

МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ НА ОСНОВІ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ З ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

Олександр Васілевський, 201

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано спосіб оцінювання точності вимірювань та міжперевірною інтервалу засобу вимірювання на основі міжнародних стандартів щодо представлення характеристик точності. Цей спосіб апробовано під час метрологічної атестації засобу вимірювання моменту інерції електромоторів.

Предложен способ оценивания точности измерений и межповерочного интервала средства измерения на основе международных стандартов относительно представления характеристик точности. Этот способ апробировано во время метрологической аттестации средства измерения момента инерции электромоторов.

We propose a method for estimating accuracy of measurements and recalibration interval means for measuring the based on international standard of representing characteristics of accuracy. This method is tested during metrological certification means for measuring the moment of inertia of electric motors.

Вступ. Відомо, що засоби вимірювання є технічними засобами, які характеризуються нормованими метрологічними характеристиками [1–6]. Надійність засобів вимірювання визначається їх здатністю витримувати метрологічні параметри в регламентованих межах. Вихід за ці межі класифікується як метрологічна відмова. Відповідність метрологічних характеристик їх нормованим значенням встановлюють у процесі повірки (метрологічної перевірки) чи метрологічної атестації засобів вимірювання. Запровадження концепції невизначеності вимірювань у міжнародні стандарти з оцінювання і вираження характеристик точності вимірювань [7] та оцінки якості електротехнічної продукції [8] вимагає розроблення методики оцінювання (встановлення) міжперевірною інтервалу засобів вимірювання, процедура визначення якого має будуватися на основі теорії невизначеності вимірювань [7, 9]. Розроблення методу оцінювання точності вимірювання і міжперевірною інтервалу засобів вимірювання на основі концепції невизначеності вимірювань необхідне для встановлення терміну чергової перевірки відповідності метрологічних характеристик їх нормованим значенням. Визначення терміну (періодичності) метрологічної перевірки засобів вимірювань, що використовуються на підприємствах, у медицині, з контролем умов навколишнього середовища та охорони праці, під час наукових досліджень є акту-

альною науковою проблемою, від якої залежить якість виробів та послуг.

З огляду на вищевикладене, метою статті є розроблення методики оцінювання точності вимірювань і міжперевірною інтервалу засобів вимірювань з урахуванням концепції невизначеності вимірювань та її апробація під час метрологічної атестації засобу вимірювання моменту інерції електромоторів.

Аналіз стану досліджень та публікацій. У наявних літературних джерелах достатньо обґрунтовано розглядаються окремо теоретичні підходи щодо оцінювання та вираження невизначеностей вимірювань [7–9] і теоретичні підходи щодо визначення міжперевірних інтервалів засобів вимірювань на основі допустимих меж нестабільності метрологічних характеристик, дрейфу метрологічних характеристики, що основані на теорії похибок вимірювань і надійності технічних засобів без урахування концепції невизначеності вимірювань [1, 3 – 5]. Однак поки що не існує підходу до визначення міжперевірною інтервалу засобів вимірювань на основі теорії невизначеності вимірювань. Тому виникає необхідність у розробленні математичного апарату для встановлення міжперевірною інтервалу засобів вимірювань на основі міжнародних стандартів щодо оцінювання характеристик точності вимірювань – теорії невизначеності вимірювань.

Також із літературних джерел [4, 6] відомо, що основними показниками, які використовуються для розрахунку характеристик метрологічної надійності, є: вірогідність безвідмовної роботи; інтенсивність метрологічних відмов; середній час до першої метрологічної відмови; параметр потоку відмов (метрологічних); напрацювання до першої метрологічної відмови.

Однак у матеріалах розробників засобів вимірювань, що подаються на випробування з метою затвердження типу чи метрологічної атестації засобу вимірювання, часто відсутня достовірна інформація про нестабільність метрологічних характеристик засобу вимірювання, що необхідна для обґрунтованого присвоєння первинного міжперевірочного інтервалу засобу вимірювання. У цих випадках для його оцінки можна скористатися нормованими значеннями показників надійності, що вказані в технічних умовах (технічній документації) на засіб вимірювання або використати інформацію про міжперевірочний інтервал аналогу з подальшою корекцією цього значення в процесі експлуатації чи випробувань на основі даних про інтенсивність експлуатації та умови вимірювання.

Викладення основного матеріалу. Рівняння перетворення засобу вимірювання моменту інерції електромоторів має вигляд

$$J = \frac{PT_0}{2 \ln \left(\frac{M_k l x h^3}{e r^4 C \Delta d} \right)} N_J, \quad (1)$$

де N_J – кількість імпульсів, що надходять на вхід таймера-лічильника мікроконтролера, що входить до складу засобу вимірювання моменту інерції за проміжок часу вільних коливань ротора електромотора; M_k – обертальний момент при ковзанні $S = 1$, що описується формулою Клосса [10, 11]; l – довжина вимірювального важеля; x – модуль пружності мембрани сенсора зусилля; h – товщина мембрани сенсора зусилля; $e = 0.17$; r – радіус мембрани сенсора зусилля; C – коефіцієнт жорсткості сенсора зусилля; Δd – нормоване значення абсолютної похибки вимірювального перетворювача; J – момент інерції, що вимірюється; P – коефіцієнт заспокоєння; T_0 – період зразкових імпульсів, якими заповнюється проміжок часу вимірювання моменту інерції після завершення перехідного процесу (в разі знеструмлення електромотора і зменшення обертального моменту від значення M_k до нуля) [10].

Суть методу вимірювання полягає у тому, що в момент під'єднання напруги живлення до електромотора створюється обертальний момент, який описується формулою Клосса [10, 11]. Цей момент через вимірювальний важіль з одного боку прикріплений до ротора електромотора, а з іншого – діє сенсор зусилля, який є пружним елементом. Далі електромотор знеструмлюють, внаслідок чого обертальний момент зменшується від величини M_k до нуля упродовж проміжку часу T_0 . Оскільки ротор електромотора здійснює вільні загасаючі коливання, тривалість яких зумовлена величиною моменту інерції ротора J і жорсткістю C сенсора зусилля, то, вимірявши величину обертального моменту M_k і проміжку часу від моменту знеструмлення до нуля та знаючи жорсткість сенсора зусилля C , можна знайти величину моменту інерції електромотора (1).

Отже, для метрологічної атестації засобу вимірювання моменту інерції електромоторів потрібно задати зразковий обертальний момент M_k і в режимі самогальмування електромотора виконувати вимірювання моменту інерції. Зразковий момент M_{exe} пропонується задати за допомогою набору зразкових мас тягарців. Рівняння, за яким можна описати процедуру задання зразкового моменту, має вигляд:

$$M_{exe} = g R m_{exe}, \quad (2)$$

де g – прискорення вільного падіння, що відповідає $9,8066 \text{ м/с}^2$; R – радіус диска ($R=9,9889 \text{ см}$), що закріплений на валу електромотора, який входить до структури вимірювального перетворювача моменту; m_{exe} – маса зразкових тягарців.

Для градування засобу вимірювання моменту інерції використано асинхронний електромотор типу AIR56A4 номінальним значенням моменту інерції $J_I = 0,007 \text{ Nm}^2$. Для задання обертального моменту з ковзанням $S=1$ на валу електромотора потрібно створити зразковий обертальний момент, що відповідає значенню $M_k=0,85 \text{ Нм}$. Для задання зазначеного зразкового моменту до диска радіусом R , що закріплений на валу електромотора, прикріплюється за допомогою струни довжиною l зразкове значення маси, що дорівнює $m_{exe} = 867,726 \text{ г}$.

Із результатів попередніх вимірювань радіуса диска відомо, що стандартна невизначеність вимірювання радіуса диска становить $u_{Ar} = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, а із паспортних даних на зразковий засіб вимірювання маси із максимальним навантаженням 1000 г відомо, що маса тягарця вимірюється з абсолютною похибкою

вимірювання $\Delta_m = 1$ мг [12]. Невизначеність вимірювання маси, в припущенні про рівномірний закон розподілу абсолютної похибки вимірювання, розраховується за формулою

$$u_{Bm} = \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}} = \frac{10^{-3} \text{ г}}{1,73} = 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ г.} \quad (3)$$

Отже, сумарну невизначеність задання обертального моменту знайдемо за формулою

$$u_c(M_{exe}) = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{exe}}{\partial R}\right)^2 u_{Ar}^2 + \left(\frac{\partial M_{exe}}{\partial m}\right)^2 u_{Bm}^2}, \quad (4)$$

де $\frac{\partial M_{exe}}{\partial R} = gm_{exe} = 8,509 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \text{ кг}$ – коефіцієнт чутливості

за радіусом диска; $\frac{\partial M_{exe}}{\partial m_{exe}} = gR = 0,9796 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ –

коефіцієнт чутливості за масою зразкового тягарця.

Підставляючи розраховані коефіцієнти чутливостей і невизначеності у формулу (4), отримаємо значення сумарної невизначеності задання зразкового обертального моменту, що становить $u_{c1}(M_{exe}) = 8,87 \cdot 10^{-6}$ Нм.

Після задання зразкового обертального моменту в спосіб, який описаний вище, виконується серія вимірювань моментів інерції за допомогою засобу вимірювання моменту інерції електромоторів. Результати вимірювань моментів інерції занесено до табл. 1.

На основі отриманих результатів вимірювань моментів інерції (табл. 1) розрахуємо стандартну невизначеність типу А за формулою

$$u_A(\bar{J}_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (J_{i,1} - \bar{J}_1)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (J_{i,1} - 7,046 \cdot 10^{-3})^2}{21(21-1)}} = 34,16 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2. \quad (5)$$

Для градування засобу вимірювання моменту інерції в іншому діапазоні вимірювання використано асинхронний електромотор типу AIR80A2 з номінальним значенням моменту інерції $J_2 = 0,015$ Нм². Відповідно, для задання обертального моменту з ковзанням S, близьким до 1, на валу електромотора потрібно створити зразковий обертальний момент, що відповідає значенню $M_k = 5$ Нм. Для цього до диска радіусом R, що закріплений на валу електромотора, прикріплюється за допомогою струни довжиною l зразкове значення маси, що відповідає $m_{exe} = 5104,273$ г.

Сумарна невизначеність задання зразкового значення обертального моменту, що виникає за рахунок невилучених залишків систематичних ефектів, пов'язаних із обмеженою точністю засобів вимірювань маси та радіуса диска, відповідно до формули (4), становить:

$$\frac{\partial M_{exe}}{\partial R} = gm_{exe} = 50,056 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \text{ кг};$$

$$\frac{\partial M_{exe}}{\partial m_{exe}} = gR = 0,9796 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}; \quad u_{c2}(M_{exe}) = 5,21 \cdot 10^{-5} \text{ Нм.}$$

Задавши зазначені зразкові значення моменту, провели серію вимірювань моментів інерції (табл. 2).

Підставляючи експериментальні дані, що наведені в табл. 2, розрахуємо стандартну невизначеність типу А вимірювання моменту інерції електромотора за формулою

$$u_A(\bar{J}_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (J_{i,2} - \bar{J}_2)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (J_{i,2} - 15,118 \cdot 10^{-3})^2}{21(21-1)}} = 28,36 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2. \quad (6)$$

Таблиця 1

Результати вимірювань моментів інерції

№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{ Нм}^2$	№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{ Нм}^2$	№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{ Нм}^2$
1	7,132	8	7,128	15	7,175
2	7,197	9	6,855	16	6,878
3	6,805	10	7,153	17	7,191
4	7,157	11	7,192	18	6,823
5	6,952	12	6,863	19	7,147
6	7,134	13	7,176	20	6,792
7	7,171	14	6,883	21	7,165

Таблиця 2

Результати вимірювань моментів інерції

№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{Нм}^2$	№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{Нм}^2$	№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{Нм}^2$
1	15,121	8	15,315	15	15,205
2	15,017	9	15,122	16	15,012
3	14,89	10	15,112	17	15,323
4	15,116	11	15,015	18	15,303
5	15,102	12	15,313	19	14,97
6	15,087	13	15,018	20	15,114
7	15,211	14	14,91	21	15,196

Таблиця 3

Результати вимірювань моментів інерції

№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{Нм}^2$	№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{Нм}^2$	№	Значення моменту інерції $J \times 10^{-3}, \text{Нм}^2$
1	4,178	8	4,365	15	4,011
2	4,388	9	4,085	16	4,391
3	4,289	10	4,015	17	4,039
4	4,394	11	4,011	18	4,383
5	4,286	12	4,355	19	4,397
6	4,378	13	4,054	20	4,289
7	4,386	14	4,016	21	4,036

Для градування засобу вимірювання у діапазоні вимірювання моменту інерції $J_3 = 0,0042 \text{ Нм}^2$ використано асинхронний електромотор типу AIR56A2. Для цього типу електромотора, щоб забезпечити ковзання S , близьке до 1, потрібно встановити значення зразкового обертального моменту, що дорівнює $M_k = 0,64 \text{ Нм}$. Щоб створити зазначені вище умови, потрібно до диска радіусом R , що закріплений на валу електромотора, прикріпити зразкове значення маси, що відповідає $m_{\text{exe}} = 653,346 \text{ г}$.

Сумарна невизначеність встановлення зразкового моменту, що виникає за рахунок невилучених залишків систематичних ефектів, пов'язаних із обмеженою точністю вимірювання маси і радіуса диска, що описується формулою (4), становить:

$$\frac{\partial M_{\text{exe}}}{\partial R} = gm_{\text{exe}} = 6,407 \frac{\text{v}}{\text{c}^2} \text{кг}; \quad \frac{\partial M_{\text{exe}}}{\partial m_{\text{exe}}} = gR = 0,9796 \frac{\text{м}^2}{\text{c}^2};$$

$$u_{c3}(M_{\text{exe}}) = 6,69 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}.$$

Результати вимірювання моменту інерції подано в табл. 3.

Підставляючи експериментальні дані з табл. 3, отримаємо стандартну невизначеність типу А вимірювання моменту інерції електромотора, що дорівнює

$$u_A(\bar{J}_3) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (J_{i,3} - \bar{J}_3)^2}{n(n-1)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (J_{i,3} - 4,226 \cdot 10^{-3})^2}{21(21-1)}} = 35,72 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2. \quad (7)$$

Для оцінювання міжперевірного інтервалу засобу вимірювання вибираємо найбільшу за значенням (максимальну) стандартну невизначеність типу А. Із проведених експериментальних досліджень очевидно, що максимального значення набуває стандартна невизначеність типу А, яка проявляється під час вимірювання найменшого за значенням моменту інерції $\bar{J}_3 = 0,0042 \text{ Нм}^2$. Тому для оцінювання міжперевірного інтервалу засобу вимірювання в подальших розрахунках використовуватимемо максимальну невизначеність вимірювання моменту інерції типу А, що дорівнює $u_{A\text{max}}(\bar{J}_3) = 35,72 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2$.

Для розрахунку сумарної та розширеної невизначеностей вимірювання виконаємо оцінювання складових невизначеностей типу В, які проявляються за ра-

хунок невилучених залишків систематичних ефектів та обмежених властивостей складових елементів засобу вимірювання моменту інерції.

Оскільки до складових елементів засобу вимірювання моменту інерції входить сенсор зусилля, то оцінимо невизначеність типу В, що виникає через існування зведеної похибки $g=0,15\%$ за дії максимального зусилля $Q=20$ кг, у припущенні про рівномірний закон розподілу похибки, за формулою

$$u_{B,s} = \frac{gQ}{\sqrt{12100\%}} = 0,15\% \frac{20}{3,46 \cdot 100\%} = 8,67 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (8)$$

Невизначеність типу В, зумовлена наявністю невилученого систематичного ефекту, пов'язаного із наявністю похибки визначення довжини вимірювального важеля, яка не перевищує $\Delta l = \pm 0,01 \cdot 10^{-3}$ м, становить

$$u_{B,l} = \frac{\Delta l}{\sqrt{12}} = \frac{\pm 0,01}{\sqrt{3}} = 5,77 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \quad (9)$$

Складову невизначеності, зумовлену зміною частоти кварцового резонатора під час формування періоду зразкових імпульсів (частота кварцового резонатора $f_0 = 20$ МГц, $T_0 = 1/f_0 = 0,05 \cdot 10^{-6}$ с), якими заповнюється проміжок часу вимірювання моменту інерції, з урахуванням відхилення температури повітря навколишнього середовища $t_v=25$ °С від температури нормальних умов $t_n=20$ °С, оцінимо через температурний коефіцієнт зміни частоти кварцового резонатора ($k_t = \pm 1,5 \cdot 10^{-6}/\text{°C}$), що заданий у технічній документації на нього, за формулою

$$u_{B,t} = T_0 \frac{|t_v - t_n|}{\sqrt{3}} k_t = 0,05 \cdot 10^{-6} \frac{(25-20)}{1,73} 1,5 \cdot 10^{-6} = 0,22 \cdot 10^{-12} \text{ с.} \quad (10)$$

Невизначеність, зумовлена наявністю часу відгуку аналогового компаратора мікроконтролера на появу вхідного сигналу, який відповідно до специфікації на мікроконтролер не перевищує $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-6}$ с, розрахуємо за формулою

$$u_{B,\Delta t} = \frac{\Delta t}{\sqrt{12}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{3,46} = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ с.} \quad (11)$$

Сумарну стандартну невизначеність типу В із урахуванням рівняння перетворення (1) та розрахованих вище складових невизначеностей типу В

(7)–(11) знайдемо як позитивний квадратний корінь із сумарної дисперсії типу В, яка описується формулою

$$u_{Bc}^2 = \left(\frac{\partial J}{\partial M_k} \right)^2 [u_{c2}(M_{exe})]^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial \Delta d} \right)^2 u_{B,s}^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial l} \right)^2 u_{B,l}^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial T_0} \right)^2 [u_{B,t}^2 + u_{B,\Delta t}^2], \quad (12)$$

$$\text{де } \frac{\partial J}{\partial M_k} = -\frac{0,5M_k^{-1}PT_0N_J}{\ln\left[\left(\frac{M_k l x h^3}{er^4 C \Delta d}\right)^2\right]} = -39,47 \cdot 10^{-6} \text{ м;}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta d} = \frac{0,5\Delta d^{-1}PT_0N_J}{\ln\left[\left(\frac{M_k l x h^3}{er^4 C \Delta d}\right)^2\right]} = 13,22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}};$$

$$\frac{\partial J}{\partial l} = -\frac{0,5l^{-1}PT_0N_J}{\ln\left[\left(\frac{M_k l x h^3}{er^4 C \Delta d}\right)^2\right]} = -2,64 \cdot 10^{-3} \text{ Нм;}$$

$$\frac{\partial J}{\partial T_0} = \frac{PN_J}{2 \ln\left[\left(\frac{M_k l x h^3}{er^4 C \Delta d}\right)^2\right]} = 7,93 \cdot 10^3 \frac{\text{Нм}^2}{\text{с}}$$

коефіцієнти чутливості за обертальним моментом, за похибкою сенсора зусилля, за довжиною вимірювального важеля та за періодом зразкових імпульсів, відповідно.

Підставляючи розраховані значення коефіцієнтів чутливості та стандартних невизначеностей типу В у рівняння (12), отримаємо значення сумарної стандартної невизначеності типу В, що становить $u_{Bc} = 11,16 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2$.

Сумарну невизначеність результату вимірювання моменту інерції із урахуванням максимальної експериментальної невизначеності типу А (7) та сумарної невизначеності типу В (12) розрахуємо за формулою

$$u_c = \sqrt{u_A^2(\bar{J}_3) + u_{Bc}^2} = 11,17 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2. \quad (13)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності, що приймемо як нормоване значення невизначеності засобу вимірювання моменту інерції і вказуватимемо в технічній документації на нього, розрахуємо ефективну кількість ступенів свободи, що визначається за формулою

$$n_{eff} = u_c^4 \left(\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{n_i} \right)^{-1} = (n-1) \frac{u_c^4}{u_A^4(\bar{J}_3)} =$$

$$= 20 \frac{(11,17 \cdot 10^{-4})^4}{(35,72 \cdot 10^{-6})^4} = 19 \cdot 10^6. \quad (14)$$

Далі з використанням таблиці Стьюдента визначимо коефіцієнт охоплення k_p на основі значень ефективної кількості ступенів вільності (14) та довірчої ймовірності, яка прийнята $P = 0,95$ на основі інформації про вірогідність аналогів. За таких значень коефіцієнт охоплення дорівнює $k_p = 1,96$.

Знаючи коефіцієнт охоплення та сумарну невизначеність результату вимірювання моменту інерції, отримаємо розширену невизначеність вимірювання, що нормуватиметься в технічній документації на засіб вимірювання моменту інерції електромоторів, що дорівнює

$$U_N = k_p u_c = 1,96 \cdot 11,17 \cdot 10^{-4} = 2,19 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^2. \quad (15)$$

На основі отриманих характеристик точності вимірювання моменту інерції електромоторів складемо бюджет невизначеностей, наведений в табл. 4. Ці складові невизначеностей вимірювань відповідають нормованим значенням метрологічних характеристик засобу вимірювання моменту інерції електромоторів, що прописуються у нормативних документах (технічній документації) на ЗВ.

Далі, припустивши, що інтенсивність експлуатації ЗВ становить сім годин на добу і встановивши експериментально напрацювання до першої відмови, яке для засобу вимірювання моменту інерції електромоторів досягло 3500 годин, визначимо кален-

дарну тривалість експлуатації t , що відповідає двом календарним рокам.

Після тривалої експлуатації, за реальних умов використання ЗВ, виконуємо перерахунок складових невизначеностей вимірювань типу В.

Невизначеності вимірювань типу В зумовлені:

– наявністю зведеної похибки сенсора зусилля (розраховується за формулою (8) і залишається незмінною $u_{B,s} = 8,67 \cdot 10^{-3}$ кг);

– наявністю невилученого систематичного ефекту, пов'язаного із обмеженими можливостями визначення довжини вимірювального важеля (розраховується за формулою (9) і залишається незмінною $u_{B,l} = 5,77 \cdot 10^{-6}$ м);

– наявністю часу відгуку аналогового компаратора мікроконтролера на появу вхідного сигналу (розраховується за формулою (11) і залишається незмінною $u_{B,\Delta t} = 0,14 \cdot 10^{-6}$ с);

– відхиленням температури повітря навколишнього середовища під час випробувань $t_{v2} = 18$ °С від температури за нормальних умов $t_n = 20$ °С оцінимо через температурний коефіцієнт зміни частоти кварцового резонатора ($k_t = \pm 1,5 \cdot 10^{-6}/\text{°C}$) за формулою

$$u_{B,t2} = T_0 \frac{|t_{v2} - t_n|}{\sqrt{3}} k_t = 0,05 \cdot 10^{-6} \frac{|18 - 20|}{1,73} 1,5 \cdot 10^{-6} = 8,67 \cdot 10^{-14} \text{ с}. \quad (16)$$

Таблиця 4

Бюджет невизначеностей вимірювань моменту інерції

Вхідні величини	Оцінка вхідних величин	Стандартні невизначеності	Коефіцієнти чутливості	Внески невизначеностей
J_i	$4,2 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^2$	$35,72 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2$	1	$u_{A_{\max}}(\bar{J}_3)$
γ	0,15 %	$8,67 \cdot 10^{-3}$ кг	$13,22 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^2/\text{кг}$	$\frac{\partial J}{\partial \Delta \delta} u_{B,s}$
Δl	$0,01 \cdot 10^{-3}$ м	$5,77 \cdot 10^{-6}$ м	$-2,64 \cdot 10^{-3}$ Нм	$\frac{\partial J}{\partial l} u_{B,l}$
T_0	$0,05 \cdot 10^{-6}$ с	$0,22 \cdot 10^{-12}$ с	$7,93 \cdot 10^3 \text{ Нм}^2/\text{с}$	$\frac{\partial J}{\partial T_0} u_{B,t}$
Δt	$0,5 \cdot 10^{-6}$ с	$0,14 \cdot 10^{-6}$ с	$7,93 \cdot 10^3 \text{ Нм}^2/\text{с}$	$\frac{\partial J}{\partial T_0} u_{B,\Delta t}$
M_k	5 Нм	$5,21 \cdot 10^{-5}$ Нм	$-39,47 \cdot 10^{-6}$ м	$\frac{\partial J}{\partial M_k} u_{c2}(M_{\text{exe}})$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
\bar{J}	$0,0042 \text{ Нм}^2$	$11,17 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2$	1,96	$2,19 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^2$

Значення комбінованої невизначеності вимірювання типу В u_{Bce} знайдемо за формулою (12) з урахуванням перерахованих невизначеностей вимірювань типу В після випробувань засобу вимірювання моменту інерції в реальних умовах експлуатації. В результаті отримаємо значення комбінованої стандартної невизначеності типу В, що становить $u_{Bce} = 11,16 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2$.

Оскільки значення комбінованої невизначеності вимірювання типу В не змінилося, то і значення комбінованої невизначеності результату вимірювання в реальних умовах експлуатації залишається $u_{ce} = 11,17 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2$.

Ефективна кількість ступенів свободи визначається за формулою (14) і також дорівнює попередньому значенню $n_{eff} = 19 \cdot 10^6$.

Коефіцієнт охоплення k_{2P-1} , що відповідає довірчій ймовірності $2P-1$, тобто значенню ймовірності, що відповідає вірогідності метрологічної справності засобу вимірювання в реальних умовах експлуатації (технічна надійність засобу вимірювання становить $P = 0,95$, а вірогідність метрологічної справності при цьому дорівнює $2P-1=2 \cdot 0,95-1=0,9$), визначимо із таблиці Стьюдента за ефективною кількістю ступенів свободи, якщо $v_{eff} > 30$, та вірогідності метрологічної справності $P_e = 0,9$. За цих умов коефіцієнт охоплення становить $k_{2P-1} = 1,64$.

Якщо коефіцієнт охоплення $k_{2P-1} = 1,64$, значення розширеної невизначеності вимірювань U_E в реальних умовах експлуатації засобу вимірювання розраховується за формулою

$$U_E = k_{2P-1} u_{ce} = 1,64 \cdot 11,17 \cdot 10^{-4} = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^2. \quad (17)$$

На основі встановлених значень нормованої розширеної невизначеності (теоретично можливої), розширеної невизначеності в реальних умовах експлуатації U_E (за припущення про вірогідність метрологічної справності $2P-1$ засобу вимірювання), терміну напрацювання до першої відмови $t=2$ роки та максимальної невизначеності вимірювання типу А $u_A(\bar{J}_3)$, першу оцінку міжперевірної інтервалу T_1 засобу вимірювання моменту інерції електромоторів розраховуємо за формулою

$$T_1 = t \frac{\ln\left(\frac{U_E}{k_{2P-1} u_{Amax}(\bar{J}_3)}\right)}{\ln\left(\frac{U_H}{k_P u_{Amax}(\bar{J}_3)}\right)} = 2 \frac{\ln\left(\frac{1,83 \cdot 10^{-3}}{1,64 \cdot 35,72 \cdot 10^{-6}}\right)}{\ln\left(\frac{2,19 \cdot 10^{-3}}{1,96 \cdot 35,72 \cdot 10^{-6}}\right)} \approx 1,99 \text{ р.} \quad (18)$$

Другу оцінку міжперевірної інтервалу засобу вимірювання моменту інерції електромоторів T_2 , розраховуємо за формулою

$$T_2 = t \frac{U_E - k_{2P-1} u_{Amax}(\bar{J}_3)}{U_H - k_P u_{Amax}(\bar{J}_3)} = 2 \frac{1,83 \cdot 10^{-3} - 1,64 \cdot 35,72 \cdot 10^{-6}}{2,19 \cdot 10^{-3} - 1,96 \cdot 35,72 \cdot 10^{-6}} = 1,67 \text{ р.} \quad (19)$$

Приймаємо, що міжперевірний інтервал засобу вимірювання моменту інерції електромоторів дорівнює мінімальному значенню між оцінками T_1 і T_2 , тобто він відповідає

$$T = \min[T_1, T_2] = \min[1,99, 1,67] = 1,67 \text{ р.} = 20 \text{ місяцям.} \quad (20)$$

Значення міжперевірної інтервалу доцільно вибирати у місяцях з ряду натуральних чисел: 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, в результаті метрологічної атестації засобу вимірювання моменту інерції електромоторів оцінено точність вимірювання моменту інерції на основі концепції невизначеності вимірювань, характеристиками якої є нормоване значення розширеної невизначеності, що становить $2,19 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^2$ за вірогідності $P=0,95$ та міжперевірний інтервал засобу вимірювання, що дорівнює 20 місяцям.

Висновки. На прикладі метрологічної атестації засобу вимірювання моменту інерції електромоторів апробовано методику оцінювання характеристик точності вимірювань і міжперевірної інтервалу засобів вимірювань з урахуванням міжнародних стандартів з оцінювання точності та подання якості електротехнічної продукції. Це дає змогу забезпечити міжнародну єдність вимірювань в оцінюванні характеристик точності вимірювань і міжперевірних інтервалів

засобів вимірювань, а також зіставляти результати вимірювань, отримані різними лабораторіями в різних країнах світу.

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 // 36. 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 нестійкості метрологічних характеристик при визначенні первинного міжперевірочного інтервалу засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 2(29). – С. 40–44.
6. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних

засобів : [навчальний посібник] / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 160 с.
7. 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.
8. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC, 2007. – 54 p.
9. Васілевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань: [навч. посіб.] / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук. – 2-ге вид. – Херсон: Олдіплюс, 2013. – 224 с.
10. Васілевський О. М. Засіб вимірювання динамічного моменту електромоторів та аналіз його точності // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – С. 52–56.
11. Васілевський О. М. Удосконалена математична модель засобу вимірювання пускового моменту електродвигунів // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 76–81.
12. Васілевський О. М. Оцінювання невизначеності вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних коливань / О. М. Васілевський, А. В. Поджаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 4. – С. 5–9.