

НАФТОГАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.317

О.М. Васілевський, к.т.н., доцент

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ТА МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, м. Київ, wasilevskiy@mail.ru

Розроблено метрологічне забезпечення засобу вимірювання кутової швидкості та моменту інерції електродвигунів для міжнародного визнання результатів вимірювань та їх подання з урахуванням концепції невизначеності вимірювань.

Ключові слова: засіб вимірювання кутової швидкості, засіб вимірювання моменту інерції, метрологічне забезпечення, концепція невизначеності.

Вступ та постановка задачі

Вимірювання номінальних та максимальних обертових параметрів електродвигунів під час їх випробувань є вирішальним фактором їх конкурентоспроможності на світовому ринку. Встановлення відповідності стану параметрів електродвигунів нормативним документам здійснюється за допомогою відповідних засобів вимірювання кутової швидкості та моменту інерції. На сьогоднішній день, не зважаючи на наявність сучасних засобів вимірювання електричних величин, відсутні засоби вимірювання неелектричних величин для точного визначення кутових швидкостей та моментів інерції. Відсутність метрологічного забезпечення вимірювань обертових параметрів електродвигунів досить часто приводить до нехтування процедурою вимірювального контролю головних обертових параметрів електродвигунів під час їх випробувань. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки якісно нових засобів вимірювання обертових параметрів електродвигунів з підвищеною точністю вимірювання та метрологічного забезпечення для них з урахуванням міжнародних підходів до оцінювання характеристики точності вимірювань.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Відомі роботи [1 – 3], в яких розглядаються математичні моделі вимірювальних каналів кутової швидкості та моменту інерції, але без метрологічного забезпечення з урахуванням міжнародних підходів до оцінювання характеристик точності вимірювань для них.

Узагальнена структурна схема засобу вимірювання кутової швидкості та моменту інерції електродвигунів (ЕМ) представлена на рис. 1.

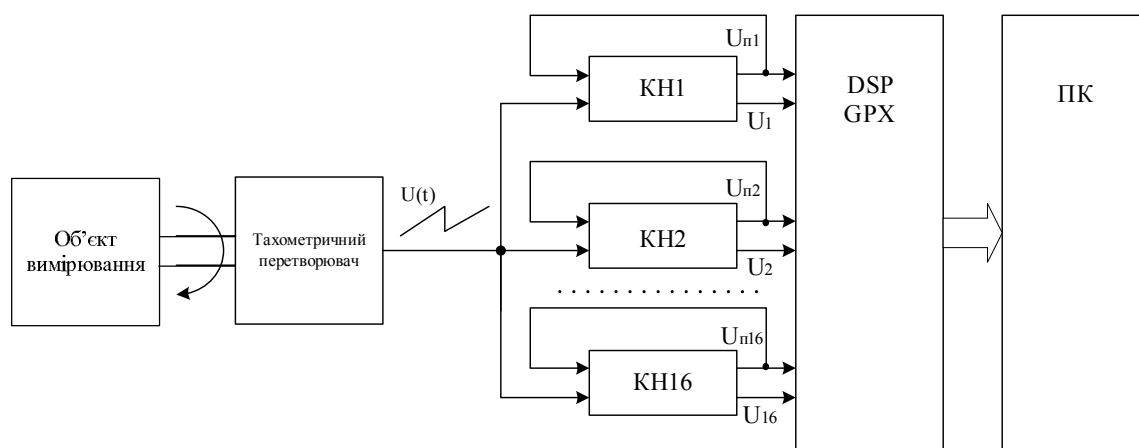


Рис. 1. Узагальнена структурна схема засобу вимірювання кутової швидкості та моменту інерції ЕМ

Як видно з рис. 1, до складу узагальненої структурної схеми засобу вимірювання (ЗВ) входять: тахометричний перетворювач, що перетворює кутове положення ротора ЕМ в напругу [2]; компаратори напруги, за допомогою яких стає можливою автоматична зміна розділювальної здатності ЗВ в залежності від діапазону кутових швидкостей, що вимірюються; мікропроцесорний засіб (цифровий сигнальний процесор) та персональний комп'ютер для

первинного програмування і експериментального дослідження дослідних зразків засобів вимірювань.

Рівняння перетворення, яке зв'язує вхідну та вихідну величини у статичному режимі вимірювань, описується виразом

$$U_{3B}(t) = \begin{cases} S_{10} R_{33} \frac{I}{r^2} \left(a \frac{\beta}{2} \omega t + a \frac{\beta^2}{4} \right), \varphi \in [\varphi_{П1}, \varphi_{П2}); \\ S_{10} R_{33} \frac{I}{r^2} \left(a \frac{\beta}{2} (\omega t + \pi) + a \frac{\beta^2}{4} \right), \varphi \in [\varphi_{П2}, \varphi_{П1}), \end{cases} \quad (1)$$

де S_{10} - інтегральна струмова чутливість фотоприймача при немодульованому опроміненні; I - сила світла; r - відстань від джерела світла до поверхні, що освітлюється; R_{33} - опір зворотного зв'язку тахометричного перетворювача; ω - кутова швидкість; φ - кут повороту; a, β - параметри, якими описується форма модулятора первинного тахометричного перетворювача (ТП).

Вираз, що зв'язує вихідну напругу ТП та миттєву кутову швидкість має вигляд

$$\omega(t) = \frac{2r^2}{S_{10} R_{33} a I \beta} \frac{dU_{3B}(t)}{dt}. \quad (2)$$

Рівняння для визначення моменту інерції ротора за кутовою швидкістю та амплітудою крутильних коливань має вигляд [2]:

$$J = m \left(\frac{\varepsilon \omega_C^2}{\Omega_p^2 - \omega_C^2} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{A_\varphi} \right), \quad (3)$$

де m – маса ротора ЕМ; ε - ексцентриситет маси ротора; Ω_p - власна резонансна частота ЕМ; ω_C - середнє значення кутової швидкості; A_φ - амплітуда крутильних коливань.

Формування мети роботи

Метою даної роботи є представлення розробленої узагальненої структури ЗВ, опис модельних рівнянь розробленого ЗВ та розробка метрологічного забезпечення ЗВ кутової швидкості та моменту інерції з урахуванням міжнародних підходів до оцінювання характеристик точності вимірювань за для визнання результатів вимірювань кутових швидкостей і моменту інерції ЕМ усіма країнами світу та покращення товарообміну науково-технічною продукцією.

Викладення основного матеріалу

З довідкових (паспортних) даних відомо, що маса ротора ЕМ відома з високою точністю і складає (0.116 ± 0.0015) кг, з робіт [2, 4], відомо, що відносна похибка при вимірюванні максимального ексцентриситету маси ротора 158 мкм не перевищує 5%, а власна резонансна частота асинхронних ЕМ складає (90 ± 10) Гц.

Експериментальні значення середньоквадратичних відхилень (СКВ) похибки вимірювання кутової швидкості за допомогою розробленого ЗВ при багаторазових вимірюваннях та різних періодах дискретизації трьох груп спостережень такі: $\sigma_{\omega_1} = 5,52$ рад/с, $\sigma_{\omega_2} = 2,11$ рад/с та $\sigma_{\omega_3} = 1,72$ рад/с.

Оскільки ми маємо 3 групи багаторазових вимірювань по 100 спостережень в кожній із груп, то знайдемо середнє арифметичне значення середньоквадратичних відхилень за формулою

$$\bar{\sigma}_\omega = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_{\omega_n} = \frac{5,52 + 2,11 + 1,72}{3} = 3,12 \text{ рад/с}. \quad (4)$$

Експериментальну невизначеність вимірювання кутової швидкості типу А 3-х груп СКВ розрахуємо за формулою

$$u_{A\omega} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\sigma_{\omega n} - \bar{\sigma}_{\omega})^2} = \sqrt{4,38} = 2,09 \text{ рад/с.} \quad (5)$$

Далі визначимо чи існує значна міжгрупова складова дисперсії в порівнянні з внутрішньогруповою складовою. Для цього визначимо першу оцінку, яка позначається як s_I^2 , в припущенні того, що міжгрупова дисперсія дорівнює нулю

$$s_I^2 = Ku_{A\omega}^2 = \frac{K}{N-1} \sum_{n=1}^N (\sigma_{\omega n} - \bar{\sigma}_{\omega})^2 = 100 (2,0917)^2 = 437,51 \text{ (рад/с)}^2. \quad (6)$$

Така оцінка має $N-1$ ступенів вільності.

Друга оцінка, позначається як s_{II}^2 , є середньою оцінкою дисперсії, отриманої з N індивідуальних значень внутрішньогрупової дисперсії. Оскільки структура врівноваження і всі ступені вільності $v_n = K-1$, то оцінкою s_{II}^2 є середнє арифметичне $\sigma_{\omega n}^2(\sigma_{\omega k})$

$$s_{II}^2 = \overline{\sigma_{\omega n}^2(\sigma_{\omega k})} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_{\omega n}^2(\sigma_{\omega k}) = \frac{5,52^2 + 2,11^2 + 1,72^2}{3} = 12,65 \text{ (рад/с)}^2. \quad (7)$$

Друга оцінка має $N(K-1)$ ступенів вільності.

Для порівнянь оцінок s_I^2 та s_{II}^2 використовують F-тест. Відомо, що F-розподіл складових є розподілом вірогідностей відношення [4]

$$F(v_I, v_{II}) = \frac{s_I^2(v_I)}{s_{II}^2(v_{II})} = \frac{437,51}{12,65} \approx 34,6. \quad (8)$$

Оскільки оцінка $s_I^2(v_I)$ є більшою за оцінку $s_{II}^2(v_{II})$, то це означає, що існує міжгрупова дисперсія і припускається, що вона випадкова. Тоді оцінена дисперсія $\bar{\sigma}_{\omega}$ отримується з $u_{A\omega}^2$, так як вона належним чином відображає як внутрішньогрупову, так і міжгрупову випадкові складові дисперсії. Таким чином, стандартна невизначеність вимірювання кутових швидкостей, що оцінена за типом А буде визначатися за виразом

$$u_{A\omega}^2(\bar{\sigma}_{\omega}) = \frac{u_{A\omega}^2}{N}, \quad (9)$$

і з врахуванням (5) складає

$$u_{A\omega}(\bar{\sigma}_{\omega}) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\sigma_{\omega n} - \bar{\sigma}_{\omega})^2}{N(N-1)}} = 1,21 \text{ рад/с.} \quad (10)$$

Розширена невизначеність вимірювання кутової швидкості ЕМ складає $U_{\omega} = 1,96 u_{A\omega}(\bar{\sigma}_{\omega}) = 2,37 \text{ рад/с.}$

Експериментальні дані вимірювань крутильних коливань ЕМ наведені на рис. 2. Вибірки вихідного коду АЦП згладжені кубічними сплайнами.

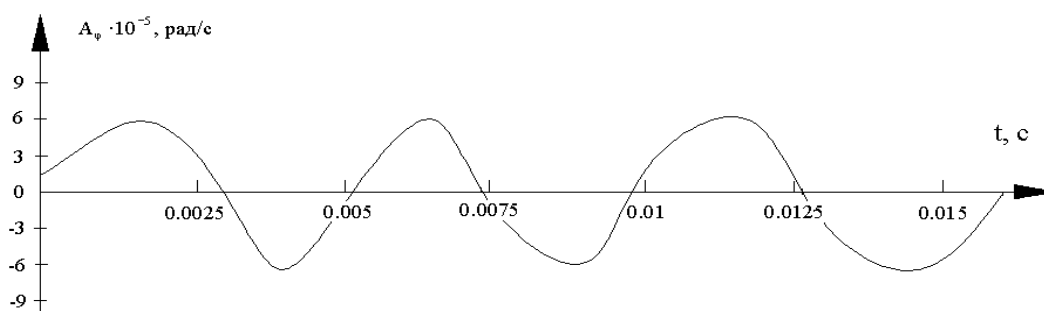


Рис. 2. Експериментальні дані крутильних коливань ЕМ, що визвані ексцентриситетом ротора

Як видно з рис. 2 крутильні коливання не перевищують $\pm 8 \cdot 10^{-5}$ рад/с. Стандартну невизначеність вимірювання крутильних коливань розрахуємо за формулою на основі отриманих експериментальних даних (рис. 2)

$$u_{A\phi}(\bar{A}_{\phi}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{\phi i} - \bar{A}_{\phi})^2}{n(n-1)}} = 7,79 \cdot 10^{-6} \text{ рад/с.} \quad (11)$$

Стандартну невизначеність типу В, що вноситься за рахунок неточного вимірювання маси ротора, в припущенні рівномірного закону розподілу оцінимо за формулою

$$u_{Bm} = \frac{\pm \Delta_m}{\sqrt{3}} = \frac{0,0015}{1,73} \approx 0,87 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (12)$$

Стандартну невизначеність, що вноситься відхиленнями резонансної частоти асинхронного ЕМ, в припущенні про нормальний закон розподілу всередині меж, можна оцінити за формулою

$$u_{B\Omega} = \frac{\theta_p}{k_p} = \frac{10}{1,96} \approx 5,1 \text{ Гц,} \quad (13)$$

де k_p – коефіцієнт охоплення для нормального закону розподілу, який дорівнює 1,96 для вірогідності $P=0,95$.

Стандартна невизначеність вимірювання ексцентриситету маси ротора, що оцінена за типом В, в припущенні про нормальний закон розподілу похибки всередині меж, буде дорівнювати

$$u_{B\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max} \delta_\varepsilon}{k_p \cdot 100\%} = \frac{158 \cdot 5\%}{1,96 \cdot 100\%} \approx 4,03 \text{ мкм.} \quad (14)$$

Комбіновану стандартну невизначеність вимірювання моменту інерції ротора з урахуванням кореляційного зв'язку між кутовою швидкістю та крутильними коливаннями розрахуємо за формулою

$$u_s^2(J) = \left(\frac{\partial J}{\partial \omega_c} \right)^2 u_{A\omega}^2(\bar{\sigma}_\omega) + \left(\frac{\partial J}{\partial A_\varphi} \right)^2 u_{A_\varphi}^2(\bar{A}_\varphi) + \left(\frac{\partial J}{\partial m} \right)^2 u_{Bm}^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right)^2 u_{B\varepsilon}^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial \Omega_p} \right)^2 u_{B\Omega}^2 + 2 \frac{\partial J}{\partial \omega_c} \frac{\partial J}{\partial A_\varphi} u_{A\omega}(\bar{\sigma}_\omega) u_{A_\varphi}(\bar{A}_\varphi) r(\sigma_\omega, A_\varphi), \quad (15)$$

де $\frac{\partial J}{\partial \omega_c} = 4 \frac{m\varepsilon^2 \omega_c^3}{(\Omega_p^2 - \omega_c^2)^2} \left(1 + \frac{1}{A_\varphi} \right) + 4 \frac{m\varepsilon^2 \omega_c^5}{(\Omega_p^2 - \omega_c^2)^3} \left(1 + \frac{1}{A_\varphi} \right)$ – коефіцієнт чутливості за кутовою швидкістю, який дорівнює $-0,467 \cdot 10^{-10}$ кг·с·м²/рад при максимальній кутовій швидкості 1000 рад/с та максимальному значенню крутильного коливання $8 \cdot 10^{-5}$ рад/с та вказаних вище параметрах, що входять у рівняння для визначення моменту інерції;

$\frac{\partial J}{\partial A_\varphi} = -\frac{m\varepsilon^2 \omega_c^4}{(\Omega_p^2 - \omega_c^2)^2 A_\varphi^2}$ – коефіцієнт чутливості за крутильними коливаннями, який дорівнює $-0,455$ кг·с·м²/рад при аналогічних параметрах ЕМ;

$\frac{\partial J}{\partial m} = \frac{\varepsilon^2 \omega_c^4}{(\Omega_p^2 - \omega_c^2)^2} \left(1 + \frac{1}{A_\varphi} \right)$ – коефіцієнт чутливості за масою ротора буде дорівнювати $0,31 \cdot 10^{-3}$ м² при аналогічних параметрах ЕМ;

$\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} = 2 \frac{m\varepsilon \omega_c^4}{(\Omega_p^2 - \omega_c^2)^2} \left(1 + \frac{1}{A_\varphi} \right)$ – коефіцієнт чутливості за ексцентриситетом маси ротора буде дорівнювати $0,4612$ кг·м при аналогічних параметрах ЕМ;

$\frac{\partial J}{\partial \Omega_p} = -4 \frac{\Omega_p m\varepsilon^2 \omega_c^4}{(\Omega_p^2 - \omega_c^2)^3} \left(1 + \frac{1}{A_\varphi} \right)$ – коефіцієнт чутливості за ексцентриситетом маси ротора буде дорівнювати $0,83 \cdot 10^{-9}$ кг·с·м² при аналогічних параметрах ЕМ;

$r(\sigma_\omega, A_\varphi)$ – коефіцієнт кореляції, який згідно з [5] розраховується за формулою

$$r(\sigma_\omega, A_\varphi) = \frac{\sum_{k=1}^n (\sigma_{\text{ок}} - \bar{\sigma}_\omega)(A_{\varphi k} - \bar{A}_\varphi)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (\sigma_{\text{ок}} - \bar{\sigma}_\omega)^2 \sum_{k=1}^n (A_{\varphi k} - \bar{A}_\varphi)^2}} = -0,9916 \cdot \quad (16)$$

Як видно з розрахунків існує сильний кореляційний зв'язок між крутильними коливаннями та кутовою швидкістю ротора.

Таким чином, підставляючи розраховані значення коефіцієнту кореляції та коефіцієнтів чутливості у формулу (15), отримаємо оцінку комбінованої невизначеності вимірювання моменту інерції ротора, яка складає $u_s(J)=0,4 \cdot 10^{-5}$ кг·м².

Розширену невизначеність результату вимірювання моменту інерції визначимо за формулою [1]

$$U = t_p(v_{\text{eff}})u_s(J), \quad (17)$$

де $t_p(v_{\text{eff}})$ - коефіцієнт Стюдента для заданого рівня довіри p і числа ступенів вільності v_{eff} , що розраховується за виразом

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_s^4(J)}{\frac{\left(\frac{\partial J}{\partial A_\phi}\right)^4 u(\bar{A}_\phi)^4 + \left(\frac{\partial J}{\partial \omega_c}\right)^4 u(\bar{\sigma}_\omega)^4}{v_i}}, \quad (18)$$

де $v_i = n - 1$ для невизначеностей, визначених за типом А; $v_i = \infty$ для невизначеностей, визначених за типом В.

Підставляючи розраховані невизначеності у формулу (16), отримаємо таку кількість ступенів вільності $v_{\text{eff}} = 1638$. Коефіцієнт Стюдента при такій кількості ступенів вільності та довірчому рівні 0,95 буде дорівнювати 1,96.

Отже, розширена невизначеність вимірювання моменту інерції за амплітудою крутильних коливань складає $U = \pm 1,96 \cdot 0,4 \cdot 10^{-5} = \pm 0,79 \cdot 10^{-5}$ кг·м², при $p=0,95$.

Висновки

На основі розробленого засобу вимірювання кутової швидкості та моменту інерції проведені вимірювання кутової швидкості та амплітуди крутильних коливань ЕМ, оцінено стандартну невизначеність вимірювання кутової швидкості, що складає 1,21 рад/с, стандартну невизначеність вимірювання крутильних коливань, що складає $7,79 \cdot 10^{-6}$ рад/с та комбіновану невизначеність вимірювання моменту інерції ротора, яка не перевищує $0,4 \cdot 10^{-5}$ кг·м² при довірчій ймовірності 0,95.

Список літературних джерел

1. Васілевський О. М. Підвищення точності вимірювання кутових швидкостей силових електромеханічних перетворювачів під час їх синхронізації / О. М. Васілевський, П. М. Сопрунюк, Ю. Ю. Чабанюк, В. Ю. Кучерук // Відбір і обробка інформації. – Львів. – 2006. - №25 (101). - С. 72-78.
2. Кучерук В. Ю. Підвищення точності вимірювання моментних характеристик електричних машин з використанням моделей самогальмування / В. Ю. Кучерук, О. М. Васілевський, О.М. Наталич, А.В. Поджаренко // Вісник Хмельницького національного університету. – № 2. – 2007. Т. 2. - С. 137 – 139.
3. Васілевський О. М. Методика підвищення інструментальної складової вірогідності контролю несинхронності обертання силових електромеханічних перетворювачів / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко, О. М. Наталич // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – №16 (147). – С. 216 – 222.
4. Васілевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів : [монографія] / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. – Вінниця : ВНТУ, 2011. - 176 с. – ISBN 978-966-641-420-8.
5. Поджаренко В. О. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності : [навчальний посібник] / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 128 с.