

## СТАНДАРТИЗАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ

УДК 621.317

О.М. Васілевський, к.т.н., доцент

### ОЦІНЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ НЕПЕВНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КРУТИЛЬНОГО МОМЕНТУ НА ОСНОВІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, o.vasilevskiy@gmail.com

*На основі аналітичних виразів складових адитивної і мультиплікативної похибок засобу вимірювання обертових моментів запропоновано модельне рівняння для перерахунку інструментальних складових похибок в інструментальну складову непевності.*

**Ключові слова:** засіб вимірювання, крутний момент, статична характеристика, адитивна похибка, мультиплікативна похибка, інструментальна непевність.

#### Вступ

Дослідження основних метрологічних характеристик при розробці нових зразків засобів вимірювання фізичних величин є досить важливою науковою задачею, вирішення якої сприяє забезпеченню єдності вимірювань та визначенню основних та додаткових похибок (невизначеностей) вимірювань для конкретного типу засобів вимірювання.

Як відомо з літературних джерел [1 - 5] до основних характеристик засобів вимірювання відносять рівняння перетворення, статичну характеристику, чутливість, адитивні та мультиплікативні похибки, діапазон вимірювань, основну та додаткові похибки засобів вимірювань (ЗВ). Цих характеристик достатньо для здійснення нормування точності ЗВ. Для цього необхідно щоб математичний апарат для дослідження ЗВ в статичному режимі дозволяв достатньо просто отримувати функції перерахованих метрологічних характеристик. Складність полягає в тому, що рівняння вимірювального перетворення описує для різних ЗВ різні фізичні процеси, які відносяться до різних галузей знань і є функціями багатьох змінних. Необхідно мати узагальнений для всіх них метод дослідження, який був би незалежним від фізичних явищ, покладених в основу побудови ЗВ. Таким математичним апаратом дослідження статичних метрологічних характеристик є використання розкладу рівняння перетворення в ряд Тейлора.

З огляду на вище зазначене, метою статті є отримання математичних моделей основних статичних метрологічних характеристик, які дозволять досліджувати та аналізувати характеристики їх зміни та синтезувати засоби вимірювання (ЗВ) обертових моментів з наперед заданими нормованими метрологічними характеристиками, а також розробка методики перерахунку адитивної і мультиплікативної складових похибки засобу вимірювання в інструментальну складову невизначеності вимірювання.

#### Модельне рівняння засобу вимірювання обертових моментів

Враховуючи аналітичний вираз функції перетворення ЗВ обертових моментів електромоторів в статичному режимі та відоме рівняння перетворення аналого-цифрового перетворювача (АЦП), отримано рівняння перетворення ЗВ обертових моментів, яке використаємо для дослідження основних метрологічних характеристик [6 - 8]

$$N_{My} = 0,25U_p 2^m g^{-1} l^{-1} R^{-1} S_c^{-1} U_i^{-1} \left( M - M_{i\bar{n}} + K1 \left( S + (M - M_{i\bar{n}}) \frac{T_s p}{i\eta J \omega_r} \right) \left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right)^{-1} J^{-1} \omega^{-2} \right), \quad (1)$$

де  $U_0$  – опорне значення напруги АЦП;  $m$  – розрядність АЦП;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $l$  – довжина вимірювального важеля;  $R$  – значення опорів тензорезистивного моста;  $U_p$  – напруга живлення сенсора зусилля;  $S_c$  – значення чутливості сенсора зусилля;  $\omega$  – власна частота вільних (недемпфованих) коливань перетворювача;  $K1$  – значення коефіцієнту перетворення тензорезистивного перетворювача;  $S$  – ковзання;  $J$  – момент інерції рухомої частини електромотора (ЕМ);  $p$  – кількість пар полюсів ЕМ;  $i$  – передавальне число редуктора;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії редуктора;  $\omega_r$  – кутова швидкість ротора ЕМ;  $M_{MS}$  – момент ексцентриситету муфти спряження;  $T_s$  – електромагнітна стала

часу статора;  $\gamma$  – значення коефіцієнту крутизни статичної характеристики ковзання;  $M_p$  – обертовий момент електромотора (вимірювана величина).

В робочих умовах ЗВ обертових моментів здійснює функціональне перетворення інформативного параметра  $M_p$  у вихідний код  $N_{My}$ . Крім інформативного сигналу, на нього діють впливні величини до яких відносяться всі інші параметри, які мають безпосередній зв'язок з вихідною величиною і спричиняють виникненню неінформативної складової перетворення. Аналіз отриманого рівняння перетворення (1) показує, що на процес перетворення інформативного параметру у вихідний сигнал впливає велика кількість параметрів (впливних величин). Але в зв'язку з тим, що майже всі величини являються незмінними, а одним із найважливіших параметрів при випробуваннях ЕМ, крім обертового моменту є момент інерції, тому дослідимо саме вплив моменту інерції як виливної величини на інформативний параметр.

Для отримання аналітичних залежностей основних статичних метрологічних характеристик ЗВ обертових моментів розкладемо рівняння перетворення (1) в ряд Тейлора і отримаємо

$$N_{iy} = N_{My0} + \left[ \frac{\partial N_{iy}}{\partial M_p} \right]_0 M_p + \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 N_{iy}}{\partial M_p^2} \right]_0 M_p^2 + \frac{1}{3!} \left[ \frac{\partial^3 N_{iy}}{\partial M_p^3} \right]_0 M_p^3 + \dots + \left[ \frac{\partial^2 N_{iy}}{\partial M_p \partial J} \right]_0 M_p \Delta J + \left[ \frac{\partial N_{iy}}{\partial J} \right]_0 \Delta J + \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 N_{iy}}{\partial J^2} \right]_0 \Delta J^2 + \dots \quad (2)$$

Аналітичний вираз чутливості ЗВ обертового моменту має вигляд

$$S_{i_p} = \frac{\partial N_{iy}}{\partial M_p} = \frac{U_p 2^n \left( \frac{K1T_s p}{i\eta J^2 \omega_r \left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right) \omega^2} + 1 \right)}{4gIRS_c U_i} \quad (3)$$

Зміна чутливості в діапазоні перетворення інформативного параметру  $M_p$  є похідною другого порядку від рівняння перетворення (1)  $S'_{i_p} = \frac{\partial^2 N_{i6}}{2\partial i_p^2}$  і в даному випадку дорівнює нулю.

Коефіцієнти впливу виливної величини – моменту інерції  $J$  на вихідний параметр засобу вимірювання обертового моменту описуються аналітичними виразами вигляду:

$$\beta_{0J} = \frac{\partial N_{i6}}{\partial J} = \frac{U_p 2^m \left[ \frac{K1T_s p \left( S + \frac{T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta J \omega_r} \right)}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right)^2 J^3 \omega^2 \omega_r} - \frac{K1 \left( S + \frac{T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta J \omega_r} \right)}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right) J^2 \omega^2} \right]}{4gIRS_c U_i} - \frac{U_p 2^m K1T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{4gIRS_c U_i i\eta \left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right) J^3 \omega^2 \omega_r}; \quad (4)$$

$$\beta'_{0J} = \frac{\partial^2 N_{i6}}{2\partial J^2} = \frac{U_p 2^m \left[ \frac{2K1T_s^2 p^2 \left( S + \frac{T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta J \omega_r} \right)}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right)^3 J^5 \omega^2 \omega_r^2} + \frac{4K1T_s p \left( S + \frac{T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta J \omega_r} \right)}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J \omega_r} \right)^2 J^4 \omega^2 \omega_r} \right]}{8gIRS_c U_i} +$$

$$+ \frac{U_p 2^m \left[ \frac{2K1T_s^2 p^2 (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta \left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right)^2 J^5 \omega^2 \omega_r^2} + \frac{2K1 \left( S + \frac{T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta J\omega_r} \right)}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right) J^3 \omega^2} + \frac{4K1T_s p (M_p - \dot{I}_{is})}{i\eta \left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right) J^4 \omega^2 \omega_r} \right]}{8glRS_C U_i} \quad (5)$$

Коефіцієнт сумісного впливу інформативного параметру та впливної величини – моменту інерції  $J$  на номінальну чутливість  $S_{M_p}$  засобу вимірювання обертового моменту описується аналітичним виразом, що має вигляд

$$\alpha_{0J} = \frac{\partial^2 N_{i0}}{\partial \dot{I}_p \partial J} = \frac{U_p 2^m \left( - \frac{K1T_s^2 p^2}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right)^2 J^4 \omega^2 i\eta \omega_r^2} - \frac{2K1T_s p}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right) J^3 \omega^2 i\eta \omega_r} \right)}{4glRS_C U_i} \quad (6)$$

Аналітичний вираз номінальної функції перетворення засобу вимірювання обертового моменту з урахуванням рівняння (3) має вигляд

$$N_N = S_{i_p} \dot{I}_p = \frac{U_p 2^m \left( \frac{K1T_s p}{i\eta J^2 \omega_r \left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right) \omega^2} + 1 \right)}{4glRS_C U_i} \dot{I}_p \quad (7)$$

Аналітичний вираз, яким описується абсолютна мультиплікативна похибка ЗВ обертового моменту  $\Delta N_{MJ}$  в умовах зміни моменту інерції  $J$  (як впливної величини) на величину  $\Delta J = J - J_N$  має вигляд

$$\Delta N_{iJ} = \alpha_{0J} \dot{I}_p \Delta J = \frac{U_p 2^m \left( - \frac{K1T_s^2 p^2}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right)^2 J^4 \omega^2 \omega_r^2 i\eta} - \frac{2K1T_s p}{\left( \gamma - \frac{T_s p}{J\omega_r} \right) J^3 \omega^2 \omega_r i\eta} \right) M_p \Delta J}{4glRS_C U_i} \quad (8)$$

Аналітичний вираз, що описує абсолютну адитивну похибку ЗВ обертового моменту  $\Delta N_{aJ}$  в умовах зміни моменту інерції  $J$  (як впливної величини) на величину  $\Delta J$  має вигляд

$$\begin{aligned} \Delta N_{aJ} &= \beta_{0J} (J - J_N) + \beta'_{0J} (J - J_N)^2 = \\ &= - \frac{U_p 2^m K1S i\eta J^3 \omega_r \gamma (\omega_r^2 \gamma J_N - T_s p) \Delta J}{4glRS_C U_i (\gamma J\omega_r - T_s p)^3 J^3 \omega^2 i\eta} + \\ &+ U_p 2^m K1 \Delta J \frac{(M_p - \dot{I}_{is}) (T_s^3 p^3 J_N - T_s p \gamma^2 J^3 \omega_r^2 - 3T_s^2 p^2 J_N \gamma J\omega_r + 3T_s p J_N \gamma^2 J^2 \omega_r^2)}{4glRS_C U_i (\gamma J\omega_r - T_s p)^3 J^3 \omega^2 i\eta} \end{aligned} \quad (9)$$

Характеристики зміни отриманих метрологічних моделей статичних характеристик (1), (3) – (9) засобу вимірювання обертового моменту при номінальних значеннях впливних величин наведені на рис. 1 - 7.

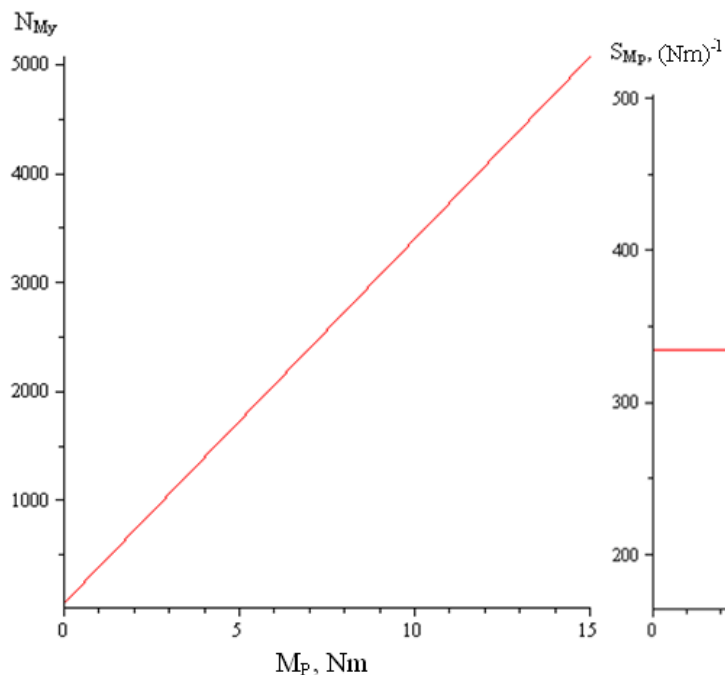


Рис. 1. Статична характеристика ЗВ

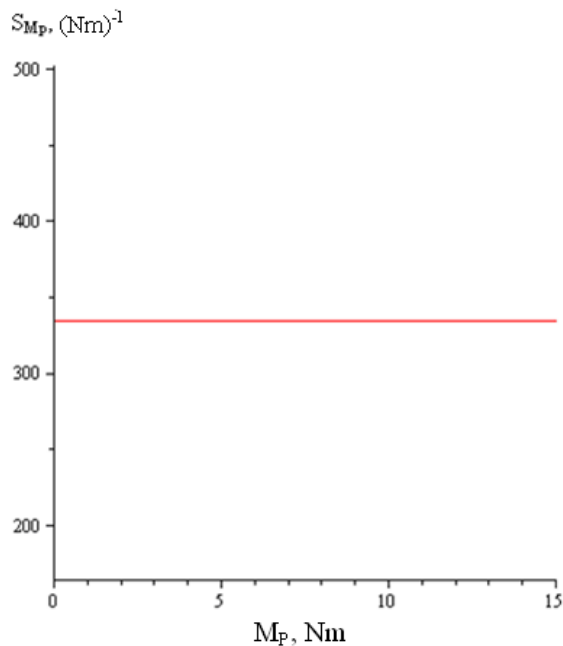


Рис. 2. Чутливість ЗВ

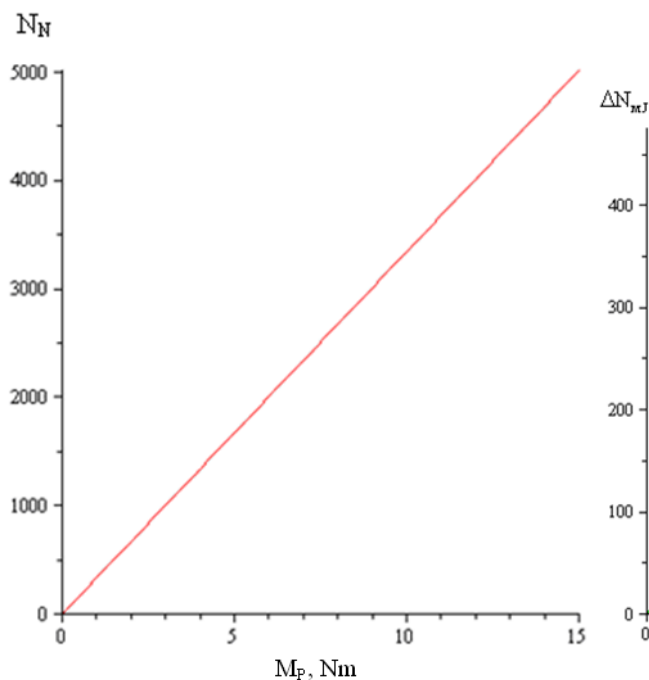


Рис. 3. Характеристика зміни номінальної функції перетворення ЗВ

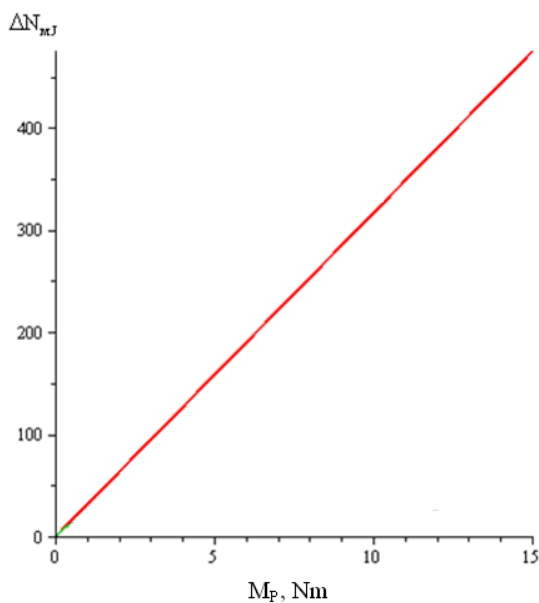


Рис. 4. Характеристика зміни абсолютної мультиплікативної похибки ЗВ в умовах відхилення впливної величини (моменту) J

Як видно з рис. 1 статична характеристика рівняння перетворення (1) засобу вимірювання обертового моменту є лінійною у всьому діапазоні вимірювання. Чутливість ЗВ (рис. 2) є постійною, а отже шкала такого ЗВ є рівномірною.

З рис. 4 видно, що абсолютна мультиплікативна похибка ЗВ крутильного моменту в умовах відхилення впливної величини J найбільших значень набуває при вимірюванні обертового моменту на верхній межі діапазону вимірювання. Амплітудне значення мультиплікативної похибки в умовах відхилення впливної величини J від свого номінального значення складає 500 десяткових імпульсів при значенні максимального вихідного коду 5000 імпульсів, тобто дорівнює 10 %. Тому при вико-

нанні вимірювань обертового моменту електромотора доцільно контролювати номінальне значення моменту інерції електромотора для врахування його при розрахунку обертового моменту в числовому вимірювальному перетворювачі засобу вимірювання обертового моменту.

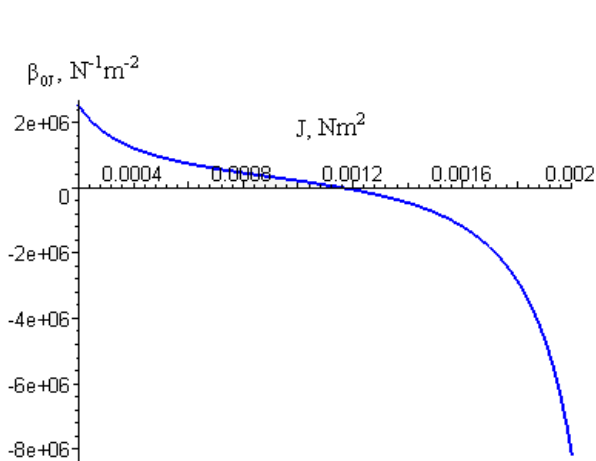


Рис. 5. Коефіцієнт впливу впливної величини  $J$  на вихідну величину

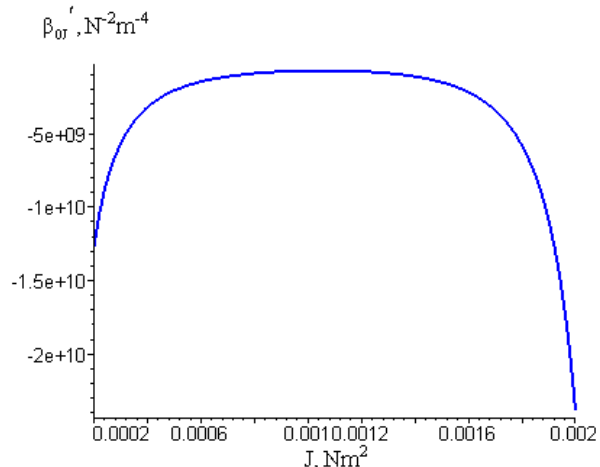


Рис. 6. Швидкість зміни коефіцієнта впливу впливної величини  $J$  на вихідну величину

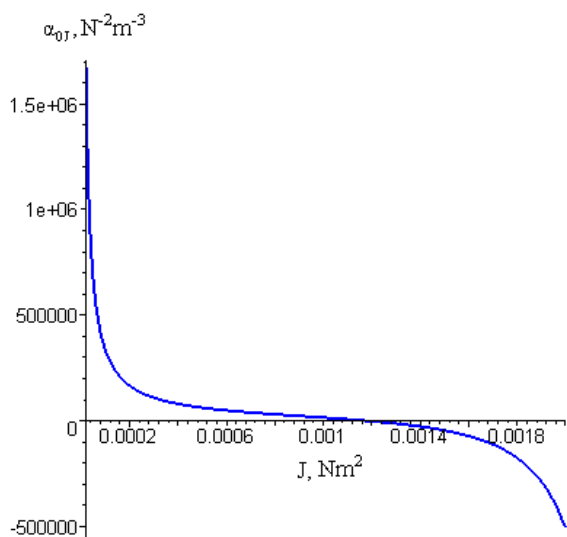


Рис. 7. Характеристика зміни коефіцієнта сумісного впливу інформативного параметру та впливної величини  $J$  на величину  $\Delta J$

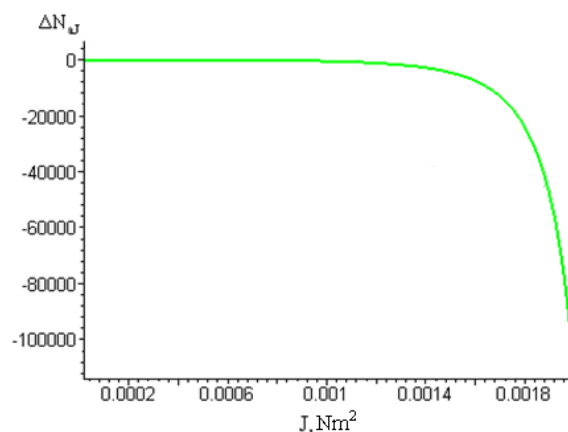


Рис. 8. Поверхня зміни абсолютної адитивної похибки ЗВ в умовах відхилення впливної величини  $J$

В умовах відхилення впливної величини  $J$  (моменту інерції електромотора) від свого номінального значення на величину  $\Delta J$ , значення абсолютної адитивної похибки ЗВ обертового моменту збільшується при значеннях моменту інерції електромотора більших за  $0,0014 \text{ Nm}^2$  (рис. 8). І оскільки адитивна похибка не залежить від вимірюваної величини, то оцінка її значення є проблематичною.

Характеристика зміни номінальної функції перетворення (рис. 3) ЗВ крутильного моменту є аналогічною до теоретичної статичної характеристики, що описується аналітичним виразом (1). Характеристика, що демонструє розбіжність між теоретичною характеристикою ЗВ обертового моменту (1) та номінальною функцією перетворення (7) зображена на рис. 9.

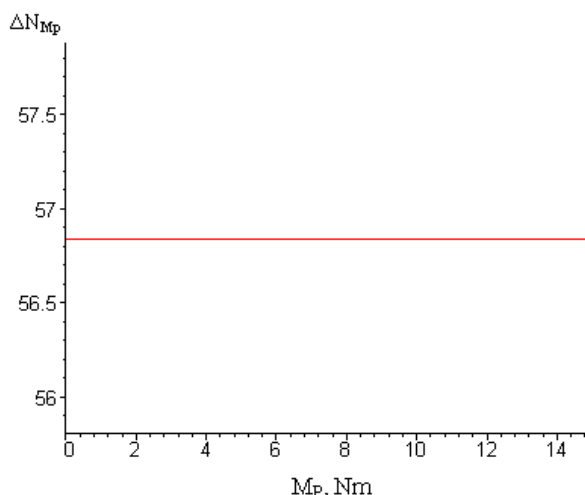


Рис. 9. Різниця між теоретичною характеристикою та характеристикою зміни номінальної функції перетворення

Як видно з рис. 9, розбіжність в показках між теоретичною характеристикою та номінальною функцією перетворення у всьому діапазоні вимірювання обертового моменту відрізняється лише на постійне абсолютне значення десяткового коду  $\Delta N_{Mp}$ , що не перевищує 57 імпульсів. Врахувавши те, що в діапазоні перетворення засобу вимірювання від 0 до 15 Nm максимальне значення вихідної величини в десятковому коді  $N_{My}$  відповідає 5000 імпульсів (рис. 1), то розбіжність у 57 десяткових імпульсів буде відповідати значенню обертового моменту 0,17 Nm. Ця розбіжність може бути врахована під час обробки результатів вимірювань, шляхом внесення поправки на зазначену величину десяткового коду.

Для представлення отриманих характеристик точності відповідно до вимог міжнародних стандартів з оцінювання якості вимірювань [4, 5] було розроблено методику перерахунку адитивної і мультиплікативної похибок засобу вимірювання в інструментальну складову невизначеності, яка наведена нижче.

#### Модельне рівняння для перерахунку адитивної і мультиплікативної похибок засобу вимірювання в інструментальну складову невизначеності

При використанні запропонованої вище методики отримання метрологічних моделей адитивної і мультиплікативної похибок актуальною є проблема перерахунку цих складових похибок в інструментальну складову невизначеності для представлення характеристик точності засобів вимірювань відповідно до вимог міжнародних стандартів з оцінювання якості вимірювань – концепції невизначеності.

В результаті розкладу модельного рівняння перетворення засобу вимірювання в ряд Тейлора можна отримати адитивну  $\Delta N_a$  та мультиплікативну  $\Delta N_m$  складові похибки засобу вимірювання, які в загальному вигляді описуються виразами:

$$\Delta N_a = \frac{\partial N}{\partial \eta} (\eta - \eta_0) + \frac{\partial^2 N}{2\partial \eta^2} (\eta - \eta_0)^2 = \frac{\partial N}{\partial \eta} \Delta \eta + \frac{\partial^2 N}{2\partial \eta^2} \Delta \eta^2; \quad (10)$$

$$\Delta N_m = \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial \eta} (x - x_0) (\eta - \eta_0) = \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial \eta} \Delta x \Delta \eta, \quad (11)$$

де  $N$  – вихідна величина засобу вимірювання (ЗВ);  $x$  – вхідна вимірювана величина;  $x_0$  – номінальне значення вхідної величини (значення за нормальних умов, що відповідає умовам градування ЗВ);  $\eta$  – впливна величина;  $\eta_0$  – номінальне значення впливної величини.

Для перерахунку адитивної та мультиплікативної складових похибки засобу вимірювання в інструментальну складову невизначеності необхідно оцінити невизначеність вхідної вимірюваної величини  $u(\Delta x)$  та впливної величини  $u(\Delta \eta)$  за верхньою та нижньою границями ( $[x_-; x_+]$  і  $[\eta_-; \eta_+]$ ), в припущенні про можливий вигляд закону розподілу похибки всередині меж.

Якщо нічого невідомо про вигляд закону розподілу похибки всередині меж, то відповідно до міжнародних рекомендацій з оцінювання невизначеності вимірювання слід припустити, що існує рівна імовірність того, що похибка має будь-яке значення в припустимих межах, тобто приймається рівномірний розподіл ймовірностей. Якщо ж відомо вигляд закону розподілу похибки всередині меж дос-

ліджуваних величин, то невизначеність оцінюється з урахуванням вигляду закону розподілу за відомими формулами, що наведені в [9].

Розглянемо випадок коли інформація про вигляд закону розподілу відсутня, в цьому випадку спочатку оцінюються невизначеність вхідної та впливної величин за формулами:

$$u(\Delta x) = \Delta x / \sqrt{12}; \quad u(\Delta \eta) = \Delta \eta / \sqrt{12}. \quad (12)$$

Потім виконують перерахунок адитивної та мультиплікативної складових похибки засобу вимірювання в інструментальну складову невизначеності за формулою [10]

$$u_{\text{Binst}} = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial \eta}\right)^2 u^2(\Delta \eta) + \left(\frac{\partial^2 N}{2\partial \eta^2}\right)^2 (2\Delta \eta u(\Delta \eta))^2 + \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x \partial \eta}\right)^2 u^2(\Delta x) u^2(\Delta \eta)}. \quad (13)$$

Введемо такі позначення коефіцієнтів впливу впливних величин  $\bar{\eta}$  на вихідний параметр N:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial N}{\partial \eta_i} = \sum_{i=1}^n \beta_{0i}; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 N}{2\partial \eta_i^2} = \sum_{i=1}^n \beta'_{0i}, \quad (15)$$

та коефіцієнту впливу впливних величин на номінальну чутливість засобу вимірювання

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial \eta_i} = \sum_{i=1}^n \alpha_{0i}, \quad (16)$$

модельне рівняння для оцінювання інструментальної складової дисперсії при n впливних величинах (більше ніж одній впливній величині) набуде вигляду

$$u_{\text{Binst}}^2 = \sum_{i=1}^n \beta_{0i}^2 u^2(\Delta \eta_i) + 4 \sum_{i=1}^n \beta'_{0i} \Delta \eta_i^2 u^2(\Delta \eta_i) + \sum_{i=1}^n \alpha_{0i}^2 u^2(\Delta x) u^2(\Delta \eta_i). \quad (17)$$

Враховуючи рівняння (12), аналітичний вираз (17) при n впливних величинах буде мати вигляд

$$u_{\text{Binst}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\beta_{0i} \Delta \eta_i)^2}{12} + \frac{\sum_{i=1}^n (\beta'_{0i} \Delta \eta_i^2)^2}{3} + \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_{0i} \Delta x \Delta \eta_i)^2}{12^2}. \quad (18)$$

При одній впливній величині вираз (18) набуде вигляду

$$u_{\text{Binst}}^2 = \frac{(\beta_0 \Delta \eta)^2}{12} + \frac{(\beta'_0 \Delta \eta^2)^2}{3} + \left(\frac{\alpha_0 \Delta x \Delta \eta}{12}\right)^2. \quad (19)$$

Таким чином, методика перерахунку адитивної і мультиплікативної складових похибки засобу вимірювання зводиться до оцінювання на основі апріорної інформації про невизначеності типу В вимірюваної і впливної величин та розрахунку за виразом (18) інструментальної складової дисперсії.

Запропоновану вище методику перерахунку складових інструментальної похибки засобу вимірювання обертових моментів (8, 9) в інструментальну складову невизначеності виконаємо апробуємо на практичних розрахунках.

Оскільки встановлено (рис. 9), що розбіжність між теоретичним рівнянням перетворення (1) ЗВ обертових моментів і отриманою номінальною функцією перетворення (7) в усьому діапазоні вимірювання обертового моменту складає 0,17 Nm. То стандартну невизначеність типу В, що вноситься за рахунок розбіжності між номінальною функцією перетворення та модельним рівнянням засобу вимірювання оцінимо за виразом (12) так  $u(\Delta M) = 0,17 / \sqrt{12} = 0,05 \text{ Nm}$ .

Невизначеність типу В, що вноситься за рахунок відхилення моменту інерції ротора  $E_M \Delta J = J - J_N = 10^{-5} \text{ Nm}^2$ , як впливної величини, в припущенні про рівномірний закон розподілу, складає  $u(\Delta J) = 10^{-5} / \sqrt{12} = 2,89 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^2$ . Для перерахунку отриманих адитивної і мультиплікативної складових похибки ЗВ обертових моментів в інструментальну складову невизначеності цього засобу вимірювання підставимо отримані значення невизначеностей  $u(\Delta M)$  і  $u(\Delta J)$ , а також максимальні значення коефіцієнтів впливу (4) – (6) при номінальних параметрах впливних величин, що представлені

на рис. 5 – рис. 7 в аналітичний вираз (17). В результаті отримуємо значення інструментальної складової дисперсії засобу вимірювання обертового моменту, що описується виразом

$$u_{\text{Binst}}^2(\Delta M, \Delta J) = \beta_{0J}^2 u^2(\Delta J) + 4\beta_{0J}'^2 \Delta J^2 u^2(\Delta J) + \alpha_{0J}^2 u^2(\Delta M) u^2(\Delta J) =$$

$$= \left(-8 \cdot 10^6 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}\right)^2 \left(2,89 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^2\right)^2 + 4\left(-2,5 \cdot 10^{10} \text{ N}^{-2} \text{ m}^{-4}\right)^2 \left(0,5 \text{ Nm}^2\right)^2 \left(2,89 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^2\right)^2 +$$

$$+ \left(1,65 \cdot 10^6 \text{ N}^{-2} \text{ m}^{-3}\right)^2 \left(0,05 \text{ Nm}\right)^2 \left(2,89 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^2\right)^2 = 536,68 . \quad (20)$$

Взявши квадратний корінь із розрахованого значення дисперсії (20), отримуємо інструментальну складову невизначеності, яка складає 23,17 десяткових імпульсів вихідного сигналу засобу вимірювання обертового моменту в діапазоні вимірювання від 0 до 15 Nm при максимальній кількості десяткових імпульсів на верхній межі вимірювання 5000 (рис. 1). Перерахувавши отримане значення невизначеності в десяткових імпульсах у абсолютне значення вимірюваної величини ( $15 \text{ Nm} \cdot 23,17 / 5000 = 0,07 \text{ Nm}$ ) отримуємо значення інструментальної складової невизначеності, яке складає 0,07 Nm в умовах відхилення моменту інерції ротора електромотора від свого номінального значення на  $10^{-5} \text{ Nm}^2$ .

Отже, в результаті досліджень встановлено, що інструментальна складова невизначеності засобу вимірювання обертових моментів складає 0,07 Nm в діапазоні вимірювання від 0 до 15 Nm при допустимому відхиленні впливної величини (моменту інерції) від свого номінального значення на  $10^{-5} \text{ Nm}^2$ .

### Висновки

Отже, отриманий математичний апарат та характеристики зміни основних статичних метрологічних ЗВ крутильного моменту дають можливість виявляти причини підвищеної похибки вимірювання обертового моменту електромоторів, досліджувати шляхи їх зменшення або усунення, а також синтезувати ЗВ обертового моменту з нормованими метрологічними характеристиками. Запропонована методика перерахунку адитивної і мультиплікативної складових похибки засобу вимірювання в інструментальну складову невизначеності дозволяє представляти результати досліджень точності засобів вимірювань відповідно до вимог міжнародних стандартів та забезпечує єдність вимірювань. Дана методика апробована під час досліджень характеристик точності вимірювань обертового моменту електромоторів.

### Список літературних джерел

1. ISO 9000:2005, Quality management systems - Fundamentals and vocabulary (Geneva, witzerland, ISO, 2005), 30 p.
2. ISO 9001:2008, Quality management systems – Requirements (Geneva, Switzerland, ISO, 2008), 27p.
3. ISO/TR 10017:2003, Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000 (Geneva, Switzerland, ISO, 2003), 26 p.
4. ISO 5725-1:1994/Cor 1:1998, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions (Geneva, Switzerland, ISO, 1994/1998).
5. ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Geneva, Switzerland, ISO, 2005), 28 p.
6. O. M. Vasilevskyi, Advanced mathematical model of measuring the starting torque motors, *Tekhnichna elektrodinamika*, 2013, Vol. 6, pp. 76–81.
7. V. Subrahmanyam, *Electric Drives* (McGraw-Hill, USA, 1996), 715 p.
8. O. M. Vasilevskyi, Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2014, 5.04: 403.
9. Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100, GUM 1995 with minor corrections, 1st edn. (2008).
10. Васілевський О. М. Методика перерахунку адитивної та мультиплікативної складових похибки засобу вимірювання в інструментальну складову непевності / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІРТК-2015). – Київ: НАУ. – 2015. – С. 68 – 69.