

**Граняк В. Ф.**

к. т. н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Hraniak V.****Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 681.586****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-1-13****МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
НАКЛАДНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО
ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРВИННОГО
ВИМІРЮВАЛЬНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА АБСОЛЮТНОГО
ПЕРЕМІЩЕННЯ**

На сьогоднішній день навіть у розвинених країнах Європи понад 50 % силового енергогенеруючого обладнання гідроелектростанцій відпрацювали свій проектний строк експлуатації. У країнах СНД відсоток такого обладнання є іще вищим. Повна заміна такого обладнання потребує великого обсягу інвестицій, тоді як значна частина останнього має задовільний технічний стан для подальшого продовження терміну експлуатації. Про те, при збільшенні часу напрацювання будь-якого електрообладнання неминуче зростає ймовірність його виходу з ладу, що може призвести як до значних матеріальних збитків, так і до суттєвої небезпеки для життя та здоров'я персоналу електростанції. Тож, враховуючи сказане усе більшої актуальності набувають системи контролю та раннього діагностування, на які покладається функція захисту як гідротурбін так і допоміжного силового обладнання. Одним з найбільш перспективних методів технічного контролю та діагностування гідроагрегатів є саме аналіз їх вібро-акустичних характеристик. У тому числі і осьової складової. Про те значною технічною проблемою, що виникає під час побудови таких систем є обмеженість застосування відомих сенсорів абсолютного віброзміщення у наслідок відсутності їх високоточних математичних моделей.

У роботі розроблено математичну модель накладного параметричного вихрострумowego первинного вимірювального перетворювача абсолютного переміщення. Показано, що у функціональній залежності від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем при стабільній напрузі живлення перебуває як діюче значення вихідного струму так і зміщення його початкової фази. Встановлено, що при забезпеченні прийнятних габаритних розмірів даний сенсор має достатню для забезпечення необхідної точності вимірювання чутливість при перетворення переміщення у діюче (амплітудне) значення вихідного струму, що є постійною в діапазоні переміщення від 0 до 5 мм.

Ключові слова: накладний параметричний вихрострумний сенсор, математична модель, статична характеристика, чутливість.

Вступ. Переважна більшість сучасних гідроагрегатів, передбачає аналіз їх вібро-систем технічного контролю та діагностування акустичних характеристик [1]. Це пов'язано як з силових електричних машин, у томі числі і високою інформативністю даного параметру,



так і з можливістю його вимірювання безпосередньо у режимі роботи електричної машини без необхідності втручання у її конструкцію [2]. Серед віброхарактеристик, що мають високу інформативність можна виділити як радіальну, так і осьову складову.

Особливістю осьового зміщення ротора електричної машини є те, що найбільш суттєву інформацію про технічний стан машини, зокрема технічний стан її опорних вузлів, можна отримати за рахунок аналізу величини зміщення ротора відносно статора чи іншої жорстко закріпленої конструкції, що не є його частиною [3]. Дана складова має слабкий кореляційний зв'язок з кутовим положенням ротора та частотою його обертання [4]. Основною причиною її виникнення є люфт ходу ротора у осьовому напрямку в наслідок дії осьової складової сили, що передається від робочого органу (може також додаватися і гравітаційна складова, у випадку вертикальної конструкції електричної машини). Оскільки по мірі зношення (пошкодження) опорних вузлів поступово зростає і люфт при дії однакового осьового зусилля, то поточний контроль даного технічного параметру дозволяє не лише виявити наявність дефектів підшипникових вузлів, але й дозволяє запобігти повному руйнуванню агрегату, що неминуче у випадку руйнування опорних вузлів кріплення ротора.

Перспективними для вимірювання осьового зміщення ротора електричних машин є засоби вимірювання, які ґрунтуються на використанні накладних вихрострумів вимірювальних перетворювачів (ВВП) абсолютного переміщення. У таких засобів вихрострумівий сенсор жорстко закріплюється на статорі чи фундаменті (нерухомій конструкції). Однак, широке застосування таких первинних вимірювальних перетворювачів ускладнюється відсутністю високоточних математичних моделей накладних вихрострумівий сенсорів, які описували б їх роботу як у статичному, так і у динамічному режимах [5]. Тож, розробка таких математичних моделей має значне як загальнотеоретичне, так і прикладне значення.

Постановка задачі. Накладні ВВП можуть бути параметричними, які мають одну обмотку, та трансформаторними, з двома і більше обмотками [6]. Параметричні ВВП характеризуються індуктивністю L (індуктивним опором ωL) і активним опором R . Вони є конструктивно більш простим, надійнішим та мають нижчу собівартість, що робить їх більш перспективним з точки зору використання у засобах вимірювання осьового зміщення. Тож у подальшому зосередимося саме на них.

Обмотка параметричного накладного ВВП являє собою котушку індуктивності (рис. 1). При наближенні такого сенсора до об'єкта контролю в наслідок появи вторинного магнітного поля вихрових струмів його індуктивність змінюється (зазвичай зменшується). Зі зміни цих параметрів можна робити висновок про відстань до контрольованого об'єкта.

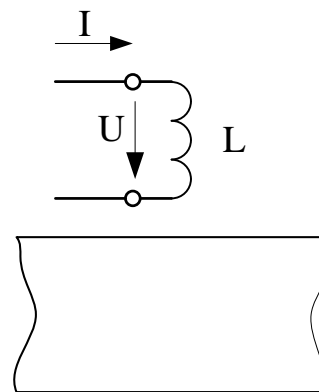


Рис. 1 – Спрощена структурна схема накладного параметричного ВВП

Отже, виходячи з сказаного, є очевидним, математична модель сенсора повинна пов'язувати відстань між сенсором та феромагнітним об'єктом з параметрами струму у котушці параметричного накладного ВВП.

Аналіз шляхів розв'язання задачі. Типова конструктивна розрахункова схема накладного параметричного ВВП без каркаса та елементів кріплення наведена на рис. 2.

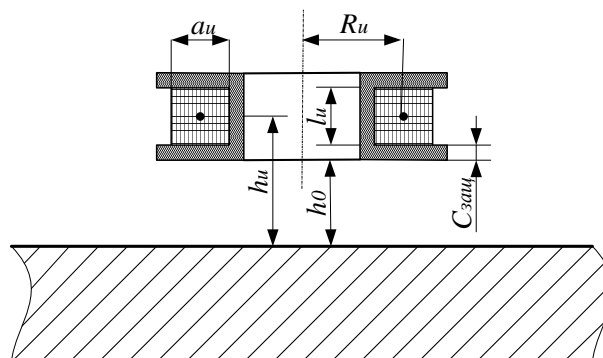


Рис. 2 – Конструктивна розрахункова схема накладного параметричного ВВП



Реакція струмопровідного середовища, якими є конструктивні елементи ротора електричної машини, на котушку з струмом I еквівалентна (наближено) впливу дзеркального відображення цієї ж котушки зі струмом [7]. Використовуючи це положення, а також вводячи припущення, що вісь сенсора перпендикулярна поверхні середовища, можна записати вираз для повної напруги на котушці (у тому числі з магнітопроводом) та впливом струмопровідного середовища

$$\underline{U} = \underline{U}_n + \underline{U}_{\text{ен}} = \underline{Z}_n \underline{I} + \underline{I} j\omega M(\lambda, x) \quad (1)$$

де \underline{U}_n та $\underline{U}_{\text{ен}}$ – відповідно, початкова та внесена напруга; M – коефіцієнт взаємодуковності між котушкою і дзеркальним відображенням; x – відстань між сенсором та струмопровідним середовищем;

$$\lambda = \frac{2}{3r_e}, \quad (2)$$

де r_e – еквівалентний радіус сенсора.

Розділивши вираз (1) на струм \underline{I} , отримуємо вираз для повного опору сенсора, розташованого над струмопровідним середовищем.

$$\underline{Z} = \underline{Z}_n + j\omega M(\lambda, x) \quad (3)$$

Оскільки M є експоненціальною функцією шуканої відстані між сенсором та струмопровідним середовищем x [8], то її значення може бути визначено наступним чином:

$$M = M_0 e^{-\lambda x} \quad (4)$$

І так, з (3) та (4) випливає, що для розрахунку внесеного у сенсор опору необхідно знати коефіцієнт взаємодії котушки M_0 з його дзеркальним відображенням при нульовій відстані від об'єкта контролю для заданого еквівалентного радіуса r_e .

Значення M_0 може бути визначено експериментально з допомогою основного і ідентичного йому допоміжного сенсорів. Зіткнувши обидва сенсори робочими поверхнями (щоб зазор дорівнював нулю) та вимірюючи високоомним вольтметром напругу U_0 на одному з них при відомому діючому струмі I через інший, можна розрахувати

$$M_0 = \frac{U_0}{\omega I}. \quad (5)$$

Еквівалентний радіус сенсора для орієнтовних розрахунків можна розрахувати як середній радіус його котушки

$$r_e = a + \frac{b}{2}, \quad (6)$$

де a – ширина котушки; b – товщина котушки.

Більш точно значення еквівалентного радіуса можна знайти експериментально, виходячи з рівняння (5). Якщо відстань між торцями сенсорів h встановити таким чином, щоб $M = 0,37 M_0$, тобто, щоб показник експоненціального виразу (4) дорівнював одиниці, отримуємо $r_e = 3x$.

Зазначений шлях визначення M_0 та r_e для конкретного сенсора не є єдино можливим. Можуть бути застосовані й інші методи, наприклад аналітичний.

Тож, враховуючи викладене, можемо записати остаточний вираз для повного опору сенсора, що розміщений на відстані x від поверхні струмопровідного середовища

$$\underline{Z} = \underline{Z}_n + j\omega M_0 e^{-\lambda x}. \quad (7)$$

При цьому комплексне діюче значення струму у котушці може бути визначено наступним чином:

$$\underline{I}(x) = \frac{U_{\text{жс}}}{\underline{Z}} = \frac{U_{\text{жс}}}{\underline{Z}_n + j\omega M_0 e^{-\lambda x}}. \quad (8)$$

Залежність (8) є математичною моделлю накладного параметричного ВВП у стаціонарному режимі роботи. Як впливає з (8) для вихідного струму даного сенсора від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем будуть залежати як амплітудне (діюче) значення вихідного струму, так і його фазове зміщення. Тож, для кожного із зазначених параметрів вихідного струму на основі (8) можна отримати рівняння перетворення.

Рівняння перетворення відстані між сенсором та струмопровідним середовищем у діюче значення вихідного струму:

$$I(x) = \frac{U_{\text{жс}}}{\sqrt{R_n^2 + \omega^2 (L_n + M_0 e^{-\lambda x})^2}}, \quad (9)$$

де R_n – початковий активний опір; L_n – початкова індуктивність.



Рівняння перетворення відстані між сенсором та струмопровідним середовищем у

зміщення фаз вихідного струму:

$$\Delta\varphi(x) = \arctg\left(\frac{\omega(L_n + M_0)}{R_n}\right) - \arctg\left(\frac{\omega(L_n + M_0 e^{-\lambda x})}{R_n}\right). \quad (10)$$

Для моделювання залежностей (9) та (10) задамося параметрами вихрострумowego сенсора AE505 від RFHIC, для якого характерні наступні технічні параметри: ширина котушки – 1 мм, товщина котушки – 1 мм, активний опір котушки – 10 Ом, індуктивність котушки – 32 мГн, M_0 – 30 мГн, частота напруги живлення – 5 кГц [9]. Статичні характеристики сенсора за діючим значенням струму та зміщенням початкової фази наведено на рис. 3 та рис. 4, відповідно.

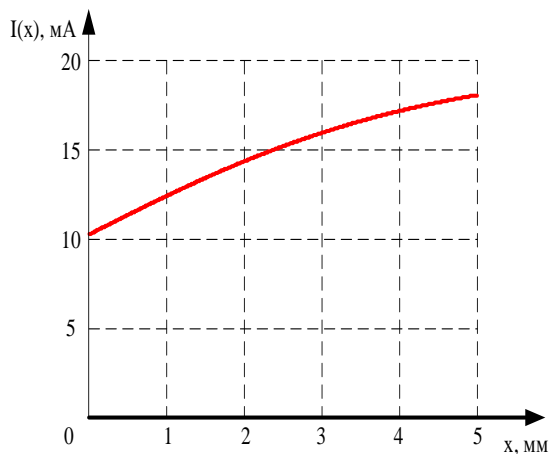


Рис. 3 – Статична характеристика накладного параметричного ВВП за діючим значенням струму

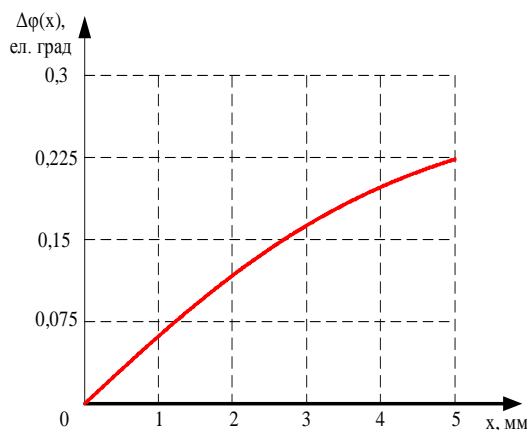


Рис. 4 – Статична характеристика накладного параметричного ВВП за зміщенням початкової фази

Як випливає з аналізу статичних характеристики (рис. 3 та рис. 4), задовільна чутливість при забезпеченні прийнятних габаритних розмірів сенсора забезпечується лише за діючим значенням вихідного струму. Тоді як чутливість, що забезпечується при вказаних габаритних розмірах накладного параметричного ВВП є недостатньою для вимірювання осьового зміщення ротора у діапазоні від 0 до 5 мм з необхідною точністю. Окрім цього з рис. 3 можна зробити висновок, що у зазначеному діапазоні зміни відстані між сенсором та струмопровідним середовищем та наведених габаритних розмірах сенсора статичну характеристику за діючим значенням вихідного струму з допустимою похибкою можна вважати лінійною.

ВИСНОВКИ:

1. Отримано математичну модель параметричного накладного ВВП. Показано, що у функціональній залежності від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем при стабільній напрузі живлення перебуває як діюче значення вихідного струму так і зміщення його початкової фази.

2. Показано, що при збереженні допустимих габаритних розмірів сенсора чутливість при перетворенні відстані між сенсором та струмопровідним середовищем у зміщення початкової фази вихідного струму є не достатньою, для забезпечення необхідної точності вимірювання. Тоді як при перетворенні відстані між сенсором та струмопровідним середовищем у діюче значення вихідного струму при тих же габаритних розмірах чутливість сенсора буде значно вищою, що обумовлює доцільність саме первинного вимірювального перетворення типу «відстань – діюче (амплітудне) значення вихідного струму».

3. Доведено, що у діапазоні зміни відстані від 0 до 5 мм та первинному вимірювальному перетворенні типу «відстань – діюче (амплітудне) значення вихідного струму» можливо забезпечити лінійність статичної характеристики при прийнятних габаритних розмірах параметричного накладного ВВП.

Список використаних джерел

1. Алексеев Б. А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. Москва. НЦ ЭНАС. 2002. 144 с.



2. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Kucheruk V. Y. and other Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machine. Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series. No 1. 2018. P. 72-80

3. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва: Машиностроение. 1996. 276 с.

4. Rao S. S. Vibration of continuous systems. New York, USA: Jon Wiley & Sons. 2007. 720 p.

5. Кухарчук В. В., Ведмицький Ю. Г., Граняк В. Ф. Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Монографія: Вінниця: ВНТУ. 2019. 152 с.

6. Шкарлет Ю. М. Некоторые вопросы теории метода вихревых токов и расчёт накладных датчиков. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий. Москва: Онтиприбор. 1964. С. 56.

7. Russel F. J., Schuster V. E., Wiedelich D. L. Communication and electronics Munich. 1962. 232 p.

8. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. Монография: Новосибирск: Наука. 1967. 144 с.

9. RFHIC. AE505: Datasheet. 5 p. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/890164/RFHIC/AE505.html>

Список джерел у транслітерації

1. Alekseev B. A. (2002) Opredeleny`e sostoyany`ya (dy`agnosty`ka) krupnykh gy`drogeneratorov [Determination of the state (diagnosis) of large hydrogenerators]. 144 p. Moscow: NTs ENAS, 2002. [In Russian].

2. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Kucheruk V. Y. and other (2018) Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machine. No 1. P. 72-80. Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series. [In English]

3. Shirman A. R., Soloviev A. B. (1996) Prakty`cheskaya vy`brody`agnosty`ka y` mony`tory`ng sostoyany`ya mekhan`cheskogo oborudovany`ya [Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment]. 276 p. Moscow: Engineering, [In Russian]

4. Rao S. S. (2007) Vibration of continuous systems. 720 p. New York, USA: Jon Wiley & Sons [In English]

5. Kukharchuk V. V., Vedmitsky Y. G., Hranayak V. F. Vy`miryuvannya parametriv obertal`nogo ruhu elektromexanichny`x

peretvoryuvachiv energii v perexidny`x rezhy`max roboty`: monografiya (2019) [Measurement of parameters of rotational motion of electromechanical energy converters in transient modes of operation: monograph]. 152 p. Vinnitsa: VNTU. [In Ukrainian]

6. Shkarlet Y. M. Nekotorye voprosy teory`y` metoda vy`xrevykh tokov y` raschët nakladnykh datchy`kov (1964) [Some questions about the theory of the method of eddy currents and the calculation of overhead sensors]. P. 56. Non-destructive methods of control of materials and products. Moscow: Ontipribor. [In Russian]

7. Russel F. J., Schuster V. E., Wiedelich D.L. (1962) Communication and electronics. Munich. 232 p. [In English]

8. Sobolev V. S., Shkarlet Y. M. Nakladnyye y` ekrannyye datchy`ky`: monografy`ya (1967) [Overhead and screen sensors: monograph]. 144 p. Novosibirsk: Science. [In Russian]

9. RFHIC. AE505: Datasheet. 5 p. Electronic resource. Access mode: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/890164/RFHIC/AE505.html> [In English]

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКЛАДНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АБСОЛЮТНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

На сегодняшний день даже в развитых странах Европы более 50% силового энергогенерирующего оборудования гидроэлектростанций отработали свой проектный срок эксплуатации. В странах СНГ процент такого оборудования еще выше. Полная замена такого оборудования требует большого объема инвестиций, тогда как значительная часть последнего имеет удовлетворительное техническое состояние для дальнейшего продления срока эксплуатации. Однако, при увеличении времени наработки любого электрооборудования неизбежно возрастает вероятность его выхода из строя, что может привести как к значительным материальным убыткам, так и к существенной опасности для жизни и здоровья персонала электростанции. Поэтому, учитывая сказанное, все большую актуальность приобретают системы контроля и раннего диагностирования, на которые возлагается функция защиты как гидротурбин, так и вспомогательного силового оборудования. Одним из наиболее перспективных методов технического контроля и диагностики гидроагрегатов является именно анализ их вибро- акустических характеристик. В том числе и осевой составляющей. Однако, значительной технической проблемой,



возникающей при построении таких систем, является ограниченность применения известных сенсоров абсолютного вибро смещения вследствие отсутствия их высокоточных математических моделей.

В работе разработана математическая модель накладного параметрического вихретокового первичного измерительного преобразователя абсолютного перемещения. Показано, что в функциональной зависимости от расстояния между сенсором и токопроводящей средой при стабильном напряжении питания находится как действующее значение выходного тока, так и смещение его начальной фазы. Установлено, что при обеспечении приемлемых габаритных размеров данный сенсор имеет достаточную для обеспечения требуемой точности измерения чувствительность при преобразовании перемещения в действующее (амплитудное) значение выходного тока, которая является постоянной в диапазоне перемещения от 0 до 5 мм.

Ключевые слова: накладной параметрический вихретоковый сенсор, математическая модель, статическая характеристика, чувствительность.

MATHEMATICAL MODEL OF OVERHEAD PARAMETRIC EDDY CURRENT PRIMARY MEASURING TRANSDUCER OF ABSOLUTE MOVEMENT

To date, even in the developed countries of Europe, more than 50% of the power generating equipment of hydropower plants have worked their design life. In the CIS countries, the percentage of such equipment is even higher. The complete replacement of such equipment requires a large amount of investment, while a significant part of

the latter has a satisfactory technical condition for the further extension of the service life. However, with an increase in the operating time of every electrical equipments, the probability of its failure inevitably increases, which can lead to significant material losses and to a significant danger to the life and health of the power plant personnel. Therefore, in view of the foregoing, monitoring and early diagnosis systems, which are entrusted with the protection function of both hydraulic turbines and auxiliary power equipment, are becoming increasingly relevant. One of the most promising methods of technical control and diagnostics of hydraulic units is the analysis of their vibro-acoustic characteristics. Including the axial component. However, a significant technical problem that arises in the construction of such systems is the limited use of known absolute vibration displacement sensors due to the lack of their high-precision mathematical models.

In the article a mathematical model of an overhead parametric eddy current primary measuring transducer of absolute displacement has been developed. It is shown that both the effective value of the output current and the shift of its initial phase are found to be functionally dependent on the distance between the sensor and the conductive medium with a stable supply voltage. It has been established that, while ensuring acceptable overall dimensions, this sensor has sufficient sensitivity to convert the displacement to the effective (amplitude) value of the output current, which is constant in the range of movement from 0 to 5 mm, to ensure the required measurement accuracy.

Keywords: consignment note parametric eddy current sensor, mathematical model, static characteristic, sensitivity.

Відомості про автора

Граняк Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна e-mail: titanxp2000@ukr.net)

Граняк Валерій Федорович - кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина e-mail: titanxp2000@ukr.net)

Valeriy Granyak - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, Ukraine e-mail: titanxp2000@ukr.net)