

**МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ
РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС ПЕРЕВІРКИ
ТАХОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

It is developed the exemplary measuring channel of angular speed and it is lead its metrological certification on the basis of the theory of uncertainty of measurements, and also it is offered a technique of an estimation of uncertainty of measurements by means of the developed measuring channels at the automated checking tachometric converters both at static, and at dynamic measurements of frequencies of rotation.

Розроблено взірцевий вимірювальний канал кутової швидкості та здійснено його метрологічну атестацію на основі теорії невизначеності вимірювань, а також запропоновано методику оцінювання невизначеності вимірювань за допомогою розроблених вимірювальних каналів під час автоматизованої перевірки тахометричних перетворювачів у випадку статичних і динамічних вимірювань частот обертання.

Постановка задачі. Під час складання звіту щодо результатів перевірки тахометричних перетворювачів (ТП) необхідно подати кількісне значення якості результату перевірки так, щоб можна було правильно оцінити його надійність. Без такого значення результати вимірювань при виконанні метрологічних робіт не можна порівняти ні між собою, ні з довідниковими даними. Тому необхідно, щоб була легко здійснима, зрозуміла і загальноприйнята методика для характеристики якості результату вимірювання, тобто для оцінювання його невизначеності.

Так само, як практично універсальне використання Міжнародної системи одиниць (SI) внесло узгодженість у всі наукові та технологічні вимірювання, так і всесвітня узгодженість в оцінюванні невизначеності вимірювань повинна забезпечити належне розуміння і правильне використання широкого спектра результатів вимірювань у науці, техніці, торгівлі та промисловості. В еру світового ринку необхідно, щоб метод оцінювання невизначеності під час виконання метрологічних робіт був однаковим в цілому світі для того, щоб вимірювання, проведені в різних країнах, можна було легко порівняти. Тому розробка єдиної методики оцінювання невизначеності результатів вимірювань під час перевірки ТП є важливим завданням на шляху до взаємного визнання результатів випробувань.

Аналіз стану досліджень та публікації. Впровадження ДСТУ ISO/IEC 17025–2001 у випробувальних і калібрувальних лабораторіях України зумовило необхідність виконання вимог пункту 5.4.6 цього стандарту “Оцінювання невизначеності вимірювання” [1]. Основою цих стандартів є Порадник з оцінки експериментальних невизначеностей, який визначив класифікацію невизначеностей за типом А і В залежно від способу оцінення результатів вимірювань, критеріїв цих невизначеностей у вигляді стандартних відхилень і коваріацій та способів їх сумування [2]. У вищенаведених документах невизначеності нормують як сумарну стандартну невизначеність, а інтегральну оцінку (розширена невизначеність) розглядають як додаткову і подають один із варіантів наближеного розрахунку коефіцієнта охоплення як коефіцієнта Стюдента з числом степенів вільності, що визначається за формулою Велча-Саттерсвейта. Однак такий спосіб оцінювання невизначеності вимірювань не бере до уваги вплив домінуючих складових невизначеностей типу В, закон розподілу яких відрізняється від нормального.

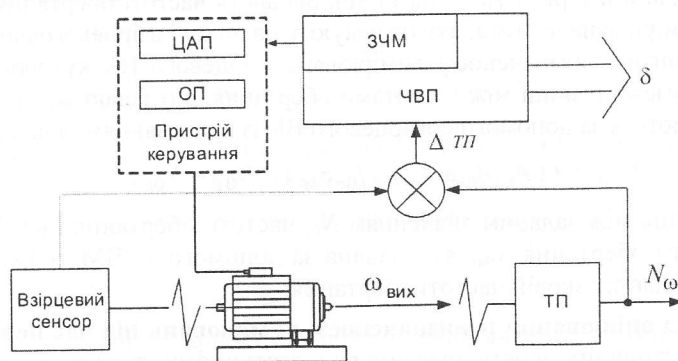
Формування мети статті. Метою статті є розробка вимірювальних каналів кутової швидкості для автоматизованої перевірки ТП та побудова на їх основі

© О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, В. М. Севастьянов, О. А. Войтов, 2007

методики оцінювання невизначеностей вимірювань як у випадку статичних, так і у випадку динамічних режимів з урахуванням кількості одержаних експериментальних даних, ефективного числа степенів вільності та значення коефіцієнта охоплення для подання повного результату перевірки ТП з обов'язковим зазначенням розширеної стандартної та відносної невизначеності.

Система автоматизованої перевірки тахометричних перетворювачів.

Для здійснення високоточної автоматизованої перевірки ТП з широким діапазоном зміни частот обертання розроблено експериментальну модель мікропроцесорної слідкуючої системи, яка підтримує стабільною задану частоту обертання двигуна у випадку зміни навантаження на валу, що є необхідною умовою для автоматизованої перевірки (АП). Структурну схему слідкуючої системи АП тахометрів зображено на рисунку.



Структурна схема системи АП ТП

Система складається з числового вимірювального перетворювача (ЧВП) 1, до якого належить змінна (взірцева) частотна міра (ЗЧМ) 2, цифровий вихід якої підключено до цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) 3. Сигнал з ЦАП подається на операційний підсилювач (ОП) 3, вихідний сигнал з якого подається на двигун 4. Швидкість обертання ротора двигуна вимірюється взірцевим частотоміром 5, вихід якого під'єднано до пристрою порівняння 7, на який також подається вихідний сигнал перевірювального ТП 6. Вихід пристрою порівняння 7 підключено до ЧВП 1.

Оскільки запропонована система АП ТП як у статичному, так і в динамічному режимах належить до нестандартизованих засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), то замість державних випробувань вона підлягає метрологічній атестації. Зважаючи на це, для подальшого використання передусім необхідно дослідити невизначеність кожного з елементів системи АП ТП, яка складається з двох вимірювальних каналів (ВК) кутової швидкості (див. рисунок).

Взірцевий вимірювальний канал кутової швидкості побудовано на базі частотоміра миттєвих значень під час вимірювання частот обертання в діапазоні від 0 до 26 об/хв та частотоміра середніх значень під час вимірювання частот обертання від 26 до 10500 об/хв, тому що первинний перетворювач має високочастотний вихідний сигнал 400 кГц.

Для оцінювання невизначеності вимірювань взірцевого ВК кутової швидкості за його допомогою було проведено багаторазові вимірювання (понад 1000) частот обертання як у статичному, так і в динамічному режимах роботи, які порівнювали із частотами, що задавались ЗЧМ.

Рівняння вимірювання частот обертання в режимі періодоміра має такий вигляд [3]:

$$N_{0n} = \frac{60 f_0}{A_n z_M} = \frac{60}{T_x z_M}, \quad (1)$$

де N_{0n} – частота обертання, що вимірюється за допомогою вірцевого давача в режимі періодоміра; f_0 – опорне значення частоти квантуючих імпульсів, що використовується періодоміром (160 МГц); $A_n = T_x f_0$ – кількість імпульсів, що потрапляють у період T_x і відповідають частоті обертання зразкового давача; z_M – кількість міток вірцевого давача ($z_M = 100$).

А рівняння вимірювання частот обертання в режимі частотоміра середніх значень таке:

$$N_{0c} = \frac{60 f_0}{A_c z_M} = \frac{60 f_0^2}{f_x z_M}, \quad (2)$$

де N_{0c} – частота обертання, що вимірюється за допомогою вірцевого давача в режимі частотоміра середніх значень; $A_c = f_x/f_0$ – кількість імпульсів, що виміряні за заданий зразковий інтервал $T_0 = 1/f_0$ та відповідають частоті обертання вірцевого давача; f_x – вимірювана частота, яку отримують на виході вірцевого давача ЛПР.

Щоб оцінити невизначеності вимірювань вірцевого ВК кутової швидкості, розраховуватимемо різниці між частотами обертання, що задаються за допомогою ЗЧМ і вимірюються за допомогою вірцевого ВК із врахуванням рівнянь (1) або (2)

$$\Delta N_0 = f(A_z, A_n \text{ або } A_c, f_0, z_M) = N_{0z} - N_{0e}, \quad (3)$$

де ΔN_0 – різниця між заданим значенням N_{0z} , частоти обертання і вимірним значенням частоти обертання N_{0e} ; A_z – задана за допомогою ЗЧМ кількість імпульсів, що відповідає зразковій частоті обертання.

Методика оцінювання невизначеності вимірювань під час перевірки ТП.

Під час тахометричних перетворювачів як у статичному, так і в динамічному режимах роботи необхідно дотримуватися єдиної методики оцінювання невизначеності, що складається з основних етапів виконання обчислень, які описано нижче.

На підставі одержаних експериментальним шляхом значень частот обертання обчислимо стандартні невизначеності типу А для кожної групи спостережень за формулою

$$u_A(\Delta \bar{N}_{0j}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\Delta \bar{N}_{0i} - \Delta \bar{N}_{0j})^2}{n_j(n_j - 1)}}, \quad (4)$$

де $\Delta \bar{N}_{0j} = \bar{N}_{0zj} - \bar{N}_{0ej}$ – різниця між середніми значеннями заданих частот обертання і середніми значеннями вимірних частот обертання за допомогою розробленого ВК для кожної із груп спостережень.

Підставляючи експериментальні дані різниць ΔN_{0j} під час статичних вимірювань у формулу (4), одержимо такі значення стандартних невизначеностей типу А для кожної із груп спостережень:

- на частоті обертання 10 об/хв $u_{Ac10} \approx 4,78 \cdot 10^{-3}$ об/хв;
- на частоті обертання 26 об/хв $u_{Ac26} \approx 11,05 \cdot 10^{-3}$ об/хв;
- на частоті 280 об/хв $u_{Ac280} \approx 47,55 \cdot 10^{-3}$ об/хв;
- на частоті обертання 1400 об/хв $u_{Ac1400} \approx 175,96 \cdot 10^{-3}$ об/хв;
- на частоті 4200 об/хв $u_{Ac4200} \approx 474,79 \cdot 10^{-3}$ об/хв;
- на частоті обертання 10500 об/хв $u_{Ac10500} \approx 1,19$ об/хв.

У результаті підстановки отриманих відхилень від заданих частот обертання у рівняння (4) одержимо такі значення стандартних невизначеностей типу А під час динамічних вимірювань u_{Ad} для кожної групи спостережень та у випадку різних інтервалів виходу на задані частоти обертання під час зміни частот обертання:

- від 0 до 10 об/хв і різних інтервалах виходу на задану частоту обертання (за 0,2 с, за 1 с та за 3 с) $u_{A\partial 10} \approx 13,28 \cdot 10^{-3}$ об/хв;
- від 0 до 26 об/хв і різних інтервалах виходу на статичний режим роботи (за 0,26 с, за 1,3 с та за 3,9 с) $u_{A\partial 26} \approx 0,11$ об/хв;
- від 0 до 280 об/хв і різних інтервалах виходу на статичний режим роботи (за 2,1 с, за 5,6 с та за 11,2 с) $u_{A\partial 280} \approx 0,36$ об/хв;
- від 0 до 4200 об/хв і різних інтервалах виходу на статичний режим роботи (за 2,1 с, за 5,6 с та за 11,2 с) $u_{A\partial 4200} \approx 4,23$ об/хв;
- від 0 до 10500 об/хв і різних інтервалах виходу на статичний режим роботи (за 2,1 с, за 5,6 с та за 11,2 с) $u_{A\partial 10500} \approx 11,13$ об/хв.

Сумарну невизначеність результатів спостережень, якщо діапазон вимірювань від 0 до 10500 об/хв, як у статичному, так і в динамічному режимах роботи обчислимо за формулою [4]

$$u_{A\Sigma} = \sqrt{u_{A10}^2 + u_{A26}^2 + u_{A280}^2 + u_{A400}^2 + u_{A4200}^2 + u_{A10500}^2} \quad (5)$$

Підставивши розраховані на різних частотах обертання стандартні невизначеності типу A у формулу (5), отримаємо такі сумарні невизначеності для всього діапазону вимірювань: для статичних вимірювань $u_{Ac\Sigma} = 1,29$ об/хв, а для динамічних вимірювань $u_{A\partial\Sigma} = 12,02$ об/хв.

Оцінимо складові сумарної стандартної невизначеності за типом B невиключених залишків систематичної похибки результатів вимірювань.

Відносну похибку квантування δN_0 під час вимірювання частот обертання N_0 обчислюємо за формулою

$$\delta N_0 = \frac{N_0 z_M}{60 f_0} \quad (6)$$

Тоді невизначеність квантування можна розрахувати з меж похибки квантування в припущенні про рівномірний закон розподілу

$$\Delta_{кв} = \pm \delta N_0 \cdot N_{0\max} = \pm \frac{z_M \cdot N_{0\max}^2}{60 f_0} = \pm \frac{100 \cdot 10500^2}{60 \cdot 160 \cdot 10^6} \approx \pm 1,15 \text{ об/хв}$$

за формулою

$$u_{Bкв} = \frac{|\Delta_{кв}|}{\sqrt{3}} = \frac{1,15}{\sqrt{3}} \approx 0,66 \text{ об/хв.} \quad (7)$$

Оскільки відносна похибка опорної частоти δf_0 кварцевого резонатора не перевищує $\pm 2 \cdot 10^{-7}$, а його температурний коефіцієнт не перевищує $\pm 10^{-9}$ на 1°C , то максимальну абсолютну похибку, що вноситься генератором опорної частоти у результат вимірювань, розраховують через відносну похибку δf_0

$$\Delta f_0 = N_{0\max} \delta f_0 = 10500 \cdot (\pm 2 \cdot 10^{-7}) = \pm 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ об/хв.} \quad (8)$$

Тоді стандартна невизначеність опорної частоти u_{Bf_0} кварцевого резонатора в припущенні про рівномірний закон розподілу похибки всередині меж дорівнюватиме

$$u_{Bf_0} = \frac{|\Delta f_0|}{\sqrt{3}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{1,73} \approx 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ об/хв.} \quad (9)$$

Оскільки вимірювання проводили в лабораторних умовах при температурі навколишнього середовища $+24^\circ\text{C}$, то невизначеність, що зумовлена зміною час-

тоти кварцевого резонатора внаслідок зміни температури навколишнього середовища від 20°C (температура калібрування кварцевого резонатора t_k) до 24°C (температура середовища під час вимірювань t_v), розрахована через температурний коефіцієнт частоти $\pm 10^{-9}$, дорівнюватиме

$$u_{B_t} = \frac{N_{0\max} |t_v - t_k| k_t}{\sqrt{3}} = \frac{10500(24 - 20) \cdot 10^{-9}}{\sqrt{3}} \approx 0,24 \cdot 10^{-4} \text{ об/хв.} \quad (10)$$

Складову сумарної невизначеності, що вноситься 16-розрядним ЦАП під час задання частот обертання від ЗЧМ, оцінимо через крок квантування

$$q = \frac{N_{0\max}}{(2^m - 1)} \quad (11)$$

за формулою

$$u_{B_q} = \frac{q}{\sqrt{12}} = \frac{10500}{(2^{16} - 1)\sqrt{12}} \approx 46,25 \cdot 10^{-3} \text{ об/хв,} \quad (12)$$

де m – розрядність ЦАП.

Невизначеність прецизійного давача кутової швидкості (ЛІР-337А) визначимо через його клас точності, який становить $\gamma = 0,01\%$, у припущенні про трикутний закон розподілу похибки за формулою

$$u_{B_s} = \frac{|\Delta_{\max}|}{\sqrt{6}} = \frac{\gamma \cdot N_{0\max}}{100\sqrt{6}} \approx 0,43 \text{ об/хв.} \quad (13)$$

Враховуючи розраховані вище значення стандартних невизначеностей невиключених залишків, обчислимо сумарну стандартну невизначеність типу B за формулою

$$u_{B_\Sigma}^2 = u_{B_s}^2 + u_{B_q}^2 + u_{B_t}^2 + u_{B_{\text{кс}}}^2 + u_{B_{f_0}}^2 \approx 62,41 \cdot 10^{-2} (\text{об/хв})^2. \quad (14)$$

Сумарну невизначеність результату метрологічної атестації взірцевого ВК кутової швидкості як для статичних, так і для динамічних вимірювань обчислимо за формулою

$$u_\Sigma = \sqrt{u_{A_\Sigma}^2 + u_{B_\Sigma}^2}. \quad (15)$$

Так, підставляючи розраховані значення сумарної стандартної невизначеності типу A та сумарної стандартної невизначеності типу B у формулу (15), отримаємо сумарні невизначеності результату вимірювань у діапазоні від 0 до 10500 об/хв, які для статичного режиму роботи $u_{c\Sigma} = 1,51$ об/хв, а для динамічного – $u_{d\Sigma} = 12,05$ об/хв.

Якщо рівень довіри $p = 0,95$, з врахуванням припущення про нормальність закону розподілу (тому що кількість складових загальної сумарної невизначеності більше від п'яти), то знайдемо розширені невизначеності окремо для статичного та динамічного режимів роботи за такими формулами:

$$U_c = k_p \cdot u_{c\Sigma} = 1,96 \cdot 1,51 \approx 2,96 \text{ об/хв;} \quad (16)$$

$$U_d = k_p \cdot u_{d\Sigma} = 1,96 \cdot 12,05 \approx 23,62 \text{ об/хв,} \quad (17)$$

де k_p – коефіцієнт охоплення, якщо кількість даних більша від 30 і рівень довіри дорівнює 0,95, приймається, що дорівнює 1,96 [5].

Отже, в результаті метрологічної атестації взірцевого ВК кутової швидкості системи АП ТП на підставі експериментальних досліджень виявлено, що розширена невизначеність ВК під час роботи в статичному режимі не перевищує 2,96 об/хв, а в динамічному – 23,62 об/хв.

Максимальну відносну розширену невизначеність взірцевого ВК кутової швидкості обчислимо за формулою

$$\tilde{U}_{0,95} = \frac{U}{N_{0\max}} 100\% . \quad (18)$$

Підставивши розширені невизначеності під час статичного та динамічного режимів роботи у формулу (18), одержимо значення відносних розширених невизначеностей в діапазоні роботи від 0 до 10500 об/хв, які у випадку статичних вимірювань не перевищують 0,03%, а у випадку динамічних – 0,25%.

Оскільки перевірка полягає у порівнянні частот обертання, вимірюваних взірцевим та перевірювальним тахометричним перетворювачем унаслідок зміни кутових швидкостей від нуля до максимального показу перевірювального ТП, то стандартну невизначеність типу А перевірювального ТП обчислюють за такою формулою:

$$u_{A_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (\Delta N_{0_{ij}} - \overline{\Delta N_{0_i}})^2}{(n_i - 1)}} . \quad (19)$$

Далі потрібно оцінити складові сумарної стандартної невизначеності типу В невиключених залишків систематичної похибки результатів вимірювань, що вносяться ВК перевірювального ТП.

Оскільки відносну похибку квантування δN_0 під час вимірювання частот обертання N_0 обчислюють за формулою (6), то невизначеність квантування обчислюють з меж похибки квантування в припущенні про рівномірність закону розподілу за формулою

$$u_{B_{кв}} = \frac{|z_M N_{0\max}^2|}{60 f_0 \sqrt{3}} . \quad (20)$$

Стандартну невизначеність, яка вноситься генератором опорної частоти другого ВК, визначають за рівняннями (8) та (9).

Тоді сумарна стандартна невизначеність типу В невиключених залишків систематичної похибки результатів вимірювань, що вносяться вимірювальним каналом перевірювального ТП, дорівнює

$$u_{B_{\Sigma}} = \sqrt{u_{B_{кв}}^2 + u_{B_{f_0}}^2} . \quad (21)$$

А сумарну невизначеність результату перевірки ТП з урахуванням стандартної невизначеності результатів спостережень типу А та сумарної стандартної невизначеності типу В обчислюють за формулою

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_{A_i}^2 + u_{B_{\Sigma}}^2} . \quad (22)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності U потрібно визначити значення коефіцієнта охоплення k , що створює проміжок, який відповідає заданому рівню довіри p . У загальному випадку коефіцієнт охоплення вибирають відповідно до формули

$$k_p = t_p(v_{eff}) , \quad (23)$$

де $t_p(v_{eff})$ – квантиль розподілу Стюдента з ефективним числом степенів вільності v_{eff} і довірчою імовірністю p .

Значення коефіцієнта $t_p(v_{eff})$ здебільшого вибирають з довідникової таблиці за значенням ефективного числа степенів вільності, яке обчислюють за формулою

$$v_{eff} = \frac{u_{\sum}^4}{\frac{u_{A_i}^4}{n_i - 1} + \frac{u_{B_{кв}}^4 + u_{B_{f0}}^4}{\infty}} \quad (24)$$

Розрахувавши ефективне число степенів вільності v_{eff} та вибравши коефіцієнт охоплення k_p , отримаємо розширену невизначеність, яку обчислюємо за формулами (16) та (17).

Максимальну відносну розширену невизначеність (клас точності) перевіряемого ТП обчислюємо за формулою

$$\tilde{U} = \frac{U}{\Delta N_{0max}} 100\% \quad (25)$$

Подання повного результату вимірювання охоплює оцінення вихідної величини і приписане їй значення розширеної невизначеності із зазначенням рівня довіри

$$\Delta = \overline{\Delta N_0} \pm U, p = 0,95 \quad (26)$$

Значення розширеної невизначеності вказують з кількістю значущих цифр, але не більше від двох. Результат вимірювання, як і значення вхідних величин, заокруглюють так, щоб вони відповідали своїм невизначеностям.

Отже, під час підстановки одержаних за допомогою розробленої системи АП ТП даних у формули (19)–(26) можна автоматично оцінювати стандартні та відносні розширені невизначеності вимірювань і подавати результати перевірки в стандартній формі як для статичних, так і для динамічних режимів роботи ТП.

ВИСНОВКИ

Отже, в результаті проведених експериментальних досліджень виявили, що розроблений взірцевий ВК кутової швидкості у системі АП ТП дає змогу здійснювати високоточні вимірювання заданих частот обертання в широкому діапазоні їх зміни (від 0 до 10500 об/хв) із максимальною відносною розширеною невизначеністю, яка не перевищує 0,03% у разі статичних вимірювань та 0,25% у разі динамічних вимірювань.

У процесі виконання метрологічних робіт та подання результатів вимірювань рекомендують наводити достатню кількість інформації для того, щоб можна було проаналізувати чи повторити весь процес одержання результату перевірки й обчислення її невизначеності вимірювань.

На підставі міжнародних стандартів запропоновано методику оцінювання невизначеності результату вимірювань у разі автоматизованої перевірки ТП.

1. ДСТУ ISO/IEC 17025-2001. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – К.: Держстандарт України, 2001.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – Geneva: ISO, 1993. – 101 p.
3. Сопрунюк П. М., Василевський А. Н., Чабанюк Ю. А. Неопределенность результатов измерений при контроле асинхронности вращения электромеханических преобразователей // Відбір і обробка інформації. – 2006. – Вип. 25(102). – С. 72–78.
4. Василевський О. М., Поджаренко В. О. Система вимірвального контролю параметрів взаємозв'язаних роторних машин: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 156 с.
5. Василевський О. М. Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 3(7). – С. 147–151.