

ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.317

ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ ТА АНАЛІЗ ЙОГО ТОЧНОСТІ

© Васілевський Олександр, 2012

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано засіб вимірювання динамічного моменту електромоторів, наведено його статичну характеристику та проаналізовано основні складові непевностей.

Предложен способ измерения динамического момента электромоторов, приведена его статическая характеристика и проанализированы основные составляющие неопределенностей.

The mean of measuring of dynamic moment of electromotors is offered in the article, presented its static characteristic and analysed the main components of uncertainty.

Вступ. Сьогодні для побудови засобів вимірювання (ЗВ) динамічного моменту широко використовують метод непрямого вимірювання динамічного моменту електромоторів (ЕМ). Суть методу вимірювання, покладеного в основу побудови ЗВ динамічного моменту, полягає в тому, що спочатку вимірюють величину моменту інерції ротора J електромотора, потім в динамічному режимі роботи ЕМ вимірюють кутову швидкість ротора $\omega_r(t)$ та визначають величину динамічного моменту, як добуток моменту інерції та прискорення зміни кута повороту ротора ЕМ $\phi_r(t)$. Для реалізації такого методу застосовують засоби вимірювання, до складу яких входить: муфта спряження з ротором ЕМ, сенсор кута повороту з частотним виходом, а також вторинний засіб вимірювання, що будується на основі цифрового частотоміра, та мікроконтролер, який опрацьовує виміряні параметри і виводить отриманий результат на дисплей чи передає виміряні дані до персонального комп'ютера (ПК).

Оскільки в цьому ЗВ використовується метод, в основу якого покладено рівняння для визначення динамічного моменту, яке має вигляд

$$M_d(t) = J \frac{d\omega_r(t)}{dt}, \quad (1)$$

то для визначення інформативного параметра необхідно виміряти момент інерції, кутову швидкість, виконати її числове диференціювання і знайти добуток кутового прискорення та моменту інерції ротора ЕМ.

Однак муфта спряження та числове диференціювання істотно впливають на точність вимірювання величини динамічного моменту та значно обмежують його межі вимірювання. Тому необхідно знайти способи визначення динамічного моменту ЕМ без операції цифрового диференціювання для побудови ЗВ динамічного моменту ЕМ з підвищеною точністю, що є актуальною науковою задачею.

Аналіз стану досліджень та публікацій. З літературних джерел [1–3] відомо, що на статор ЕМ діє момент реакції M_p , який відповідає за значенням обертальному моменту на його роторі. Основним елементом, який дав би змогу реалізувати такий спосіб визначення динамічного моменту, є вимірювальний перетворювач за реакцією статора ЕМ. Вимірювальний перетворювач, який дозволяє реалізувати зазначений спосіб визначення динамічного моменту, являє собою рухома частина, встановлену на ножкових опорах балансірно, та вимірювальний важіль, який зв'язаний з рухомою частиною ЕМ через сенсор зусилля. Момент $M_c(t)$, що утворюється в статорі ЕМ, передається через рухома частина вимірювального перетворювача та діє на сенсор зусилля і перетворюється на кут повороту $\phi_r(t)$ рухома частиною перетворювача. Рівняння, якими описуються зазначені вище величини, мають вигляд [1, 4]:

$$M_c(t) = \frac{mp}{2} L_m [I_{sb}(t)I_{ra}(t) - I_{rb}(t)I_{sa}(t)], \quad (2)$$

$$\frac{d^2j(t)}{dt^2} + 2uw \frac{dj(t)}{dt} + w^2j(t) = \frac{M_c(t)}{J_c}, \quad (3)$$

де m – кількість фаз статора ЕМ; p – кількість пар полюсів; $w = \sqrt{C/J_c}$ – власна частота вільних коливань; $u = P/(2\sqrt{J_c C})$ – ступінь заспокоєння вільних коливань; J_c – сумарний момент інерції, що надає статор ЕМ та рухома частина вимірювального перетворювача; C – жорсткість сенсора зусилля; P – коефіцієнт заспокоєння ЕМ, $I_{sa}(t)$, $I_{sb}(t)$, $I_{ra}(t)$, $I_{rb}(t)$ – струми статора та ротора ЕМ за осями a і b , відповідно; L_m – взаємодукація, що виникає між фазами статора.

Недоліком цього методу вимірювання є складність знаходження сумарного моменту інерції, наданої статором ЕМ та рухомою частиною вимірювального перетворювача. Тому мета статті – розроблення математичної моделі, яка б дозволила реалізувати удосконалений метод вимірювання динамічного моменту ЕМ та на його основі побудувати ЗВ динамічного моменту ЕМ, в якому відсутня операція цифрового диференціювання, що дасть змогу підвищити точність вимірювання динамічного моменту ЕМ та розширити його межі вимірювання.

Викладення основного матеріалу. Пропонується удосконалити метод вимірювання динамічного моменту ЕМ за допомогою вимірювання моменту інерції, що утворюється в статорі ЕМ, та моменту інерції рухомої частини вимірювального перетворювача в режимі, коли ротор ЕМ загальмовано, а обмотки статора заживлені симетричною напругою номінальної частоти, і до ротора ЕМ закріплено вимірювальний важіль, що взаємодіє із сенсором зусилля.

Суть методу полягає в тому, що в момент підключення напруги живлення на роторі ЕМ створюється обертальний момент, що описується виразом

$$M = \frac{pmR1}{2pf((R1+R2)^2 + (X1+X2)^2)} U^2, \text{ якщо } S = 1, \quad (4)$$

де S – ковзання; U – напруга живлення обмоток статора; $R1$, $R2$ – активний опір статора та ротора, відповідно; $X1$, $X2$ – реактивний опір статора та ротора, відповідно; $f = \omega/(2\pi)$ – частота мережі живлення [3, 4].

Цей обертальний момент (4) через вимірювальний важіль діє на сенсор зусилля. Оскільки сенсор зусилля є пружним елементом, то в цей момент часу виникає

перехідний процес, тривалість якого t_1 . Після завершення перехідного процесу ЕМ знеструмлюють і момент на виході перетворювача, внаслідок інерційних властивостей сенсора зусилля, зменшується від величини обертального моменту M до нуля упродовж проміжку часу t_2 . Оскільки статор ЕМ та рухома частина перетворювача здійснюють вільні коливання, що затухають, тривалість яких зумовлена величиною сумарного моменту інерції, що утворився в статорі ЕМ та рухомій частині вимірювального перетворювача J_c , а також жорсткістю сенсора C , то, вимірявши зміну обертального моменту від величини M до нуля в момент знеструмлення обмоток статора і величину часу самогальмування t_2 та знаючи коефіцієнт C , можна знайти величину сумарного моменту інерції, що утворюється в статорі ЕМ та рухомою частиною вимірювального перетворювача. Тобто, щоб знайти динамічний момент ЕМ, спочатку потрібно виміряти сумарний момент інерції J_c . Для цього треба розв'язати диференційне рівняння (3). Частинний розв'язок рівняння (3) у проміжку часу самогальмування t_2 має вигляд

$$j(t) = \frac{M_c(t)}{J_c w^2} \left\{ e^{-uw(t_2)} \left[\cos(wt_2 \sqrt{1-u^2}) + \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} \sin(wt_2 \sqrt{1-u^2}) - e^{-uw t} \left[\cos(wt \sqrt{1-u^2}) + \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} \sin(wt \sqrt{1-u^2}) \right] \right] \right\}, \quad (5)$$

якщо $t > t_1$.

Оскільки друга складова в рівнянні (5) характеризує час перехідного процесу в перетворювачі під час подання напруги живлення до обмоток статора ЕМ, то в момент часу $t > t_1$ вона є нескінченно малою величиною порівняно з першою складовою рівняння (5), тому нею можна знехтувати. Тоді рівняння (5) запишемо у вигляді

$$j(t) = \frac{M_c(t)}{J_c w^2} e^{-uw(t_2)} \left[\cos(wt_2 \sqrt{1-u^2}) + \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} \sin(wt_2 \sqrt{1-u^2}) \right]. \quad (6)$$

Якщо як сенсор зусилля застосувати тензорезистивний сенсор, то за рахунок пружних властивостей його мембрани створюється протидійний момент переміщення вимірювального важеля. В результаті цього момент, що діє на сенсор зусилля M_{C32} в момент знеструмлення обмоток статора, описується виразом

$$M_{C32}(t) = l \frac{M_c(t)}{J_c w^2 x h} e^{r^4} \left\{ \exp(-u w t_2) \left[\cos(w t_2 \sqrt{1-u^2}) + \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} \sin(w t_2 \sqrt{1-u^2}) \right] \right\}, \quad (7)$$

де h – товщина мембрани тензоперетворювача; ξ – модуль пружності мембрани; r – радіус мембрани; e – константа, що дорівнює 0,17; l – довжина вимірювального важеля.

Знаючи (вимірявши) проміжок часу самогальмування t_2 [1] від моменту знеструмлення обмоток статора ЕМ до нуля, величину сумарного моменту інерції J_c , що надає статор ЕМ та рухома частина вимірювального перетворювача, розраховують за формулою

$$J_c = \frac{t_2 P}{2 \ln \left(M \frac{r^4 e}{\Delta d x h C} l \right)}, \quad (8)$$

де Δd – нормоване значення похибки вимірювального перетворювача за реакцією статора ЕМ (зокрема похибка тензоперетворювача).

Отже, динамічний момент ЕМ відповідає моменту, що діє на сенсор зусилля за проміжок часу самогальмування, який, своєю чергою, пропорційний до зусилля та напруги на виході тензорезистивного перетворювача. Рівняння, що описує зміну напруги ΔU на виході тензорезистивного перетворювача від зміни моменту, що діє на сенсор зусилля під час самогальмування, має вигляд

$$\Delta U = \frac{U_{ж}}{4g l R S_c} M_{C32}(t), \quad (9)$$

де S_c – чутливість сенсора зусилля; g – прискорення вільного падіння ($9,82 \text{ м/с}^2$); $U_{ж}$ – напруга живлення тензорезистивного перетворювача; R – опір мостової схеми тензорезистивного перетворювача.

Вимірювальний канал моменту, що діє на сенсор зусилля, пропонується побудувати за структурною схемою, до складу якої входить вимірювальний важіль, закріплений на роторі ЕМ та з'єднаний з первинним тензорезистивним перетворювачем, масштабний перетворювач (МП) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який вбудований в мікроконтролер (МК) (рис. 1).

Рівняння перетворення АЦП описується виразом

$$N = \frac{\Delta U}{U_{он}} 2^n, \quad (10)$$

де $U_{он}$ – значення опорної напруги живлення АЦП (+ 5 В); n – розрядність АЦП ($n=10$).

Врахувавши коефіцієнт підсилення k масштабного перетворювача та рівняння (7)–(10), вихідну величину розробленого засобу вимірювання динамічного моменту опишемо виразом (рівняння перетворення)

$$N = \frac{k U_{ж} M_{C32}(t)}{4g l R S_c U_{он}} 2^n. \quad (11)$$

Статична характеристика вимірювального каналу моменту, що діє на сенсор зусилля в момент самогальмування ЕМ, який описується рівнянням (11), подана на рис. 2.

Відносна похибка квантування вимірювального каналу моменту описується виразом

$$d = \frac{4g l R S_c U_{он}}{k U_{ж} M_{C32}(t) 2^n} 100\%. \quad (12)$$

Характеристика зміни відносної похибки квантування вимірювального каналу моменту в діапазоні вимірювання від 0,1 до 30 Нм наведена на рис. 3.

Як видно з рис. 3, методична похибка вимірювального каналу моменту не перевищує 5% в діапазоні зміни моменту, що діє на сенсор зусилля в момент самогальмування від 30 до 0,1 Нм.

Отже, динамічний момент ЕМ визначається на основі отриманих значень кількості імпульсів, які підраховані мікроконтролером в бінарному коді N за проміжок часу самогальмування ЕМ, під час якого значення моменту, що діє на сенсор зусилля, змінюється від величини M , яка описується рівнянням (4), до

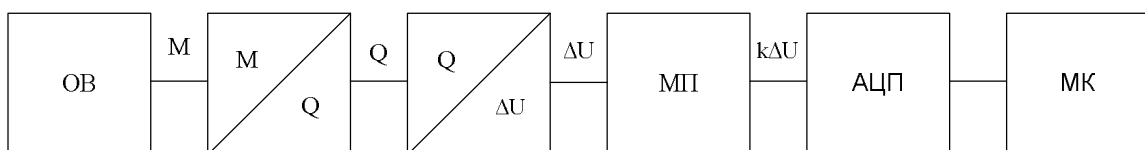


Рис. 1. Структурна схема вимірювального каналу динамічного моменту ЕМ

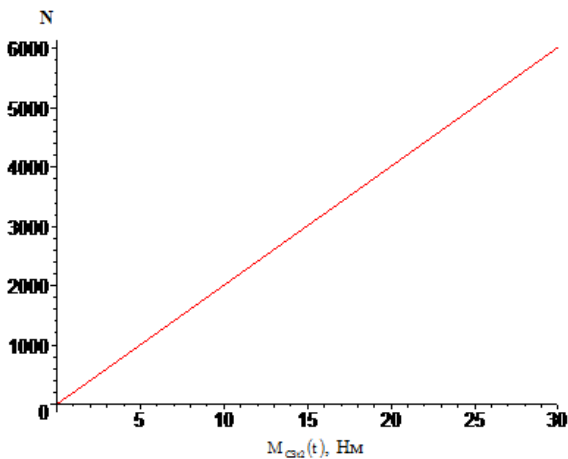


Рис. 2. Статична характеристика вимірювального каналу моменту

нуля (до повної зупинки ротора ЕМ – ротор припиняє обертатися)

$$M_d(t) = \frac{4NglRS_c U_{он}}{kU_{ж} 2^n} \quad (13)$$

Для представлення нормованих характеристик вимірювального каналу моменту, з урахуванням міжнародних підходів до оцінювання якості вимірювань, проаналізуємо складові невизначеності розробленого вимірювального каналу.

З довідникових даних відомо, що відхилення довжини вимірювального важеля, який використовують для з'єднання ротора ЕМ із сенсором зусилля, не перевищує 5 мм. Стандартна непевність, що вносить вимірювальний важіль, за припущення про рівномірний закон розподілу непевності становить $u_1 = 5/\sqrt{3} = 2,89$ мм.

Використовуючи сенсор зусилля, що має зведену похибку $g = 0,3\%$ при максимальному зусиллі $Q_n = 100$ кг, його непевність, якщо припустити рівномірність закону розподілу, можна розрахувати за формулою

$$u_2 = \frac{gQ_n}{\sqrt{3}100\%} = 0,3\% \frac{100}{1,73 \cdot 100\%} = 0,17\% \quad (14)$$

Для визначення непевності, що вносить масштабний перетворювач при допустимій зміні температури навколишнього середовища на $\Delta t = 15$ °C та дрейфі напруги операційного підсилювача $U_d = 10$ мкВ/°C, розрахуємо максимальну напругу зміщення за формулою

$$U_{зм\max} = k\Delta t U_d = 100 \cdot 15 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 15 \text{ мВ}, \quad (15)$$

де k – коефіцієнт підсилення масштабного перетворювача ($k=100$).

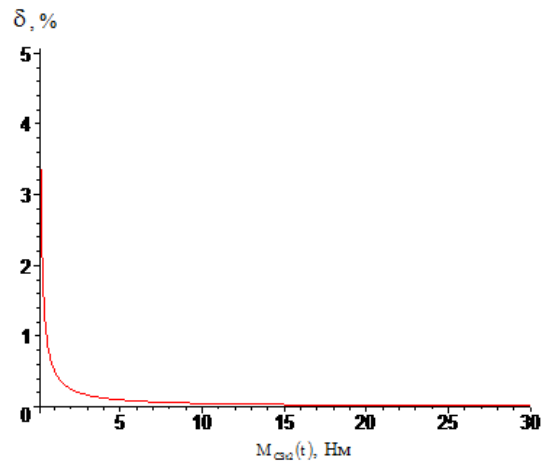


Рис. 3. Характеристика зміни відносної похибки квантування вимірювального каналу моменту

Знаючи максимальну вихідну напругу масштабного перетворювача ($\Delta U_{вих} = 5$ В), максимальну відносну похибку, що вносить масштабний перетворювач, можна розрахувати за формулою

$$d_{МП} = \frac{U_{зм\max}}{\Delta U_{вих}} 100\% = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{5} 100\% = 0,3\% \quad (16)$$

Стандартну непевність, що вносить МП за припущення про нормальний закон розподілу непевності, розраховують за формулою

$$u_3 = \frac{U_{зм\max}}{k_p} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{1,96} = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ В}. \quad (17)$$

Стандартну непевність, що вноситься АЦП за рахунок обмеженого кроку квантування, за припущення про рівномірність закону розподілу, розраховують за формулою

$$u_4 = \frac{d_{кв} \Delta U_{\max}}{100\% U_{он} \sqrt{3}} 2^n = 0,098\% \frac{5 \cdot 2^{10}}{100\% \cdot 1,73 \cdot 5} = 0,58, \quad (18)$$

де $\Delta U_{\max} = 5$ В; $U_{он} = 5$ В; $d_{кв} = \frac{100\%}{2^n}$.

Відповідно до довідникових даних на мікроконтролер з вбудованим АЦП він має зону нечутливості, яка в діапазоні вимірювання АЦП становить $\Delta_s = 5$ мВ при роздільній здатності в 10 двійкових розрядів. У зв'язку з існуванням такого обмеження виникає непевність, яку можна розрахувати за формулою

$$u_5 = \frac{\Delta_s}{\sqrt{12}} = 1,45 \text{ мВ}. \quad (19)$$

Оскільки значення розрахованих стандартних непевностей, що вносять елементи вимірювального каналу моменту, мають різну розмірність, підсумувати їх не можна. Для розрахунку сумарної

непевності розробленого вимірювального каналу моменту перейдемо до безрозмірних величин та оцінимо сумарну відносну непевність за формулою

$$\delta\% = \sqrt{\left(\frac{u_1}{I}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{Q_n}\right)^2 + \left(\frac{u_3}{\Delta U_{\text{вих}}}\right)^2 + \left(\frac{u_4}{N_{\text{max}}}\right)^2 + \left(\frac{u_5}{\Delta U_{\text{max}}}\right)^2} = (20) \\ = 4,32 \cdot 10^{-3} = 0,43 \%$$

Отже, сумарна відносна непевність вимірювального каналу моменту не перевищує 0,43 %.

Висновки. Запропонований засіб вимірювання динамічного моменту ЕМ будується на основі удосконалення методу визначення динамічного моменту шляхом вимірювання моменту інерції, що утворюється в статорі ЕМ та моменту інерції рухомої частини вимірювального перетворювача в режимі, коли ротор ЕМ загальмовано, а обмотки статора заживлені симетричною напругою номінальної частоти і до ротора ЕМ прикріплено вимірювальний важіль, що взаємодіє із сенсором зусилля. Момент, що діє на сенсор зусилля в режимі самогальмування, відповідає динамічному моменту ЕМ, який, своєю чергою, пропорційний до напруги на виході тензорезистивного вимірювального перетворювача. На основі отриманого

рівняння перетворення проаналізовано відносну методичну похибку (непевність) вимірювання динамічного моменту, яка не перевищує 3,5 % в діапазоні від 0 до 30 Нм. Також здійснено оцінювання непевностей, що вносять складові елементи засобу вимірювання динамічного моменту. В результаті оцінювання встановлено, що відносна сумарна інструментальна непевність ЗВ динамічного моменту не перевищує 0,43 %.

1. Башарин А.В. Управление электроприводами : [учебное пособие для вузов] / А.В. Банарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 329 с. 2. Потапов Л.А. Измерение вращающихся моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Л.А. Потапов, Ф.М. Юферов. – М.: Энергия, 1976. – 121 с. 3. Кухарчук В.В. Элементы теории контроля динамических параметров электрических машин : [монография] / В.В. Кухарчук. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 1998. – 125 с. 4. Кучерук В. Ю. Развитие частотных методов определения моментных характеристик электрических машин / В. Ю. Кучерук, О. М. Наталич, О. М. Васілевський // Вісник інженерної академії України. – 2007. – № 3–4. – С. 149–154.

УДК 681.121.89.082.4

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ

© Матіко Федір, Роман Віталій, Федоришин Роман, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Викладено результати порівняльного аналізу методів розрахунку швидкості звуку в природному газі за їх сферою застосування, структурою алгоритму та методичною похибкою. Виконано аналіз можливості впровадження цих методів у системах вимірювання витрати та об'єму природного газу.

Изложены результаты сравнительного анализа методов расчета скорости звука в природном газе по их области применения, структуре алгоритма и методической погрешности. Выполнен анализ возможности внедрения этих методов в системах измерения расхода и объема природного газа.

The paper presents the results of a comparative analysis of methods for calculating the speed of sound in natural gas according to the field of application, the structure of the algorithm and the methodical error. The analysis of possible implementation of these methods in systems of natural gas flowrate and volume measurement is carried out.

Постановка проблеми. У зв'язку з постійним зростанням цін на природний газ все жорсткішими стають вимоги до точності та досконалості засобів його обліку. Підвищення якості обліку досягають

вдосконаленням засобів обліку, побудованих на основі традиційних методів вимірювання (змінного перепаду, тахометричних лічильників), а також застосуванням методів, що розвиваються та впроваджуються у