

УДК 621.317

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МІЖПОВІРОЧНОГО ІНТЕРВАЛУ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ
НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

О.М.Васілевський^{1,2}, канд.техн.наук

¹ – Міністерство освіти і науки України,

пр. Перемоги, 10, Київ, 01135, Україна, e-mail: wasilevskiy@mail.ru

² – Вінницький національний технічний університет,

Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна.

Запропоновано методику визначення міжповірочного інтервалу засобів вимірювання, яка базується на використанні концепції невизначеності вимірювання для опрацювання експериментальних даних під час метрологічної атестації. Наведено результати апробації методики для визначення міжповірочного інтервалу засобу вимірювання крутильного моменту електродвигунів. Бібл. 15, табл. 3.

Ключові слова: метрологічна атестація, міжповірочний інтервал, невизначеність вимірювання, крутильний момент, засоби вимірювання, клас точності.

Вступ. Характерною особливістю сучасного стану засобів вимірювання (ЗВ) є їхнє широке впровадження у виробничі та технологічні процеси. Надійність, що визначає здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом значного періоду часу, є важливим техніко-економічним показником якості цих засобів. Вона підтримується правильною експлуатацією ЗВ, профілактичним контролем, перевіркою та ремонтом. Характеристикою надійності ЗВ, яка підлягає визначенню, є міжповірочний інтервал. Однак існуючі методики визначення цього інтервалу не враховують сучасних міжнародних вимог до оцінювання та подання результатів вимірювання на основі теорії невизначеності.

Метою даної статті є створення такої методики визначення міжповірочного інтервалу ЗВ під час їхньої метрологічної атестації чи перевірки, яка враховує міжнародні вимоги, що діють у сфері оцінювання якості вимірювання параметрів і випробування електротехнічної продукції.

Аналіз стану досліджень та публікацій. У сучасних літературних джерелах достатньо обґрунтовано розглядаються теоретичні підходи до визначення міжповірочних інтервалів на основі допустимих меж нестабільності метрологічних характеристик, критерію метрологічної надійності (нестабільності), дрейфу метрологічних характеристик, що базуються на теорії похибок вимірювання і надійності технічних засобів [1]–[5]. Окремо розглянуто способи оцінювання і подання невизначеностей вимірювань, що ґрунтуються на міжнародних вимогах [6]–[10]. Однак підходи до визначення міжповірочних інтервалів ЗВ під час їхньої метрологічної атестації чи перевірки на основі концепції невизначеності вимірювань у вітчизняних та зарубіжних літературних джерелах відсутні. Тому виникає необхідність у розробці методики визначення міжповірочних інтервалів ЗВ на основі концепції невизначеності.

Якщо вдається визначити, хоча б орієнтовно, середню частку метрологічних відмов $q(t)$ ЗВ у загальному їхньому потоці, то вірогідність роботи ЗВ без метрологічних відмов $P_M(t)$ за час t напруцювання оцінюють [1], [6] за формулою

$$P_M(t) = 1 - q(t)[1 - P(t)], \quad (1)$$

де $P(t)$ – технічна вірогідність безвідмовної роботи ЗВ за час t .

Якщо середню частку метрологічних відмов $q(t)$ визначити не вдається, то беруть найгірший випадок, коли $q(t) = 1$, а $P_M(t) = P(t)$.

Відомо, що основними показниками, які можуть використовуватися для розрахунку характеристик метрологічної надійності, є [1],[4]: вірогідність безвідмовної роботи; інтенсивність метрологічних відмов; середній час до першої метрологічної відмови; параметр потоку відмов (метрологічних); напрацювання до першої метрологічної відмови. Однак в матеріалах розробників ЗВ, що подаються на випробування з метою затвердження типу чи метрологічної атестації, часто відсутня достовірна інформація про нестабільність метрологічних характеристик ЗВ, яка необхідна для обґрунтованого присвоєння ЗВ первинного міжповірочного інтервалу. Тоді для його оцінки можна скористатися нормованими

значеннями показників надійності, що вказані в технічних умовах на ЗВ, або використати інформацію про міжповірочний інтервал аналога з подальшим коригуванням цього значення в процесі експлуатації на основі даних про інтенсивність використання та умови вимірювання.

Викладення основного матеріалу. Для оцінки міжповірочних інтервалів ЗВ на основі концепції невизначеності вимірювання пропонується наступна методика.

1. Проводиться серія вимірювань на нижній межі діапазону (мінімальне значення, що нормується в ЗВ), всередині діапазону вимірювання ЗВ та на верхній межі вимірювання (максимальне значення, що нормується в ЗВ). При цьому на вході ЗВ задаються зразкові значення вимірюваної величини, що відповідають пронормованому діапазону вимірювання ЗВ [11]. На основі отриманих експериментальних даних знаходимо стандартні невизначеності типу A для нижньої межі вимірювання, для середини діапазону вимірювання та для верхньої межі вимірювання за формулою

$$u_A(\bar{x}_K) = \left[\sum_{i=1}^n (x_{i,K} - \bar{x}_K)^2 / (n-1)n \right]^{1/2}, \quad (2)$$

де $x_{i,K}$ – i -те значення у K -й групі спостережень ($K=1;2;3$), відповідно на нижній межі вимірювання ($K=1$), всередині діапазону вимірювання ($K=2$) та на верхній межі вимірювання ($K=3$); \bar{x}_K – середнє арифметичне значення K -ї групи спостережень; n – кількість значень в K -й групі спостережень [10,12].

З отриманих за формулою (2) стандартних невизначеностей типу A необхідно вибрати найбільшу за значенням (максимальну) стандартну невизначеність цього типу $u_{Amax}(\bar{x})$, яку в подальшому буде використано для визначення міжповірочного інтервалу ЗВ.

2. Виконується оцінювання стандартних невизначеностей типу B на основі фонду доступної інформації про невилучені залишки систематичних похибок, які теоретично можуть проявлятися у процесі виконання вимірювань. При цьому слід спиратися на інформацію про раніше проведені вимірювання, допустимі робочі умови експлуатації ЗВ, фізичні властивості вимірюваної величини, паспортні дані ЗВ або довідники [10]. Після оцінки теоретично можливих складових стандартних невизначеностей типу B необхідно розрахувати комбіновану (сумарну) стандартну невизначеність u_{cB} типу B на основі відомих форм подання комбінованих невизначеностей [10].

3. На основі отриманих максимальної стандартної невизначеності типу A та комбінованої невизначеності типу B (теоретично можливих впливах на результат вимірювання складових невизначеностей типу B) розраховуємо комбіновану невизначеність u_c результату вимірювання за формулою

$$u_c = \sqrt{[u_{Amax}(\bar{x})]^2 + [u_{cB}]^2}. \quad (3)$$

Якщо вимірювана величина x є функцією декількох вхідних величин (попередньо виміряних або заданих), то комбіновану невизначеність результату вимірювання при некорельованих вхідних

$$величинах знаходимо
$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left[u(y_k) \frac{\partial f(\bar{y})}{\partial y_k} \right]^2}, \quad (4)$$$$

де $x = f(\bar{y})$; \bar{y} – вектор вхідних величин $y_1 \dots y_m$; $\partial f / \partial y_k$ – чутливість функції перетворення ЗВ за величиною y_k ; $u(y_k)$ – стандартна невизначеність вимірювання величини y_k , оцінена за типом A або за типом B .

У випадку, коли між величинами y_k та y_j ($k = 1 \dots m$; $j = 1 \dots m$) існує кореляційний зв'язок, формула для знаходження комбінованої невизначеності набуває вигляду

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial y_k} u(y_k) \cdot \frac{\partial f}{\partial y_j} u(y_j) \cdot r(y_k; y_j)}, \quad (5)$$

де $u(y_j)$ та $u(y_k)$ – стандартні невизначеності вимірювання вхідних величин y_j та y_k , оцінені за типом A або за типом B ; $r(y_k; y_j) = \frac{\sum_{l=1}^N (y_{kl} - \bar{y}_k)(y_{jl} - \bar{y}_j)}{\left[\sum_{l=1}^N (y_{kl} - \bar{y}_k)^2 \sum_{l=1}^N (y_{jl} - \bar{y}_j)^2 \right]^{1/2}}$ – коефіцієнт кореляційного зв'язку; N – кількість пар виміряних значень величин y_k та y_j ; l – номер пари.

4. Знаходимо розширену невизначеність, яка буде прописана як нормована величина в технічній документації на ЗВ. Її одержують шляхом множення комбінованої невизначеності результату вимірювання на коефіцієнт охоплення за формулою

$$U_H = k_P u_c(x), \quad (6)$$

де k_P – коефіцієнт охоплення, що визначається на підставі інформації про довірчу ймовірність P та ефективне число ступенів свободи ν_{eff} .

Довірча ймовірність P , як правило, вказується в технічних умовах на ЗВ. Якщо в технічній документації не вказано довірчу ймовірність, то вона визначається експериментальним шляхом або встановлюється апріорно [1, 2, 4].

Ефективне число ступенів свободи розраховується за формулою Велча-Саттерсвейта

$$\nu_{eff} = (n-1) u_c^4(x) [u_{Amax}(\bar{x})]^{-4}. \quad (7)$$

На основі інформації про довірчу ймовірність P та ефективне число ступенів свободи ν_{eff} з таблиці Стюдента визначається коефіцієнт охоплення k_P .

Якщо $\nu_{eff} > 30$, то $k_{0,9} = 1,64$ для ймовірності $P = 0,9$; $k_{0,95} = 1,96$ для $P = 0,95$; $k_{0,99} = 2,58$ для $P = 0,99$ і $k_{0,9973} = 3$ для $P = 0,9973$.

5. На основі апріорної інформації про інтенсивність експлуатації ЗВ та значення середнього напрацювання до відмови ЗВ визначають календарну тривалість експлуатації ЗВ.

6. Для визначення міжповірного інтервалу ЗВ його потрібно деякий час випробувати (експлуатувати) в реальних умовах, за яких будуть виконуватися вимірювання.

7. Після тривалих випробувань (дослідної експлуатації) ЗВ розраховують комбіновану та розширену невизначеності в реальних умовах експлуатації. При цьому під час розрахунків враховують робочі умови експлуатації (реальне значення температури навколишнього повітря та інші умови вимірювань). Тобто виконують перерахунок невизначеностей відповідно до пунктів 1–4. В результаті отримують значення розширеної невизначеності вимірювань U_E в реальних умовах експлуатації, яке в подальшому буде використане для визначення (уточнення) міжповірного інтервалу ЗВ.

8. На основі розрахованих у пунктах 1 – 7 величин та в припущенні про симетричність закону розподілу невизначеностей першу оцінку міжповірного інтервалу T_1 пропонується розраховувати за

$$T_1 = t \ln \left(\frac{U_E}{k_{2P-1} u_{Amax}(\bar{x})} \right) \ln^{-1} \left(\frac{U_H}{k_P u_{Amax}(\bar{x})} \right), \quad (8)$$

де k_{2P-1} – коефіцієнт охоплення, що відповідає довірчій ймовірності $(2P-1)$; t – календарна тривалість експлуатації ЗВ.

Коефіцієнт охоплення k_{2P-1} визначається з таблиці Стюдента на основі інформації про довірчу ймовірність $(2P-1)$ та ефективне число ступенів свободи ν_{eff} .

9. Для другої оцінки міжповірного інтервалу ЗВ T_2 пропонується формула

$$T_2 = t (U_E - k_{2P-1} u_{Amax}(\bar{x})) [U_H - k_P u_{Amax}(\bar{x})]^{-1}. \quad (9)$$

10. На основі визначених оцінок міжповірочних інтервалів T_1 і T_2 встановлюється міжповірочний інтервал ЗВ, за який приймається мінімальне з двох значень T_1 і T_2 , тобто

$$T_{ЗВ} = \min[T_1, T_2]. \quad (10)$$

Отже, запропонована методика визначення міжповірочних інтервалів ЗВ дозволяє встановлювати та уточнювати міжповірочний інтервал на основі концепції невизначеності вимірювань. Вона відповідає міжнародним вимогам до оцінювання якості вимірювань та сприяє забезпеченню єдності вимірювань і випробувань.

Для перевірки запропонованої методики наведемо результати її практичного використання під час метрологічної атестації засобу вимірювання крутильного моменту електродвигунів.

Визначення міжповірочного інтервалу ЗВ крутильного моменту електродвигунів. Принцип роботи та математична модель ЗВ крутильного моменту електродвигунів (ЕД) розглянуті в роботах [12]–[15]. Для впровадження ЗВ крутильного моменту ЕД в промислову експлуатацію чи виставлення на продаж потрібно виконати його метрологічну атестацію та встановити міжповірочний інтервал. Для цього виконаємо поетапні експериментальні дослідження ЗВ крутильного моменту ЕД відповідно до запропонованої вище методики.

Проведемо серію вимірювань моментів у трьох точках діапазону, що відповідає нижній межі вимірювання 0,1 Нм, середині діапазону вимірювання 5 Нм, та верхній межі вимірювання 10 Нм. Для

цього на вході ЗВ задаємо зразковий момент M_3 за допомогою набору зразкових тягарців. Рівняння, за яким можна описати задання зразкового моменту, має вигляд

$$M_3 = gRm_3, \quad (11)$$

де $g = 9,8066 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $R = 9,9889 \text{ см}$ – радіус диска, який закріплений на валу ЕД, що входить у структуру вимірювального перетворювача; m_3 – маса зразкових тягарців.

Для задання моменту з нижньою межею вимірювання необхідно прикріпити до диска радіусом R , що закріплений на валу, зразкову масу, яка відповідає $102,176 \text{ г}$. Тягарці прикріплюються за допомогою струни довжиною L .

Після задання зазначених вище параметрів виконуємо серію вимірювань моменту на нижній межі вимірювання $0,1 \text{ Нм}$, яку заносимо до табл. 1. На основі експериментальних даних табл. 1 розраховуємо стандартну невизначеність типу A за формулою (2), яка для нижньої межі вимірювання моменту складає

$$u_A(\bar{M}_{\min}) = 2,49 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}. \quad (12)$$

Далі знаходимо стандартну невизначеність типу A в середині діапазону вимірювання. Для цього закріпимо на диску радіусом $R=9,9889 \text{ см}$ зразковий тягарець масою $5,10883 \text{ кг}$ і проведемо серію вимірювань. Результати вимірювань моментів всередині діапазону вимірювання ЗВ (5 Нм)

Таблиця 1

№	Нм	№	Нм
1	0,146	11	0,134
2	0,117	12	0,117
3	0,127	13	0,135
4	0,121	14	0,126
5	0,117	15	0,131
6	0,132	16	0,125
7	0,114	17	0,113
8	0,138	18	0,114
9	0,114	19	0,105
10	0,115	20	0,106

Таблиця 2

№	Нм	№	Нм
1	5,057	11	5,058
2	5,031	12	5,017
3	5,049	13	5,025
4	5,036	14	5,016
5	5,055	15	5,037
6	5,034	16	5,031
7	5,029	17	5,025
8	5,018	18	5,029
9	5,055	19	5,035
10	5,015	20	5,032

Таблиця 3

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

занесені до табл. 2. Підставляючи їх у формулу (2), розраховуємо стандартну невизначеність типу A середини діапазону вимірювання (невизначеність калібрування)

$$u_A(\bar{M}_{cp}) = 3,05 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}. \quad (13)$$

Для знаходження невизначеності ЗВ моменту на верхній межі вимірювання проведемо серію вимірювань при зразковому значенні $m_{\max}=10,21765 \text{ кг}$. Результати вимірювання моментів на верхній межі подані в табл. 3. Підставляючи їх у формулу (2), отримаємо стандартну невизначеність типу A (невизначеність калібрування) на верхній межі вимірювання

$$u_A(\bar{M}_{\max}) = 19,27 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}. \quad (14)$$

Відповідно до пункту 1 методики визначення міжповірного інтервалу ЗВ з отриманих за формулою (2) експериментальних стандартних невизначеностей типу A (невизначеностей калібрування) вибираємо найбільшу за значенням (максимальну) експериментальну невизначеність типу A $u_{A\max}(\bar{x})$. У даному випадку найбільшою є невизначеність типу A , що проявляється на верхній межі вимірювання. Саме цю стандартну невизначеність типу A $u_A(\bar{M}_{\max}) = 19,27 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}$ в подальшому буде використано для встановлення міжповірного інтервалу ЗВ моменту.

Рівняння вимірювання ЗВ крутильного моменту ЕД в статичному режимі роботи описується виразом

$$M_B = QgL = \frac{4RS_T U_o}{U_a U_m (2^m - 1)} \Delta U N g L, \quad (15)$$

де U_m – напруга живлення мостової схеми 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 ($L=1 \text{ м}$); ΔU – напруга на виході сенсора зусилля (вхідна напруга масштабного перетворювача); U_a – напруга на виході масштабного перетворювача; 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 [13, 15].

Далі виконаємо оцінювання складових стандартних невизначеностей типу B , які проявляються за рахунок невилучених залишків систематичних похибок. Оскільки до складових елементів ЗВ входить сенсор зусилля, то оцінимо складову невизначеності типу B , що вноситься сенсором зусилля за рахунок зведеної похибки $\gamma=0,15\%$ при дії максимального зусилля $Q_n=20$ кг за формулою [15]

$$u_{C3} = \frac{\gamma Q_n}{\sqrt{12} \cdot 100\%} = 8,67 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (16)$$

Із довідникових даних на складові елементи ЗВ крутильних моментів ЕД відомо, що температура робочих умов їхнього застосування знаходиться в межах від $t_{min} = -10$ до $t_{max} = +40^\circ\text{C}$. Також із паспорта масштабного перетворювача (операційний підсилювач), який є складовим елементом вимірювального каналу зусилля, відомо, що дрейф напруги зміщення нуля операційного підсилювача складає $U_{zm}=9$ нВ/°С. Тому теоретично можливу (максимальну) стандартну невизначеність типу B , обумовлену дрейфом напруги зміщення нуля операційного підсилювача, в припущенні про її рівномірний закон розподілу визначимо за формулою

$$u_{B,t} = \frac{k |t_{max} - t_{min}|}{\sqrt{12}} U_{zm} = 130,06 \text{ мкВ.} \quad (17)$$

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

$$\text{формулою} \quad u_{B,m} = \frac{h}{\sqrt{24}} = \frac{U_o / (2^m - 1)}{\sqrt{24}} = 9,34 \text{ мкВ.} \quad (18)$$

Також із специфікації відомо, що допустиме відхилення напруги джерела живлення сенсора зусилля складає $\Theta_{Um} = \pm 0,25$ мВ, а стандартну невизначеність типу B , яка обумовлена таким відхиленням напруги від номінального значення, у припущенні про його рівномірний закон розподілу можна оцінити за формулою [15]

$$u_{B,\Theta_u} = \Theta_{Um} / \sqrt{12} = 0,14 \text{ мВ.} \quad (19)$$

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 B , яка виникає за рахунок невилученого залишку, пов'язаного з можливим відхиленням опору, складає

$$u_{B,R} = \Theta_R / \sqrt{12} = 5,77 \text{ Ом.} \quad (20)$$

Стандартну невизначеність типу B , що обумовлена температурною нестабільністю опору тензорезисторів при максимально можливій зміні температури навколишнього повітря $\Delta t = 50$ °С та відомому значенні температурного коефіцієнта опору, що складає $\alpha_t = 2,5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, можна визначити на основі рівняння, яке виражає залежність опору від температури $R = R_0 \alpha_t \Delta t$, за формулою

$$u_{B,Rt} = \frac{\alpha_t |\Delta t|}{\sqrt{12}} R = 117,41 \text{ мОм.} \quad (21)$$

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

$$u_{B,l} = \Delta l / \sqrt{12} = 5,77 \text{ мкм.} \quad (22)$$

Комбіновану стандартну невизначеність типу B із врахуванням розрахованих вище складових стандартних невизначеностей типу B знайдемо як додатне значення квадратного кореня з комбінованої дисперсії типу B , яка описується формулою

$$u_{Bc}^2 = \left(\frac{\partial M_e}{\partial Q} \right)^2 u_{C3}^2 + \left(\frac{\partial M_e}{\partial U_a} \right)^2 u_{B,t}^2 + \left(\frac{\partial M_e}{\partial m} \right)^2 u_{B,m}^2 + \left(\frac{\partial M_e}{\partial U_m} \right)^2 u_{B,\Theta_u}^2 + \left(\frac{\partial M_e}{\partial R} \right)^2 [u_{B,R}^2 + u_{B,Rt}^2] + \left(\frac{\partial M_e}{\partial l} \right)^2 u_{B,l}^2, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad \partial M_e / \partial Q &= gL = 9,81 \text{ (м}^2/\text{с}^2\text{)}; & \partial M_e / \partial U_a &= -4RS_m U_o gLN \left[kU_m U_a (2^m - 1) \right]^{-1} = -3,33 \text{ (Нм/В)}; \\ \partial M_e / \partial m &= -4RS_m U_o gL 2^m N \ln(2) \left[kU_m (2^m - 1)^2 \right]^{-1} = -6,93 \text{ (Нм/В)}; \\ \partial M_e / \partial U_m &= -4RS_m U_o gLN \left[kU_m^2 (2^m - 1) \right]^{-1} = -1,54 \text{ (Нм/В)}; \\ \partial M_e / \partial R &= 4S_m U_o gLN \left[kU_m (2^m - 1) \right]^{-1} = 3,08 \cdot 10^{-3} \text{ (Нм/Ом)}; \\ \partial M_e / \partial L &= 4RS_m U_o gN \left[kU_m (2^m - 1) \right]^{-1} = 10 \text{ (Н)} - \text{коєфіцієнти чутливості.} \end{aligned}$$

Підставляючи розраховані значення коефіцієнтів чутливості та стандартних невизначеностей типу B у рівняння (23), отримаємо значення комбінованої стандартної невизначеності типу B , що складає $u_{Bc} = 86,89 \cdot 10^{-3}$ Нм.

Комбіновану невизначеність результату вимірювання із врахуванням максимальної експериментальної невизначеності типу A та комбінованої невизначеності типу B розрахуємо за формулою

$$u_c = \sqrt{u_A^2 (\bar{M}_{\max}) + u_{Bc}^2} = 889,99 \cdot 10^{-4} \text{ Нм.} \quad (24)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності, що буде вказана в технічній документації на ЗВ крутильних моментів ЕД, розрахуємо ефективне число ступенів свободи за формулою

$$v_{\text{eff}} = u_c^4 \left(\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i} \right)^{-1} = (n-1) u_c^4 \left[u_A^4 (\bar{M}_{\max}) \right]^{-1} = 9100. \quad (25)$$

Далі, знаючи ефективне число ступенів свободи та довірчу ймовірність, яка прийнята $P=0,95$ на основі інформації про ймовірність аналогів, знаходимо коефіцієнт охоплення, який дорівнює $k_p=1,96$.

Знаючи коефіцієнт охоплення та комбіновану невизначеність результату вимірювання, отримуємо розширену невизначеність, що нормуватиметься в технічній документації на досліджуваний ЗВ крутильних моментів ЕД

$$U_n = k_p u_c = 0,17 \text{ Нм.} \quad (26)$$

Відповідно до п. 5 методики, в припущенні про інтенсивність експлуатації ЗВ 7 годин на добу та напрацюванні 3500 годин, визначимо календарну тривалість експлуатації t , яка відповідає 2-м календарним рокам.

Далі розроблений ЗВ крутильних моментів ЕД передається в експлуатацію. Після тривалої експлуатації в реальних умовах (за робочих умов температури) виконуємо перерахунок складових невизначеностей типу B та розширеної невизначеності.

Невизначеність типу B , що обумовлена обмеженим класом точності сенсора зусилля (16), залишається незмінною. Температура робочих умов експлуатації складає $t_v=25$ °С, а невизначеність типу B , що вноситься за рахунок відхилення температури оточуючого середовища від нормальних умов $t_{н.у.}=20$ °С при дрейфі напруги зміщення нуля операційного підсилювача $U_{зм}=9$ нВ/°С, дорівнює

$$u_{B,te} = \frac{k |t_{н.у.} - t_v|}{\sqrt{12}} U_{зм} = 13,01 \text{ мкВ.} \quad (27)$$

Невизначеність типу B , що обумовлена:

- обмеженою розрядністю АЦП, розраховується за формулою (18);
- відхиленням напруги від номінального значення, – за формулою (19);
- відхиленням опору від номінального значення, – за формулою (20);
- температурною нестабільністю опору тензорезисторів при відхиленні робочої температури $t_v=25$ °С від температури за нормальних умов $t_{н.у.}=20$ °С, дорівнює

$$u_{B,Rt} = \frac{\alpha_t |t_{н.у.} - t_v|}{\sqrt{12}} R = 11,74 \text{ МОм;} \quad (28)$$

– похибкою вимірювання довжини вимірювального важеля, яка розрахована за формулою (22), залишається незмінною.

Підставляючи перераховані невизначеності типу B у рівняння (23), отримаємо значення експлуатаційної комбінованої стандартної невизначеності типу B $u_{Bce} = 86,88 \cdot 10^{-3}$ Нм.

Комбіновану невизначеність результату вимірювання в реальних умовах експлуатації розраховуємо за формулою

$$u_{ce} = \sqrt{u_A^2(\bar{M}_{\max}) + u_{Bce}^2} = 889,91 \cdot 10^{-4} \text{ Нм.} \quad (29)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності в реальних умовах експлуатації, розраховуємо ефективне число ступенів свободи

$$\nu_{eff} = (n-1) \frac{u_{ce}^4}{u_A^4(\bar{M}_{\max})} = 9100. \quad (30)$$

Коефіцієнт охоплення k_{2P-1} , що відповідає довірчій ймовірності $(2P-1)$, тобто значенню ймовірності, яке відповідає вірогідності метрологічної справності ЗВ у реальних умовах експлуатації (при $P=0,95$, $2P-1=2 \cdot 0,95-1=0,9$), визначимо із таблиці Стюдента за ефективним числом ступенів свободи $\nu_{eff} > 30$ 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

$$U_E = k_{2P-1} u_{ce} = 0,15 \text{ Нм.} \quad (31)$$

Перша оцінка міжповірочного інтервалу ЗВ крутильних моментів ЕД, розрахована за формулою (8) для прийнятої календарної тривалості напрацювання $t=2$ роки, $T_1 = 2,1$ р. Друга оцінка міжповірочного інтервалу ЗВ, розрахована за формулою (9), $T_2 = 1,79$ р. Міжповірочний інтервал ЗВ крутильних моментів ЕД приймаємо рівним мінімальному значенню відповідно до формули (10):

$$T_{ЗВ} = \min[2,1; 1,79] = 1,79 \text{ р.} = 21 \text{ міс.}$$

Значення міжповірочного інтервалу ЗВ доцільно вибирати в місяцях з ряду натуральних чисел [1, 4]: 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 розробленої методики визначення міжповірочного інтервалу ЗВ виконано метрологічну атестацію ЗВ крутильних моментів ЕД, в результаті якої даному ЗВ приписано нормовані метрологічні характеристики, такі як комбінована невизначеність вимірювання $u_c = 88,99 \cdot 10^{-3}$ Нм, розширена невизначеність $U_n = 0,17$ Нм та міжповірочний інтервал ЗВ, який відповідає 21 міс.

Висновки. Запропонована методика визначення міжповірочного інтервалу ЗВ дозволяє розраховувати терміни проведення чергових повірок, врахувавши при цьому міжнародні вимоги до оцінювання показників якості вимірювання – концепцію невизначеності. Вона сприяє забезпеченню єдності вимірювань та конкурентоспроможності вітчизняної продукції на світовому ринку. Апробація методики під час метрологічної атестації ЗВ крутильних моментів електродвигунів підтвердила її коректність та ефективність.

1. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – М.: Стандартиформ, 2005.

2. Матвеевский В.Р. Надежность технических средств управления. – М.: МГИЭМ, 1993. – 92 с.

3. Яковлев М.Ю. Забезпечення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем на етапі експлуатації // Зб. наук. праць Харківського ун-ту Повітряних Сил. – 2007. – Вип. 3 (15). – С. 136 – 141.

4. Васілевський О.М. Нормування показників метрологічної надійності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 9 – 13.

5. Яковлев М.Ю. Оцінка метрологічної нестабільності метрологічних характеристик при визначенні первинного міжповірочного інтервалу засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 2 (29). – С. 40 – 44.

6. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO. – 2009. – 32 p.

7. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC. – 2007. – 54 p.

8. Dorozhovets M., Warsza Z. Evaluation of the uncertainty type A of autocorrelated measurement observations // Measurement Automation and Monitoring. – 2007. – № 2. – Pp. 20–24. (in Polish).

9. Васілевський О.М. Оцінювання невизначеності динамічних вимірювань // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 9 – 13.

10. Васілевський О.М., Кучерук В.Ю. Основи теорії невизначеності вимірювань. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 224 с.

11. Васілевський О.М., Поджаренко В.О. Актуальні проблеми метрологічного забезпечення. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 214 с.

12. Васілевський О.М., Поджаренко А.В. Оцінювання невизначеності вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних коливань // Вісник Вінницького політехнічного ін-ту. – 2009. – № 4. – С. 5–9.

13. Васілевський О.М. Удосконалена математична модель засобу вимірювання пускового моменту електродвигунів // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 76 – 81.

14. Васілевський О.М. Засіб вимірювання динамічного моменту електромоторів та аналіз його точності // Вимірювальна техніка та метрологія. – № 73. – 2012. – С. 52 – 56.

15. Васілевський О.М. Дослідження якості результатів вимірювань зусилля на основі концепції невизначеності // Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 3–4. – С. 229 – 232.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВАНИИ КОНЦЕПЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А.Н. Василевский^{1,2}, канд.техн.наук

¹– Министерство образования и науки Украины,

пр. Победы, 10, Киев, 01135, Украина, e-mail: wasilevskiy@mail.ru

²– Винницкий национальный технический университет,

Хмельницкое шоссе, 95, Винница, 21021, Украина.

Предложена методика определения межповерочного интервала средств измерения, которая базируется на использовании концепции неопределенности измерений для обработки экспериментальных данных при метрологической аттестации. Приведены результаты апробации методики для определения межповерочного интервала средства измерения крутящего момента электродвигателей. Библи. 15, табл. 3.

Ключевые слова: метрологическая аттестация, межповерочный интервал, неопределенность измерения, крутящий момент, средства измерения, класс точности.

METHODS OF DETERMINING THE RECALIBRATION INTERVAL MEASUREMENT TOOLS BASED ON THE CONCEPT OF UNCERTAINTY

О.М. Vasilevskiy^{1,2}

¹– The Ministry of Education and Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 10, Kyiv, 01135, Ukraine, e-mail: wasilevskiy@mail.ru

²– Vinnytsia national technical university,

Khmelnytske shosse, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine.

A method for determining the recalibration interval measurement tools, which is based on the use of the concept of measurement uncertainty analysis of experimental data with the metrological certification. Results of testing procedures to determine the recalibration interval measuring torque motors. References 15, tables 3.

Keywords: metrological certification, calibration interval, the uncertainty of measurement, torque, measuring instruments, precision class.

1. RMG 74-2004 GSI. Methods for determination of recalibration and calibration intervals of measuring instruments. – Moskva: Standartinform, 2005. (Rus)

2. Matveevskiy V.R. Reliability of technical controls. – Moskva: MGIEM, 1993. – 92 p. (Rus)

3. Yakovlev M.Yu. Ensuring of metrological reliability of measuring instruments aviation radio systems during operation // Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl. – 2007. – Vypusk 3 (15). – Pp. 136 – 141. (Ukr)

4. Vasilevskiy O.M. Rationing of metrological reliability parameters // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2011. – № 4. – Pp. 9 – 13. (Ukr)

5. Yakovlev M.Yu. Assessment of metrological characteristics of instability in determining the initial inter-verification interval measuring instruments aircraft radio systems // Radioelektronni i kompiuterni systemy. – 2008. – № 2(29). – Pp. 40–44. (Ukr)

6. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO. – 2009. – 32 p.

7. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC. – 2007. – 54 p.

8. Dorozhovets M., Warsza Z. Evaluation of the uncertainty type A of autocorrelated measurement observations // Measurement Automation and Monitoring. – 2007. – № 2. – Pp. 20–24. (in Polish)

9. Vasilevskiy O.M. Evaluation of uncertainty of dynamic measurement // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2011. – № 3. – Pp. 9–13. (Ukr)

10. Vasilevskiy O.M., Kucheruk V.Yu. Basic theory of uncertainty. – Kherson: Oldi-plus, 2013. – 224 p. (Ukr)

11. Vasilevskiy O.M., Podzharenko V.O. Actual problems of metrological support. – Vinnytsia: VNTU, 2010. – 214 p. (Ukr)

12. Vasilevskiy O.M., Podzharenko A.V. Evaluation of the measurement uncertainty of moment of inertia of the rotor in the amplitude of torsional vibrations // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2009. – № 4. – Pp. 5–9. (Ukr)

13. Vasilevskiy O.M. Advanced mathematical model of measuring the starting torque motors // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – № 6. – Pp. 76–81. (Ukr)

14. Vasilevskiy O.M. Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy // Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. – № 73. – 2012. – Pp. 52–56. (Ukr)

15. Vasilevskiy O.M. Research efforts as a result of measurement based on the concept of uncertainty // Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2013. – № 3–4. – Pp. 229–232. (Ukr)

Надійшла 25.03.2014

Остаточний варіант 23.06.2014