

БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОВОГО ЗМІЩЕННЯ РОТОРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

Запропоновано новий безконтактний метод вимірювання миттєвого осьового зміщення ротора електричної машини у режимі реального часу, який передбачає проміжне перетворення осьового зміщення ротора у фазовий зсув високочастотного електромагнітного сигналу, та оригінальний алгоритм вимірювання різниці фаз високочастотних електромагнітних сигналів. Розроблено структурну схему засобу вимірювання, що реалізує запропонований метод.

Предложен новый бесконтактный метод измерения мгновенного осевого смещения ротора электрической машины в режиме реального времени, предусматривающий промежуточное преобразование осевого смещения ротора в фазовый сдвиг высокочастотного электромагнитного сигнала, и оригинальный алгоритм измерения разности фаз высокочастотных электромагнитных сигналов. Разработана структурная схема средства измерения, реализующего предложенный метод.

In an article suggested a new noncontact method for measurement of instantaneous axial displacement of electric machine's rotor in real-time mode. This method provides an intermediate transformation of the axial displacement in the phase shift of the high-frequency electromagnetic signal together with is an algorithm for stabilizing the informative signal, followed by an original algorithm for measuring the difference between the phases of high-frequency signals. The original algorithm for measuring the difference between the phases of high-frequency signals has an increased accuracy of measurement and acceptable speed, which enables the use of noncontact method for measurement of instantaneous axial displacement of electric machine's rotor during the construction of systems for controlling the technical condition of electric machines. Developed is the structural pattern of measurement procedure to implement the new noncontact method for measurement of instantaneous axial displacement.

Ключові слова: вимірювання, осьове зміщення, електрична машина, засіб вимірювання, інформативна хвиля, різниця фаз.

Ключевые слова: измерение, осевое смещение, электрическая машина, средство измерения, информационная волна, разница фаз.

Key words: measurement, axial displacement, electric machine, procedure for measurement, informative wave, phase difference.

ВСТУП

Одним з найбільш інформативних та поширених видів динамічного діагностування силових обертових машин є вібродіагностування [1, 2], реалізація якого, у свою чергу, потребує наявності високоточних вимірювальних перетворювачів, здатних працювати у режимі реального часу роботи об'єкта діагностування. Одним із таких параметрів є вібраційна характеристика осьового зміщення ротора електричної машини, від точності та швидкодії вимірювання якої значною мірою залежать метрологічні характеристики системи діагностування в цілому.

При цьому, як показано у роботах [3, 4], одним із найбільш інформативних параметрів вібросигналу є саме миттєве віброзміщення. Тож розробка безконтактних високоточних методів та засобів вимірювання миттєвого осьового зміщення ротора електричної машини у режимі реального часу технологічного процесу є актуальною науково-прикладною задачею, вирішення якої дозволить підвищити ефективність роботи систем діагностування силових електричних машин.

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Широкого поширення при вимірюванні миттєвого осьового зміщення ротора електричної машини набули вихрострумові та ємнісні первинні вимірювальні перетворювачі, які дають змогу здійснити вимірювання зазначеного параметру при відсутності безпосереднього контакту з

ротором [5]. Про те, вони дозволяють здійснювати вимірювання лише на відносно малих (порядку кількох міліметрів) відстанях від об'єкта вимірювання (ОВ) [5], що обумовлює необхідність жорсткого закріплення сенсора на конструктивних елементах у безпосередній близькості до рухомих частин електричної машини (джерела виникнення вібрації). Це неминуче призводить до виникнення значної похибки, оскільки при цьому не враховуються власні віброзміщення сенсора відносно точки відліку системи координат [2]. Ефективним способом зменшення цієї похибки може бути віддалення точки кріплення сенсора від джерела виникнення вібрації, оскільки амплітуда коливань є обернено пропорційною квадрату відстані від джерела збудження [6]. Про те, такий підхід не може бути реалізованим при використанні вихрострумів та ємнісних сенсорів, що обумовлює обмеженість їх застосування при вирішенні сформульованої технічної задачі.

Перспективною групою методів вимірювання, з точки зору первинного вимірювального перетворення осьового віброзміщення, є оптичні методи [7]. Про те, не дивлячись на теоретичну можливість безконтактного вимірювання зміщення ротора на доволі великих відстанях, використання оптичних сенсорів також має ряд суттєвих обмежень, пов'язаних з наявністю неінформативних впливів на оптичний сигнал з боку як навколишнього середовища, так і самого ОВ [8]. Тож є очевидним, що розробка нових методів вимірювання осьового зміщення, які забезпечували б можливість вимірювання останнього на достатніх відстанях між сенсором та ОВ, а також були б малочутливими до впливу неінформативних збурюючих факторів є актуальною задачею.

Виходячи з фізичних властивостей повітря [9], що, очевидно, знаходиться у просторі між випромінювачем, ОВ та приймачем, його коефіцієнти відносної діелектричної та магнітної проникності є мало змінними в типових умовах експлуатації силового електричного обладнання. Тож фазова швидкість інформативного сигналу у такій системі буде мати доволі високу стабільність. Це обумовлює доцільність використання у якості проміжного інформативного параметру саме фазового зміщення інформативної хвилі.

Суттєвими проблемами, що виникатимуть при побудові засобу вимірювання, який реалізуватиме проміжне вимірювальне перетворення осьового зміщення ротора у зміщення фази інформативного сигналу є наявність значної фазоамплітудної похибки, обумовленої нестабільністю амплітуди сигналу на вході приймача та невисока чутливість засобу, обумовлена відносно малими допустимими осьовими зміщеннями ротора електричної машини (порядку сотень мікрометрів, що відповідає довжині електромагнітної хвилі з частотою порядку сотень гігагерц) [10, 11]. Тож, безконтактний метод вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини повинен включати як алгоритм компенсування фазоамплітудної похибки, так і новий алгоритм вимірювання різниці фаз. Алгоритм реалізації безконтактного методу вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини матиме вигляд, наведений на блок-схемі (рис. 1).

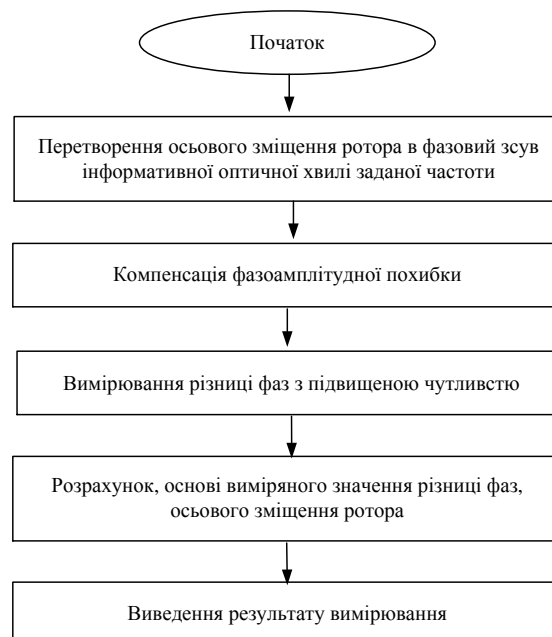


Рис. 1. Блок-схема реалізації безконтактного методу вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини

Проблема компенсації фазоамплітудної похибки може бути вирішена шляхом забезпечення змінного коефіцієнту підсилення інформативного сигналу на виході приймача, що дозволить забезпечити його стабілізацію не залежно від зовнішніх збурюючих факторів. Враховуючи те, що причиною виникнення фазоамплітудної похибки є різниця амплітуд між інформативним та опорним каналами, а також те, що при певних умовах зовнішні збурення можуть викликати зміну амплітуди опорного сигналу (хоча і в меншому діапазоні значень), у якості критерію стабілізації доцільно використати амплітуду опорного сигналу. При такому підході на виході приймача доцільно розмістити лінійний підсилювач з керованим коефіцієнтом підсилення, значення якого корегуватиметься у режимі реального часу за рахунок сигналу зворотного зв'язку, що являтиме собою різницю між амплітудою інформативного та опорного сигналів.

З метою зменшення потужності випромінюваного сигналу припустимим буде нанесення на попередньо оброблену поверхню лобового виступу валу ротора, осьове зміщення якого в наслідок високої жорсткості матеріалу буде відповідати осьовому зміщенню усього ротора електричної машини, спеціального покриття, яке поліпшуватиме відбиваючі властивості поверхні опромінювання та не призводитиме до зростання децентрування валу ротора через малу додаткову масу самого покриття.

Проблема низької чутливості, що обмежує застосування фазових методів для реалізації задачі вимірювання осьового зміщення, може бути розв'язана за рахунок застосування спеціального алгоритму вимірювання різниці фаз, який, на відмінно від класичного підходу, не передбачатиме проміжне перетворення різниці фаз у часовий інтервал. Це дозволить використати у якості інформативного сигналу сигнал підвищеної частоти, не викликаючи при цьому зменшення точності каналу різниці фаз та забезпечуючи зміщення частоти інформативної хвилі у область, де інтенсивність власного випромінювання ОБ є доволі слабкою.

Враховуючи бажані характеристики каналу різниці фаз, вимірювання останньої можна здійснювати шляхом отримання проміжних векторних величин, пов'язаних з інформативним та опорним сигналами. При використанні синусоїдальних хвиль, опорний та інформативний сигнали описуватимуться гармонічною функцією і на виході схеми, представленій на рис. 2, матимуть однакову амплітуду. Пов'язавши систему відліку часу з опорним сигналом, математично можна представити їх у наступному вигляді:

$$U_1(t) = U_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

$$U_2(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi).$$

У цьому випадку амплітуда їх векторної суми буде рівною:

$$U_{sum} = 2U_m \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (2)$$

а амплітуда векторної різниці інформативного та опорного сигналів

$$U_{dif} = 2U_m \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (3)$$

Функціональні залежності (2) та (3), забезпечують перетворення різниці у пов'язаний з нею рівень постійної напруги, та враховуючи особливості синусоїди, при безпосередньому вимірюванні сигналів U_{sum} та U_{dif} з подальшим розрахунком φ матиме місце зменшення чутливості засобу вимірювання при зростанні амплітуди осьового зміщення, що є технічно невиправданим. Тож у якості проміжного сигналу доцільніше використати іншу, залежну від різниці фаз φ величину.

Поділивши (3) на (2), отримаємо:

$$\frac{U_{dif}}{U_{sum}} = \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (4)$$

На відмінно від функції \cos та \sin , функція tg характеризується зростанням чутливості при наближенні до граничних значень діапазону зміни аргумента, що дозволить підвищити точність вимірювання при зростанні осьового зміщення, а, отже, забезпечить, при потребі, підвищену точність вимірювання осьового зміщення при його наближенні до гранично допустимого

значення. Враховуючи (4), рівняння перетворення каналу різниці фаз при використанні запропонованого підходу матиме вигляд:

$$\varphi = 2\arctg\left(\frac{U_{dif}}{U_{sum}}\right). \quad (5)$$

На основі викладеного можна сформулювати алгоритм вимірювання різниці фаз, що не передбачатиме проміжного перетворення останньої у часовий інтервал. Алгоритм реалізації запропонованого методу наведений на рис. 2 у вигляді блок-схеми.



Рис. 2. Блок-схема реалізації запропонованого методу вимірювання різниці фаз

Структурна схема засобу вимірювання, що реалізує безконтактний метод вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини може мати вигляд, наведений на рис. 3

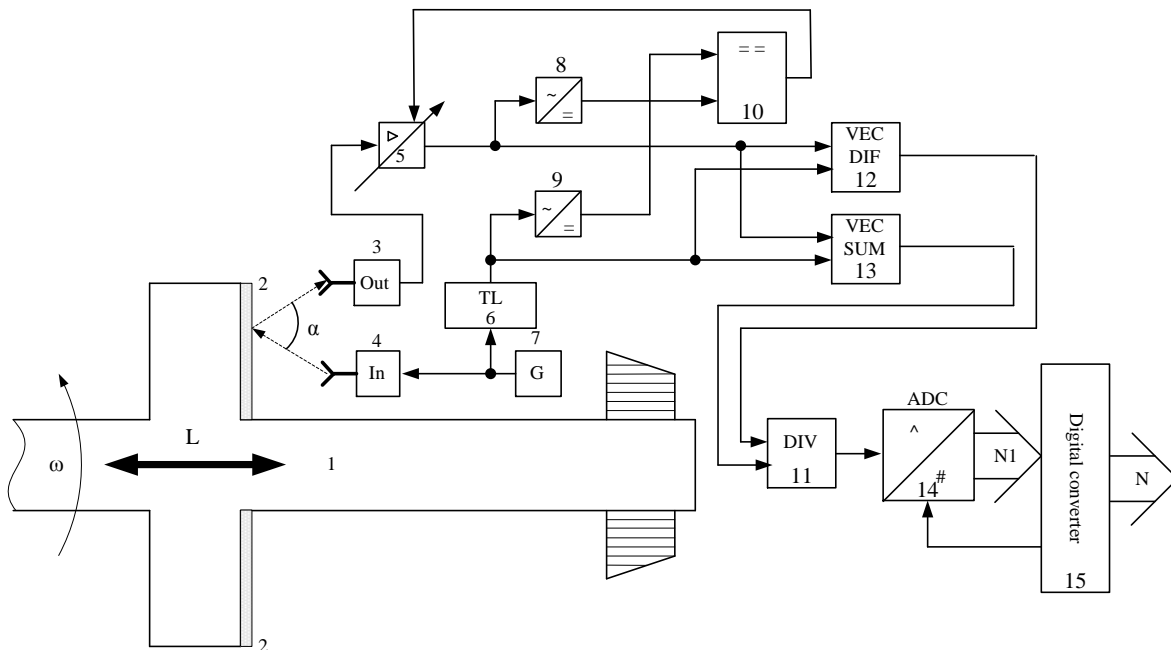


Рис.3. Структурна схема засобу вимірювання, що реалізує фазовий безконтактний метод осьового зміщення ротора електричних машин

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано алгоритм вимірювання різниці фаз гармонічних сигналів, який за рахунок відсутності проміжного перетворення різниці фаз у часовий інтервал характеризується підвищеною чутливістю при вимірюванні різниці фаз високочастотних сигналів.

2. Запропоновано новий безконтактний методу вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини, який за рахунок використання оптичної інформативної хвилі та використання нового методу вимірювання різниці фаз гармонічних сигналів, що не передбачає проміжного перетворення останньої у часовий інтервал, дозволяє забезпечити високу точність та чутливість вимірювання.

3. Розроблено структурну схему нового засобу вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини, яка, реалізуючи фазовий безконтактний метод вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини, характеризується безконтактністю вимірювання при забезпеченні підвищеної точності вимірювань за рахунок зменшення методичної похибки, обумовленої власною вібрацією сенсора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tandon N. A review of vibration and acoustic measurement methods of the detection of defects in rolling element bearing / N. Tandon, A. Choudhury // Tribology international – 1999. – № 32. – P. 469+480.

2. Кухарчук В. В. Моніторинг, діагностування, та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, В. Г. Мадьяров та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 168 с.

3. Кухарчук В. В. Метод аналітичного розрахунку віброшвидкості у режимі розгону гідроагрегату / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк, Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – № 2. – С. 66-70.

4. New non-system physical quantities for vibration monitoring of transient processes at hydropower facilities, integral vibratory accelerations / [Y. G. Vedmitskyi, V. V Kukharchuk, V. F. Hraniak and other] // Przegląd elektrotechniczny – 2017. – № 3. – P. 69-72.

5. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: монографія / В. П. Бабак, В. С. Берегун, З. А. Бурова та ін; За редакцією чл. – кор. НАН України В. П. Бабак – Київ: Ін-тут технічної теплофізики НАН України, 2016 – 298 с.

6. Chong H. Su, W. Xi, K. T. Vibration signal analysis for electrical fault detection of induction machine using neural networks / H. Su, W. Xi, K. T. Chong / Information Technology Convergence, 2007. – International Symposium on ISITC, 2007 – P. 188-192.

7. Uren J. Surveying for Engineers / J. Uren, W.F. Price – Palgrave Macmillan, 2010 – 816 p.

8. Оптические измерения : учебное пособие / А. Н. Андреев, Е. В. Гаврилов, Г. Г. Ишанин и др. – Москва : Университетская книга; Логос, 2012. – 416 с.

9. Fröhlich H. Theory of dielectrics: dielectric constant and dielectric loss: monographs / H. Fröhlich – Oxford University Press, 1987. – 200 p.

10. Rao S. S. Vibration of continuous systems / S. S. Rao – USA : JON WILEY & SONS, INC, 2007 – 720 p.

11. Mechefske W. Li, C. K. Detection of induction motor faults: a comparison of stator current, vibration and acoustic methods / W. Li, C. K. Mechefske / Journaln of Vibration and Control – 2006. – № 2. – P. 165-188.