

Олешко Т.І., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-4858-0337,

Квашук Д.М., к.е.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881,

Нестюк М.М.,
orcid.org/0000-0002-6359-4323

КОНТРОЛЬ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДУКТИВНИХ ДАТЧИКІВ

Національний авіаційний університет

tamara.oleshko@npp.nau.edu.ua,

dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua,

maryana.nestyuk@npp.nau.edu.ua

Вступ

Основну частину споживання електричної енергії на промислових підприємствах займають електричні двигуни. Тому оптимізація їх роботи в частині енергоефективності та точності управління ними відіграє ключову роль в системі забезпечення енергетичної безпеки України зокрема та економічної безпеки нашої країни в цілому. На перший погляд така оптимізація залежить від ефективності автоматизованих систем управління, але вирішальну роль в цьому відіграють саме первинні перетворювачі та алгоритми їх корекції, точність та швидкодія яких лежить в основі алгоритмів автоматизованого управління електродвигунами. Відповідна проблема стосується не лише енергоефективності, але й якості виготовленої продукції, яка вимагає точної обробки. Тому, розробка нових методів вимірювання оберտальних моментів та моделей, які описують характеристики вимірювальних засобів, нормативно-технічних положень які відповідають міжнародним нормам, методів оцінювання міжперевірних інтервалів, потребує вдосконалення.

Аналіз літератури

Вимірювання оберտальних моментів електродвигунів потребує точності та своєчасної корекції похибки, яка вникає внаслідок впливу різних факторів на

фізичні властивості вимірювальних засобів. Враховуючи, що оберտальний момент ділиться на два види: оберտальний і реактивний та розподіляється на динамічний та статичний, його можна виміряти опосередковано, або безпосередньо. Якщо відомі ККД двигуна та швидкість валу, за допомогою вимірювача потужності, можна обчислити силу оберտального моменту. Таке вимірювання є не прямим. Більш точним методом є пряме вимірювання моменту сили, що крутить вал, за допомогою датчиків оберտального моменту [1].

Використовуючи, наприклад, тензометричний метод вимірювання (рис.1), де сенсор знаходиться безпосередньо на валу, та змінює свій опір в залежності від деформації торсіонного валу, можна досягти високої точності, проте істотним недоліком тензодатчиків є чутливість до електромагнітних перешкод та вимогливість до встановлення. Будь-які відхилення від норм можуть стати причиною появи похибки, яку за допомогою звичайного калібрування усунути не вдасться. Також, температурні властивості окремих матеріалів можуть істотно впливати на опір, що буде спотворювати дані.

На відміну від тензометричних сенсорів, індуктивні мають меншу вразливість до зазначених перешкод (рис.2).

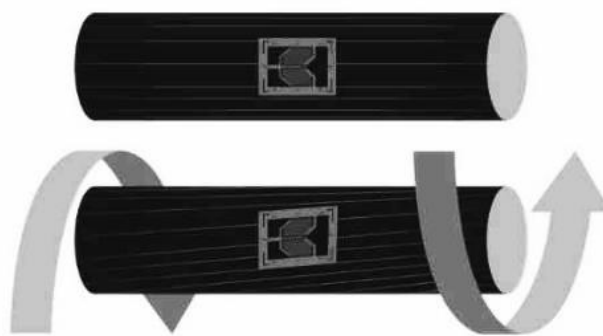


Рис. 1. Принцип роботи тензометричного сенсору для вимірювання обертового моменту

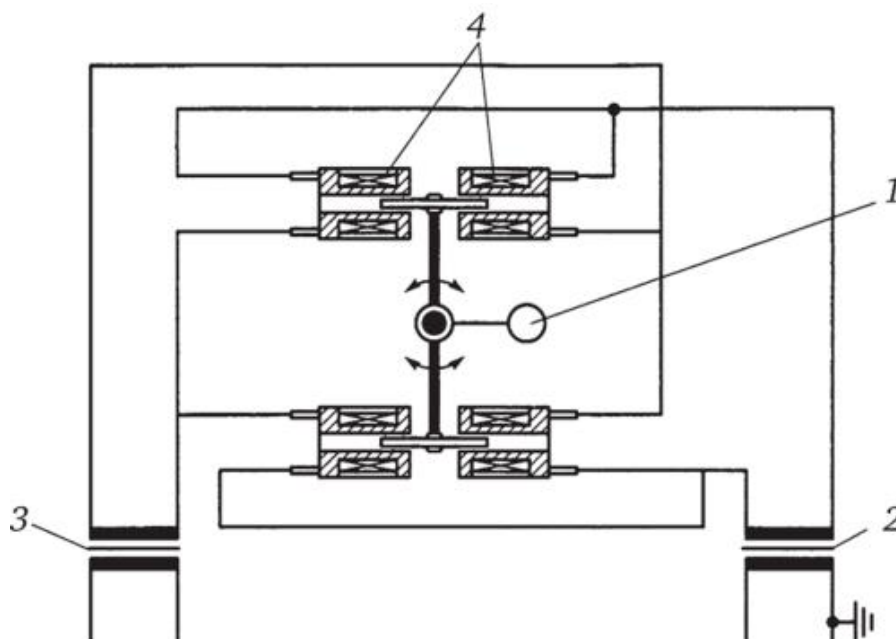


Рис. 2. Схема роботи індуктивного перетворювача обертового моменту, [2]

де: 1 – торсіонний вал; 2 – вихідний трансформатор для безконтактного знімання сигналу; 3 – вхідний трансформатор для безконтактної подачі живлення; 4 – диференціальна індуктивна вимірювальна система.

Тому, сьогодні для збільшення економічного ефекту від використання систем автоматики та управління електродвигунами потрібні сенсори, на які мало розповсюджуються електромагнітні хвилі, прості в обслуговуванні та дешеві у виробництві. Такими сенсорами можна вважати індуктивні сенсори, які знайшли своє втілення в обертових трансформаторах (револьверах) та сельсинах. Проте, резольвери вже практично повністю замінені сучаснішими індуктивними інкодерами. Технологія вимірювання за допомогою інкодерів заснована на тих самих принципах індукції, що застосовуються і в резольверах, але

при цьому інкодери містять друковані плати замість масивних та дорогих обмоток трансформаторів [3]. Це дозволяє суттєво скорочувати обсяг, вагу та вартість датчиків, і одночасно збільшувати можливості вимірювань. На базі інкодерів забезпечений простий та зручний електричний інтерфейс – постійна напруга та послідовна шина даних. Оскільки інкодери базуються на тих же фізичних принципах, що й резольвери – вони забезпечують той самий набір вимірювальних можливостей – високу точність та надійність вимірів навіть у жорстких умовах довкілля. Температурні коефіцієнти інкодера не великі, у

порівнянні з тензометричними сенсорами. А будь-які динамічні спотворення, що викликаються обертанням валу на великій швидкості, можуть бути нівельовані за допомогою тактового сигналу, що забезпечує синхронність зчитування даних.

При використанні інкодерів не існує ризику пошкодження обладнання у випадках надмірного або імпульсного застосування оберտального моменту. Важливим аспектом у застосуванні таких сенсорів є те, що з їх використанням можна проводити два види вимірювань: оберտального моменту та кута обертання одночасно. Таким чином, сучасні інкодери відроджують застосування принципів індукції для виконання кутових вимірювань, і одночасно з цим, повертають зручний, надійний та ефективний спосіб контролю оберտального моменту та кута обертання.

Сьогодні широко застосовуються датчики лінійних переміщень в багатьох сферах, що обумовлюється можливістю їх експлуатації у жорстких умовах [4]. Разом з тим, основною складністю при розробці вимірювальних систем на базі індуктивних сенсорів є забезпечення стабільності метрологічних характеристик та стійкості до зовнішніх впливів. [5]. Тому, існує потреба в удосконаленні автоматизованих систем контролю робочих характеристик електродвигунів. Одним із таких варіантів вирішення цієї проблеми є покращення метрологічних характеристик вимірювальних каналів. Це можна реалізувати шляхом оптимізації аналогових інтерфейсів для дистанційних вимірювань, створення нових багатофункціональних вимірювальних перетворювачів, які забезпечують більш ефективно придушення завад загального та нормального виду, а також забезпечивши додаткові можливості підсилення корисного сигналу. Є потреба у вдосконаленні алгоритмів корекції похибок вимірювального каналу за допомогою інтелектуальних засобів, в умовах нелінійності каналу та міжканальних зв'язків.

Модель перетворення моменту сили у електричний сигнал із застосуванням

індуктивних методів вимірювання представлено в роботах [6,7]:

$$e = \frac{j\omega\Phi_m W_u}{2\pi R_{\text{ш}} \sqrt{M_e}} \ln \cdot \frac{\left[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)} \sin\left(\frac{\pi}{4} - 2\varphi\right) \right]^2 + 4\lambda}{\left[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)} \sin\left(\frac{\pi}{4} + 2\varphi\right) \right]^2 + 4\lambda} \cdot e^{i\alpha x}, \quad (1)$$

де: j – уявна одиниця; γ – електрична провідність матеріалу вала; $\lambda = \frac{\mu_y}{\mu_x}$, μ_y , μ_x – значення магнітних проникностей матеріалу вала вздовж дії головних нормальних напруг; $M_e = \sqrt{\mu_y \mu_x}$ – еквівалентне значення магнітної проникності; φ – кут між координатними осями X_l , Y_l , пов'язаними з магнітопроводом перетворювача і головними осями анізотропії X , Y , що збігаються з напрямком головних нормальних напруг; Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку, що входить до контрольованої частини валу через полюси обмотки збудження.

Наведена залежність змінюється за періодичним законом функції кута та має екстремальні значення при $\varphi = \pi/4 \pm n\pi/2$, де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Експериментальні дослідження, де був використаний вираз (1), із застосуванням індуктивних сенсорів, показали, що взаємний вплив оберտального моменту та опорних конструкцій вимірювального приладу, що використовувався в експерименті, був відсутній [6]. Разом з тим, точність роботи індуктивних сенсорів оберտального моменту залежить від стабільності напруги, що зумовлюється якістю електричного живлення.

Основна частина

Запропонована структурна схема системи для вимірювання обертальних моментів з використанням індуктивних сенсорів, представлена рис. 3. Де, джерелом механічної енергії є двигун, вал якого через пружний елемент з'єднаний із валом навантаження. Під дією моменту сили, який крутить вал та моменту опору навантаження, вал піддається пружної

деформації обертання, забезпечуючи відносне кутове зміщення валів на певний

кут, що залежить від пружних властивостей самого валу.

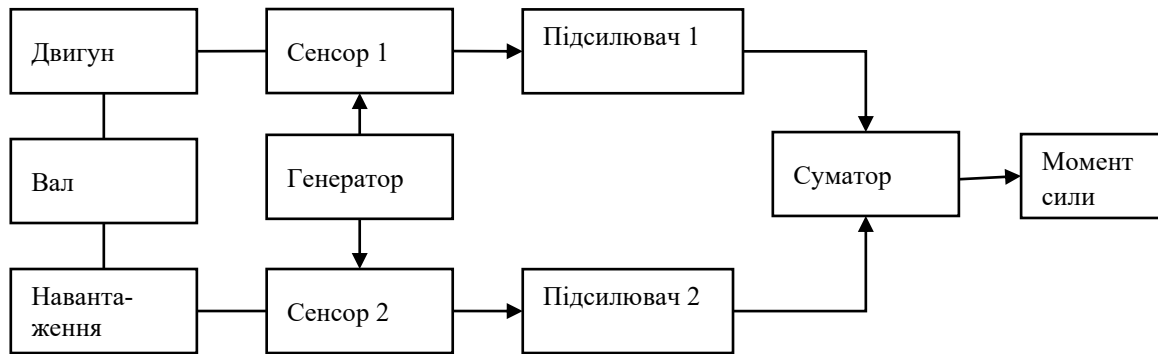


Рис. 3. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи обертальних моментів

Структура індуктивного сенсору, який буде розміщений на валу, представлено у вигляді лінійного трансформатора, який змінює індуктивність в залежності від переміщення валу створюючи лінійну залежність між самим переміщенням та обертальним моментом. Пружним елементом, який характеризує ступінь переміщення виступає вал електродвигуна. За

рахунок скручування валу відбувається переміщення стержня лінійного трансформатора, яке є лінійно залежним до обертального моменту (рис.4).

Разом з тим, перетворювач має бути дуже чутливим до зміни напруги, забезпечуючи при цьому лінійність перетворення сигналу. Це можна реалізувати з використанням операційних підсилювачів (рис.5).

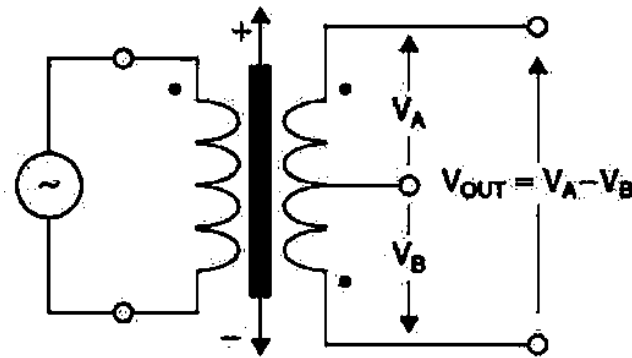


Рис. 4. Принцип дії індуктивного перетворювача на основі лінійного трансформатора

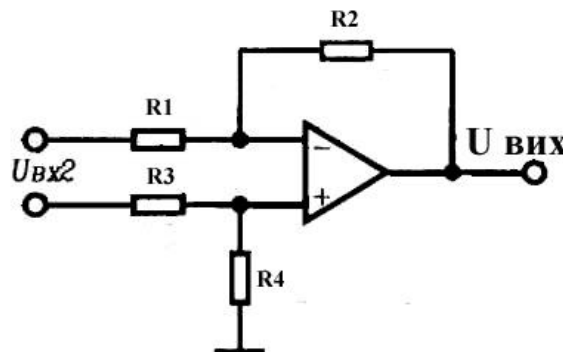


Рис. 5. Електрична схема підсилення вимірювального

Опори $R3$ та $R4$ мають вплив на сигнал, як дільник напруги для входу не

інвертуючого операційного підсилювача. Завдяки зворотному зв'язку через опори $R3$

та $R4$ та внутрішньому коефіцієнту підсилення напруга на інвертуючому вході підсилювача буде рівною напрузі на не інвертуючому вході. В даному випадку, відношення $R2/R1$ визначає коефіцієнт передачі підсилювача. Коли $R1/R2 = R3/R4$, підсилення диференціального сигналу набагато більше підсилення синфазного сигналу. Таким чином, коефіцієнт послаблення синфазної напруги буде максимальним. Диференціальний коефіцієнт підсилення можна виразити наступним виразом:

$$DK_p = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{k_p}\right)} \quad (2)$$

де: k_p – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

Розузгодження опорів, для коефіцієнту підсилення буде рівним:

$$K_{CC1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 - R_4)}; \quad (3)$$

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, буде дорівнювати:

$$K_{CC2} = \frac{R_2}{R_1 \cdot K_{\text{осцОУ}}}; \quad (4)$$

де: $K_{\text{осцОУ}}$ – коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу операційного підсилювача.

Вихідна напруга зсуву (при $R_1 + R_3$ та $R_1 + R_4$) буде мати такий вираз:

$$U_{\text{вих}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{\text{вх}} + \Delta I_{\text{вх}} R_2. \quad (5)$$

де: $U_{\text{вх}}$ – приведена до входу напруга зсуву операційного підсилювача; $\Delta I_{\text{вх}}$ – різниця вхідних струмів зсуву операційного підсилювача (по інвертуючому та не інвертуючому входах).

Моделювання вимірювального каналу з використанням виразу (5), при поступальному збільшенні навантаження на вал (рис.6) дозволило отримати наступну перехідну характеристику (рис.7).

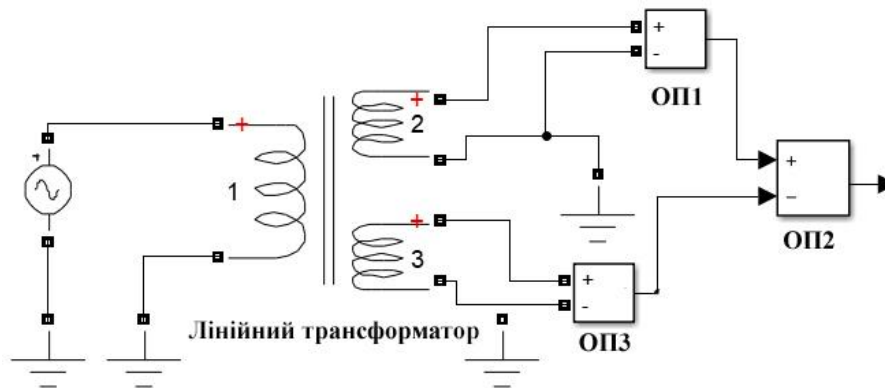


Рис. 6. Моделювання вимірювального каналу індуктивного перетворювача, оснований на операційних підсилювачах

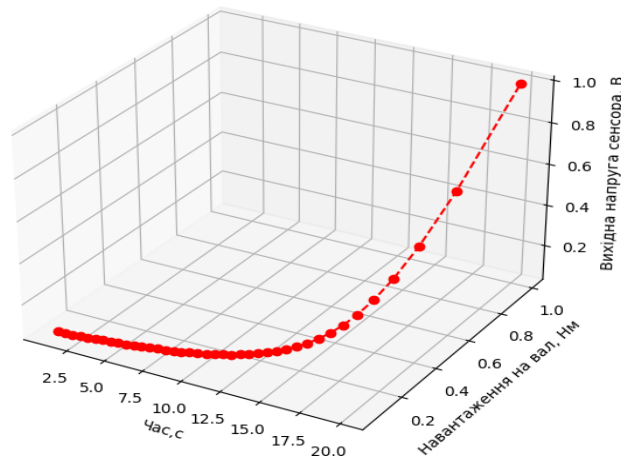


Рис. 7. Часові характеристики роботи індуктивного перетворювача обертального моменту

Висновок

Модель вимірювального перетворювача (рис.6) з використанням формули (5), перехідні характеристики якої показали лінійну залежність між обертальним моментом валу електродвигуна та вихідною напругою перетворювача при поступальних навантаженнях на вал (рис.7), може бути використана при побудові приладів для вимірювання обертальних моментів на базі індуктивних сенсорів.

Вимірювання обертального моменту шляхом лінійного перетворення моменту сили, яка діє на феромагнітний стержень лінійного трансформатора у вихідну напругу має простоту реалізації, економічну обґрунтованість та захищеність від електромагнітних завад.

Література

1. Кацман М.М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений. 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. – 463 с.

2. Профос П. ред. Измерения в промышленности. Справочник. Кн. 1.

Теоретические основы. – М: Metallurgia, 1990. – 462 с.

3. Раянов Т.А. Обзор новых типов датчиков крутящего момента / Т.А. Раянов // Транспортные системы и технологии. – 2020. – № 1. – С. 5-14.

4. David S. Nyce. Linear position sensors: theory and application. – WileyInterscience, 1st edition, 2007. – 184 p.

5. Лачин В.И., Плотников Д.А. Реализация функций самодиагностики интеллектуальных датчиков вибрации // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – № 3. – Том 128. – 2012. – С. 241-251.

6. Жадобин Н.Е. Магнитоупругие преобразователи в судовой автоматике. – Л.: Судостроение, 1985. – 36 с.

7. Жадобин Н.Е. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики: учебное пособие / Н.Е. Жадобин, А.П. Крылов, В.А. Малышев. [2-е изд., перераб. и доп.]. – СПб.: Элмор, 1998. – 440 с.

Олешко Т.І., Квашук Д.М., Нестюк М.М.

КОНТРОЛЬ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДУКТИВНИХ ДАТЧИКІВ

У статті представлено можливості дистанційного вимірювання робочих характеристик електродвигунів з використанням індуктивних датчиків переміщень. Висвітлено можливості обробки сигналів на основі операційних підсилювачів. В результаті аналізу можливостей індуктивних датчиків переміщень та схем підсилення на інвертуючих операційних підсилювачах, було запропоновано інтерфейс, який можна застосовувати для дистанційних вимірювань обертальних моментів електродвигунів.

Ключові слова: обертальний момент, вимірювальні прилади, індуктивний сенсор, вимірювання, напруга.

Oleshko T.I., Kvashuk D.M., Nestiuk M.M.

CONTROL OF THE PERFORMANCE OF ELECTRIC MOTORS USING INDUCTIVE SENSORS

The article presents the possibilities of remote measurement of operating parameters of electric motors using inductive motion sensors. Possibilities of signal processing on the basis of operational amplifiers are highlighted. As a result of the analysis of the possibilities of inductive displacement sensors and gain circuits on inverting operational amplifiers, an interface was proposed that can be used for remote measurements of motor torques.

Keywords: torque, measuring instruments, inductive sensor, measurements, voltage.