.у.} - t_v|}{\sqrt{12}} R = 2,5 \cdot 10^{-6} \frac{|20 - 25|}{3,46} 3,25 \cdot 10^3 = 11,74 \text{ мОм.} \quad (15)$$

Стандартна невизначеність типу В, що обумовлена похибкою визначення вимірювального важеля, яка розрахована за формулою (9) залишається незмінною.

Підставляючи перераховані невизначеності типу В у рівняння (10), отримаємо значення комбінованої стандартної невизначеності типу В, що дорівнюватиме  $u_{Bce} = 86,88 \cdot 10^{-3}$  Нм.

Комбіновану невизначеність результату вимірювання в реальних умовах експлуатації розрахуємо за формулою

$$u_{ce} = \sqrt{u_A^2(\bar{M}) + u_{Bce}^2} = 889,91 \cdot 10^{-4} \text{ Нм.} \quad (16)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності в реальних умовах експлуатації, розрахуємо ефективне число ступенів вільності за формулою

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \frac{u_{ce}^4}{u_A^4(\bar{M})} = 2 \frac{88,99^4}{19,27^4} = 910. \quad (17)$$

Коефіцієнт охоплення  $k_{2P-1}$ , що відповідає довірчій ймовірності  $2P-1$ , тобто значенню ймовірності, яке відповідає вірогідності метрологічної справності ЗВ в реальних умовах експлуатації (при  $P = 0,95$ ,  $2P - 1 = 2 \cdot 0,95 - 1 = 0,9$ ), визначимо із таблиці Стьюдента за ефективним числом ступенів вільності  $v_{\text{eff}} > 30$  та довірчою ймовірністю  $P_e = 0,9$ , який дорівнює  $k_{2P-1} = 1,64$ .

Значення розширеної невизначеності вимірювань  $U_E$  в реальних умовах експлуатації складає

$$U_E = k_{2P-1} u_{ce} = 1,64 \cdot 889,91 \cdot 10^{-4} = 0,15 \text{ Нм.} \quad (18)$$

Як видно із розрахованого за формулою (18), значення розширеної невизначеності в реальних умовах експлуатації є меншим за пронормоване в технічній документації значення розширеної невизначеності.

Далі на основі розрахованих під час метрологічної атестації значень невизначеностей та значень невизначеностей в реальних умовах експлуатації визначимо значення міжповірного інтервалу ЗВ.

Взявши за основу календарну протяжність напрацювання  $t = 2$  роки, першу оцінку міжповірного інтервалу  $T_1$  ЗВ обертаючих моментів РС розрахуємо за формулою

$$T_1 = t \frac{\ln\left(\frac{U_E}{k_{2P-1} u_A(\bar{M})}\right)}{\ln\left(\frac{U_H}{k_P u_A(\bar{M})}\right)} = 2 \frac{\ln\left(\frac{0,15}{1,64 \cdot 19,27 \cdot 10^{-3}}\right)}{\ln\left(\frac{0,17}{1,96 \cdot 19,27 \cdot 10^{-3}}\right)} = 2,1 \text{ р.} \quad (19)$$

Другу оцінку міжперевірочного інтервалу ЗВ  $T_2$ , розраховується за формулою

$$T_2 = t \frac{U_E - k_{2P-1} u_A(\bar{M})}{U_H - k_P u_A(\bar{M})} = 2 \frac{0,15 - 1,64 \cdot 19,27 \cdot 10^{-3}}{0,17 - 1,96 \cdot 19,27 \cdot 10^{-3}} = 1,79 \text{ р.} \quad (20)$$

Із отриманих на основі концепції невизначеності двох оцінок міжповірочних інтервалів ЗВ обертаючих моментів РС, за міжперевірочний інтервал приймається мінімальне значення між оцінками  $T_1$  і  $T_2$ , тобто

$$T_{ЗВ} = \min[T_1, T_2] = \min[2,1, 1,79] = 1,79 \text{ р.} = 21 \text{ міс.} \quad (21)$$

Значення міжповірочного інтервалу ЗВ доцільно вибирати в місяцях з ряду натуральних чисел [7, 8]: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 15; 18; 21; 24; 30 і так далі через 6 міс.

Отже, на основі проведених розрахунків невизначеностей вимірювань, встановлено значення міжповірочного інтервалу ЗВ обертаючих моментів РС, що відповідає 21 місяцю.

#### Висновки

В результаті метрологічної атестації ЗВ моментів РС встановлено нормовані значення комбінованої та розширеної невизначеностей. На основі нормованих метрологічних характеристик запропоновано математичний апарат для визначення міжповірочного інтервалу ЗВ на основі концепції невизначеності, що відповідає міжнародним вимогам до оцінювання характеристик якості вимірювань. Такий підхід забезпечує єдність вимірювань та підвищує конкурентоспроможність вітчизняних розробок на світовому ринку.

#### Список літературних джерел

1. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement».
2. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector».
3. Васілевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань : [ навчальний посібник ] / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 224 с. – ISBN 978-966-2393-86-6 (2-ге видання).
4. Васілевський О. М. Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт / О. М. Васілевський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – № 3 (7). – 2006. – С. 147–151.
5. Васілевський О. М. Засіб вимірювання динамічного моменту електромоторів та аналіз його точності / О. М. Васілевський // Вимірювальна техніка та метрологія. – № 73. – 2012. – С. 52–56.
6. Васілевський О. М. Дослідження якості результатів вимірювань зусилля на основі концепції невизначеності // Вісник інженерної академії України. – Київ. – 2013. – № 3 – 4. – С. 229 – 232.
7. Васілевський О. М. Нормування показників метрологічної надійності / О. М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 9 – 13.
8. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : [навчальний посібник] / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с.