

УДК 621.317

О. М. Васілевський, канд. техн. наук, доц;

Т. М. Мельник, студ.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ОБЕРТАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Досліджено якість результатів вимірювань обертальних параметрів електромоторів на основі міжнародного підходу до оцінювання точності вимірювань для забезпечення єдності вимірювань та конкурентоспроможності вітчизняних наукових розробок на світовому ринку.

Вступ і постановка задачі

Складаючи звіт про результати вимірювання фізичних величин (ФВ), необхідно подати кількісне зазначення показників якості результату так, щоб можна було правильно оцінити його надійність. Без такого зазначення результати вимірювань, виконані різними лабораторіями в різних країнах світу, не можна порівнювати ні між собою, ні з довідковими величинами, що подані у специфікації чи нормативному документі (стандарті). Тому необхідно, щоб існувала легкоздійсненна, зрозуміла і загальноприйнята методика опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності вимірювань [1].

Поняття невизначеності як кількісної характеристики є порівняно новим у вимірюваннях, хоча похибка та аналіз похибки давно використовуються в метрології. Наразі загальновизнано, що коли вже оцінені всі відомі й допустимі компоненти похибки і внесені відповідні поправки, то все ще залишається невизначеність відносно істинності встановленого результату, тобто сумніви у тому, наскільки точно результат вимірювання відображає значення вимірюваної величини [1, 2]. Тому дослідження якості результатів вимірювань обертальних параметрів електромоторів (ЕМ) з урахуванням міжнародних підходів до оцінювання та вираження невизначеності (непевності) вимірювань є актуальною науково-прикладною задачею. Розв'язання цієї наукової задачі дозволить представляти і порівнювати результати вимірювань обертальних параметрів ЕМ, виконаних різними лабораторіями в різних країнах світу, а також забезпечить єдність вимірювань та випробувань в галузі приладобудування з урахуванням концепції невизначеності.

З огляду на вищезазначене, *метою статті* є створення методології оцінювання точності та якості вимірювань обертальних параметрів ЕМ на основі теорії невизначеності, а також метрологічного забезпечення єдності вимірювань для забезпечення конкурентоспроможності на світовому ринку.

Аналіз стану досліджень та публікацій

З літературних джерел [1—3] відомо, що модельне рівняння, яким описується процес вимірювання обертальних параметрів ЕМ із заданими частотами обертання, має вигляд

$$\Delta N_o = f(A_1, A_2, f_{оп}, z_M) = N_{o1} - N_{o2} = \frac{60f_{оп}}{A_1 z_M} - \frac{60f_{оп}}{A_2 z_M}, \quad (1)$$

де ΔN_o — несинхронність обертання роторів ЕМ; N_{o1} — частота обертання ротора головного ЕМ (до 5000 об./хв); N_{o2} — частота обертання ротора допоміжного ЕМ (до 5000 об./хв); $f_{оп}$ — опорне значення частоти квантування (16 МГц); A_1, A_2 — кількість імпульсів, що відповідає частотам обертання головного і допоміжного ЕМ; z_M — кількість прорізів модулятора сенсора частоти обертання ротора ($z_M = 30$).

Вимірювання здійснювались в лабораторних умовах за температури навколишнього середовища + 20 °С. Експлуатаційні умови використання засобу вимірювання обертальних параметрів ЕМ від 0 до +30 °С. Відносна похибка квантування δN_o під час вимірювання частот обертання оцінювалась за формулою [3]

$$\delta N_o = \frac{N_o z_M}{60 f_{оп}}. \quad (2)$$

Відносна похибка опорної частоти кварцового резонатора дорівнює $\pm 2,5 \cdot 10^{-7}$. Температурний коефіцієнт за частотою кварцового резонатора не перевищує $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ на 1°C .

Викладення основного матеріалу

Під час вимірювання кількості імпульсів відповідно до рівняння (1) отримано чотири групи спостережень $K = 4$ частот обертання ΔN_0 в об./хв на різних заданих частотах (на початку, всередині та на верхній межі діапазону вимірювань ЗВ обертальних параметрів), по 20 значень в кожній групі ($J = 20$), які наведено в табл. 1.

На основі проведених багаторазових досліджень обертальних параметрів ЕМ виконаємо оцінювання внутрішньогрупової невизначеності за типом А.

Таблиця 1

Результати досліджень обертальних параметрів ЕМ

№	Перша група спостережень обертальних параметрів ЕМ ΔN_{01}	Друга група спостережень обертальних параметрів ЕМ ΔN_{02}	Третя група спостережень обертальних параметрів ЕМ ΔN_{03}	Четверта група спостережень обертальних параметрів ЕМ ΔN_{04}
1	0	12	12	23
2	2	11	11	-8
3	-1	20	16	13
4	1	-19	28	-14
5	-3	-17	-10	-25
6	-1	11	-13	-22
7	2	21	-12	-21
8	0	-27	7	-25
9	4	-11	19	-26
10	2	23	8	-19
11	-2	-17	27	-12
12	3	22	19	-17
13	-4	11	13	-27
14	0	12	10	-24
15	1	8	-10	-18
16	-1	2	21	-17
17	3	6	-5	8
18	0	11	3	-11
19	2	20	22	15
20	1	-8	14	-22

Для цього спочатку визначимо середні арифметичні значення кожної групи спостережень (див. табл. 1) за формулою

$$\Delta \bar{N}_{ok} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Delta N_{okj}, \quad (3)$$

де ΔN_{okj} — k -те ($k = 1, \dots, K$) спостереження обертальних параметрів ЕМ ΔN_0 на різних частотах обертання, що містить по J вимірювань в кожній групі.

Розраховані за формулою (3) середні арифметичні значення кожної групи спостережень зведені в табл. 2.

На основі розрахованих середніх арифметичних значень кожної групи спостережень визначимо оцінки внутрішньогрупових невизначеностей типу А за формулою

$$u_{Ak} = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\Delta N_{okj} - \Delta \bar{N}_{ok})^2}. \quad (4)$$

Результати отриманих оцінок внутрішньогрупових невизначеностей, оцінених за типом А, занесені до табл. 2.

Таблиця 2

Результат експериментальних досліджень якості вимірювань

	Перша група спостережень обертальних параметрів ЕМ	Друга група спостережень обертальних параметрів ЕМ	Третя група спостережень обертальних параметрів ЕМ	Четверта група спостережень обертальних параметрів ЕМ
$\Delta \bar{N}_{ok}$, об./хв	0,45	4,55	9	-12,45
u_{Ak} , об./хв	2,06	15,51	12,95	15,07

Визначимо найкращу оцінку вимірюваної величини $\Delta \bar{N}_0$ як середнє арифметичне груп спостережень обертальних параметрів ЕМ за формулою

$$\Delta \bar{N}_0 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Delta \bar{N}_{ok} = 0,39 \text{ об./хв}. \quad (5)$$

Експериментальну невизначеність типу А середніх арифметичних груп спостережень обертальних параметрів ЕМ оцінимо за формулою

$$u_A(\Delta \bar{N}_0) = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\Delta \bar{N}_{ok} - \Delta \bar{N}_0)^2} = 9,24 \text{ об./хв}. \quad (6)$$

На основі методики опрацювання груп прямих вимірювань з багаторазовим спостереженням [1] визначимо, чи є міжгрупова складова невизначеності значною в порівнянні з внутрішньогруповою складовою невизначеності. Для цього виконаємо такі операції. Спочатку визначимо дві незалежні оцінки усередненої внутрішньогрупової невизначеності результатів спостережень. Першу оцінку, позначимо як u_{AI} , що отримується із спостережуваних відхилень в k -й групі на основі середніх арифметичних, які розраховані за формулою (2). Оскільки ΔN_{ok} є середнім арифметичним J спостережень, то його оцінена невизначеність в припущенні, що міжгрупова дисперсія рівна нулю, оцінюється як u_{AI}^2/J . Тоді, враховуючи рівняння (6), отримаємо незалежну оцінку першої усередненої внутрішньогрупової дисперсії результатів спостережень

$$u_{AI}^2 = Ju_A^2(\Delta \bar{N}_0) = \frac{J}{K-1} \sum_{k=1}^K (\Delta \bar{N}_{ok} - \Delta \bar{N}_0)^2 = (184,86 \text{ об./хв})^2, \quad (7)$$

що має $\nu_I = K - 1 = 3$ ступені вільності.

Другу оцінку, позначену як u_{AII}^2 , яка є середньою оцінкою дисперсії, отриманою з K індивідуальних значень внутрішньогрупової дисперсії u_{Ak}^2 , визначимо за формулою

$$u_{AII}^2 = \frac{1}{K(J-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (\Delta N_{okj} - \Delta \bar{N}_{ok})^2 = (21,36 \text{ об./хв})^2, \quad (8)$$

що має $\nu_{II} = K(J-1) = 76$ ступенів вільності.

Оскільки оцінка u_{AI}^2 ґрунтується на мінливості середніх арифметичних, тоді як оцінка u_{AII}^2 ґрунтується на мінливості внутрішньогрупових спостережень, їх відмінність показує можливість присутності (міжгрупової) мінливості. Порівняємо значення u_{AI}^2 і u_{AII}^2 . Для цього використаємо F -тест.

З [1, 4] відомо, що F -розподіл є розподілом імовірності відношення

$$F(v_I, v_{II}) = \frac{u_{AI}^2(v_I)}{u_{AII}^2(v_{II})} = \frac{184,86}{21,36} = 8,65 \quad (9)$$

двох незалежних оцінок $u_{AI}^2(v_I)$ і $u_{AII}^2(v_{II})$ дисперсії нормально розподіленої випадкової змінної. Параметри v_I , і v_{II} є відповідними ступенями вільності двох оцінок, а $0 \leq F(v_I, v_{II}) < \infty$. Критичні значення F для різної ймовірності (квантилі F -розподілу) внесені в таблицю розподілу Фішера для різних значень v_I і v_{II} [1].

Критичне значення F для ймовірності 0,95 і числа ступенів вільності $v_I = 3$ та $v_{II} = 76$ знаходять за довідниковою таблицею розподілу Фішера [1] і воно дорівнює $F_{0,95} = 8,53$.

Порівнюючи розраховане значення F -розподілу (9) з критичним значенням F для ймовірності 0,95 і числа ступенів вільності $v_I = 3$ та $v_{II} = 76$, видно, що $F(v_I, v_{II}) \geq F_p$, а отже існування міжгрупової дисперсії приймається і передбачається, що вона випадкова. Тоді оцінена розраховується за формулою

$$u_A^2(\Delta\bar{N}_o) = \frac{\sum_{k=1}^K (\Delta\bar{N}_{ok} - \Delta\bar{N}_o)^2}{K(K-1)} \quad (10)$$

і має $v = K - 1 = 3$ ступені вільності.

Отже, стандартна невизначеність типу A груп результатів багаторазових вимірювань оберտальних параметрів ЕМ розраховується за формулою

$$u_A(\Delta\bar{N}_o) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (\Delta\bar{N}_{ok} - \Delta\bar{N}_o)^2}{K(K-1)}} \quad (11)$$

і складає $u_A(\Delta\bar{N}_o) = 4,62$ об./хв.

Виконаємо оцінювання складових комбінованої стандартної невизначеності типу B невилучених залишків систематичної похибки результатів вимірювань.

Оскільки межі відносної похибки опорної частоти δ_{on} не перевищують $\pm 2,5 \cdot 10^{-7}$, то межі абсолютної похибки вимірювання частот обертання з урахуванням верхньої межі вимірювання $N_{o\max} = 5000$ об./хв можна розрахувати за формулою

$$\Delta_{on} = \pm N_{o\max} \delta_{on} = \pm 5000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7} = \pm 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ об./хв} . \quad (12)$$

Стандартну невизначеність типу B , що вноситься нестабільністю опорної частоти кварцового резонатора u_{1B} , в припущенні про рівномірний закон розподілу похибки всередині меж, розрахуємо за формулою

$$u_{1B} = \frac{2\Delta_{on}}{\sqrt{12}} = \frac{\Delta_{on}}{\sqrt{3}} = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ об./хв} . \quad (13)$$

Невизначеність квантування u_{2B} , що виникає за рахунок наявності похибки квантування, яка описується рівнянням (2), в припущенні про рівномірний закон розподілу цієї похибки, розрахуємо за формулою

$$u_{2B} = \frac{\Delta_{кв}}{\sqrt{12}} = \frac{\delta N_o}{\sqrt{12}} N_{o\max} = \frac{z_M (N_{o\max})^2}{60 f_{on} \sqrt{12}} = 0,23 \text{ об./хв} . \quad (14)$$

Невизначеність u_{3B} , що зумовлена відхиленням температури навколишнього середовища (температура навколишнього середовища в момент вимірювань $t_{\text{вим}} = +20$ °С) від температури калібрування засобу вимірювання оберտальних параметрів $t_k = +25$ °С, обчислимо за допомогою довідникових даних про температурний коефіцієнт нестабільності кварцового резонатора

$k_t = \pm 1 \cdot 10^{-9}$, в припущенні про нормальний закон розподілу похибки за формулою

$$u_{3B} = \frac{|t_{\text{вим}} - t_k| \cdot k_t}{k_p} N_{o\text{max}} = \frac{|20 - 25| 10^{-9}}{1,96} 5000 = 12,76 \cdot 10^{-6} \text{ об./хв.} \quad (15)$$

Комбіновану стандартну невизначеність типу B результатів вимірювань обертальних параметрів ЕМ розрахуємо з урахуванням стандартних невизначеностей (13)—(15) за формулою

$$u_{cB} = \sqrt{u_{1B}^2 + u_{2B}^2 + u_{3B}^2} = 0,23 \text{ об./хв.} \quad (16)$$

Прийнявши до уваги критерій мізерної невизначеності [1], першою і третьою складовими невизначеностей типу B можна знехтувати, оскільки вони більш ніж в три рази є меншими за домінуючу складову стандартної невизначеності типу B u_{2B} .

Комбіновану стандартну невизначеність результатів вимірювань обертальних параметрів ЕМ з урахуванням стандартної невизначеності типу A (11) та другої складової невизначеності типу B (14) розрахуємо за формулою

$$u_c = \sqrt{u_A^2 (\Delta \bar{N}_o) + u_{2B}^2} = 4,64 \text{ об./хв.} \quad (17)$$

Отже, в результаті проведених досліджень якості результатів вимірювань обертальних параметрів ЕМ на основі концепції невизначеності встановлено, що комбінована невизначеність не перевищує 4,64 об./хв в діапазоні частот обертання роторів ЕМ 10...5000 об./хв. Ця невизначеність складається зі стандартної невизначеності типу A $u_A (\Delta \bar{N}_o) = 4,62$ об./хв (11), яка, як показали дослідження, належним чином відображає як внутрішньогрупову, так і міжгрупову складові невизначеності та невизначеності квантування типу B $u_{2B} = 0,23$ об./хв, що характеризує наявність в результатах вимірювань залишків невилучених меж систематичної складової похибки.

Висновки

На основі проведених багаторазових вимірювань обертальних параметрів ЕМ за допомогою способу вимірювання обертальних параметрів розроблено методологію оцінювання якості результатів вимірювань обертальних параметрів ЕМ на основі міжнародного підходу до вираження точності вимірювань, яка дозволяє забезпечити єдність вимірювань в галузі досліджень обертальних параметрів ЕМ та конкурентоспроможність вітчизняних наукових розробок на світовому ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Васілевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань : навч. посіб. / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук. — Вінниця : ВНТУ, 2012. — 172 с. — ISBN 978-966-641-454-3.
2. Васілевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів : моногр. / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 176 с. — ISBN 978-966-641-420-8.
3. Сопрунок П. М. Неопределенность результатов измерений при контроле асинхронности вращения электромеханических преобразователей / П. М. Сопрунок, А. Н. Василевский, Ю. А. Чабанюк // Системи обробки інформації. — Харків. — 2006. — № 7(56). — С. 72—75.
4. 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. — ISSN 1997-9266.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Стаття надійшла до редакції 28.12.2012
Рекомендована до друку 21.01.2013

Васілевський Олександр Миколайович — начальник відділу захисту інформації та інформаційно-технічного забезпечення МОН України, Київ; доцент кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця;

Мельник Тетяна Миколаївна — студентка Інституту автоматики, електроніки та комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету, Вінниця.