

Вимірюйте  
усе доступне вимірюванню  
й робіть недоступне вимірюванню  
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

# Метрологія



# Та прилади

## METROLOGY AND INSTRUMENTS

### № 3 (83), 2020

Науково-виробничий журнал

Scientific and production journal

#### Засновники:

Академія метрології України,  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),  
Державне підприємство  
«Всеукраїнський державний  
науково-виробничий центр  
стандартизації, метрології, сертифікації  
та захисту прав споживачів»  
(ДП «Укрметртестстандарт»),  
ТОВ Виробничо-комерційна  
фірма (ВКФ) «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року

Рік випуску п'ятнадцятий  
Передплатний індекс 92386

#### Головний редактор

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.

#### Редакційна колегія:

Захаров І.П., д. т. н., проф.  
Коломієц Л.В., д. т. н., проф.  
Косач Н.І., д. т. н., проф.  
Кошева Л.О., д. т. н., проф.  
Кошовий М.Д., д. т. н., проф.  
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.  
Кухарчук В.В., д. т. н., проф.  
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.  
Пістун Є.П., д. т. н., проф.  
Семенець В.В., д. т. н., проф.  
Середюк О.Є., д. т. н., проф.  
Туз Ю.М., д. т. н., проф.

#### Іноземні члени редакції:

Tadeusz Skubis, dr hab. inz., prof.  
(Польща)  
Zygmunt Warsza, doc., dr inz. (Польща)  
Михалченко В.М., к. т. н. (Казахстан)

#### Експертна рада:

Большаков В.Б., д. т. н., с. н. с.,  
заступник головного редактора  
Кузьменко Ю.В., к. т. н., с. н. с.  
Петришин І.С., д. т. н., проф.  
Рожнов М.С., к. х. н., с. н. с.  
Сурду М.М., д. т. н., проф.

#### Редакційна група:

Фісун В.П., заступник головного  
редактора  
Винокуров Л.І., науковий редактор —  
відповідальний секретар  
Проненко М.П., модератор сайту,  
дизайнер  
Зайцев Ю.О., дизайнер-верстальник

#### Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Рижівська, 11, к. 2;  
Тел.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665  
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net  
<http://www.amu.in.ua/journal1>  
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

#### Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»  
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;  
Свідоцтво про внесення  
до Держреєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції  
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 05.07.2020.

Формат 60×84/8. Папір крейдований.  
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.  
Друк офсетний. Тираж 400 прим.  
Замовлення № 23.

© «Метрологія та прилади», 2020

#### Журнал зареєстровано

у Міністерстві юстиції України,  
свідоцтвoserія KB № 22796-12696ПП  
від 03.07.2017;

включено до Переліку наукових  
фахових видань України, в яких  
можуть публікуватися результати  
дисертаційних робіт на здобуття наукових  
ступенів доктора наук, кандидата наук  
та ступеня доктора філософії (категорія Б),  
затвердженого Наказом Міністерства освіти  
і науки України № 409 від 17.03.2020

Журнал включено до Міжнародної  
наукометричної бази даних  
Index Copernicus, лист від 08.03.2013  
ICV 2018 = 56,77

The Journal is Registered  
in Ministry of Justice of Ukraine,  
Certificate series KB № 22796-12696PP  
dated 03.07.2017;

is included to the List of scientific  
professional publications of Ukraine,  
in which the results of dissertations  
for the degree of doctor of sciences,  
candidate of sciences and the degree  
of doctor of philosophy (category B),  
may be published, approved by the order  
of the Ministry of Education and Science  
of Ukraine No. 409 dated 17.03.2020  
The journal is included in the International  
Scientific Databases Index Copernicus, Letter  
dated 08.03.2013  
ICV 2018 = 56,77

#### Co-founders:

Kharkiv National University  
of Radio Electronics (KNURE);  
Public Organization  
«Academy of Metrology of Ukraine»;  
State Enterprise «Ukrainian State  
Research and Production Centre  
for Standardisation, Metrology,  
Certification and Consumers  
Rights Protection»  
(SĖ «Ukrmetrtteststandart»);  
LLC Production and Commercial Firm  
(PCF) «FAVOR, LTD»

Published since march 2006.

Release year fifteenth  
Subscription index 92386.

#### Chief editor:

Volodarskyi Ye.T., D.Sc. (Eng.), prof.

#### Editorial board:

Kolomiyets L.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kosheva L.O., D.Sc. (Eng.), prof.  
Koshovyi M.D., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kukharchuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.  
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.  
Semenets V.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.  
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.  
Zakharov I.P., D.Sc. (Eng.), prof.

#### Foreign members of the editorial board:

Tadeusz Skubis, prof. dr hab. inz.  
(Poland)  
Zygmunt Warsza, doc., dr inz. (Poland)  
Mykhalchenko V.M., Ph.D.  
in Engineering Science (Kazakhstan)

#### Advisory Board:

Bolshakov V.B., D.Sc. (Eng.), S.Sc.Off.  
Deputy Chief Editor  
Kuzmenko Yu.V., Ph.D. (Eng.), S.Sc.Off.,  
Petryshyn I.S., D.Sc. (Eng.), prof.  
Rozhnov M.S., Ph.D. (Chem.), S.Sc.Off.  
Surdu M.M., D.Sc. (Eng.), prof.

#### Editorial Team:

Fisun V.P., Deputy Chief Editor  
Vynokurov L.I., Scientific Editor,  
Executive Secretary  
Pronenko M.P., site moderator, designer  
Zaitsev Yu.O., maker-up designer

#### Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;  
tel.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665  
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net  
<https://www.amu.in.ua/journal1>  
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

#### Publisher and manufacturer:

PCF «Favor LTD»  
61140, Kharkiv,  
pr-t. Gagarin, 94-A, sq. 35;  
Certificate of inclusion in the State  
Register of Publishers, Manufacturers  
and Distributors of Publishing Products,  
series XK № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 05.07.2020  
Format 60 × 84/8. Paper is coated.  
Conditional printed sheets 8.43.  
Accounting and publishing sheets 7.13.  
Offset printing. Circulation 400 copies  
Order number 23.

ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564

DOI: 10.33955/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2020

**МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО**

Вітальне послання директорів Міжнародних бюро мір і ваг Мартіна Мілтона та законодавчої метрології Ентоні Доннеллана з нагоди Всесвітнього дня метрології 2020 ..... 3

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

Глебов А. Б., Кисель С. П., Якубов С. Е., Згуря В. И. Система метрологического обеспечения измерений в области контроля за обращением гидрохлорфторуглеродов ..... 4

**ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Гринев Б. В., Гурджян Н. Р., Зеленская О. В., Любинский В. Р., Молчанова Н. И., Мицай Л. И., Тарасов В. А. Восходящий и нисходящий подходы к оцениванию неопределенности измерений светового выхода сцинтилляторов (обзор) ..... 12

**МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ**

Мельников О. О., Гаврилкін В. Г., Петренко А. В., Манська О. О., Левбарг О. С. Метрологічна простежність результатів вимірювання рН в Україні ..... 21

**ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ**

Купко О. Д. Аналіз точності способів розрахунку площі квадратної діафрагми методом Монте-Карло ..... 26

**ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ**

Граняк В. Ф., Кухарчук В. В. Математична модель накладного трансформаторного вихрострумовевого первинного вимірювального перетворювача абсолютного переміщення ..... 32

**ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ**

Черепашук Г. А., Калашников Е. Е., Потыльчак А. П. Весоизмерительные устройства для работы в специальных условиях эксплуатации ..... 38

**МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ**

Літвінов К. А. Математичні моделі реактора аміачної селітри з коливально імпульсним трендом вимірювальних параметрів ..... 45

**ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Григоренко І. В., Григоренко С. М., Боженко М. М. Аналіз кореляції за оцінювання невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовленні губної помади ..... 50

**МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ**

Козубовський В. Р., Алякшев І. П. Методи термостабілізації датчиків газу ..... 56

**ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ**

Бойко В. М. Узагальнена інформаційна модель системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в Збройних Силах України: актуальні питання оптимізації системи ..... 61

**КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ**

Никитюк О. А., Новіков В. М. Управління ризиками у лабораторії в рамках вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 ..... 67

**ІНФОРМАЦІЯ**

..... 49

**INTERNATIONAL COOPERATION**

Messages from the Directors of the BIPM Martin Milton and of the BIML Anthony Donnellan dedicated to the World Metrology Day 2020

**METROLOGICAL ASSURANCE**

Glebov A. B., Kisiel S. P., Yakubov S. E., Zghuria V. I. The System of Metrological Support of Measurements in the Field of Control Over the Circulation of Hydrochlorofluorocarbons

**ERRORS AND UNCERTAINTY**

Grynyov B. V., Gurdzhian N. R., Zelenskaya O. V., Lyubynskiy V. R., Molchanova N. I., Mitcay L. I., Tarasov V. A. Ascending and Descending Approaches to Estimating the Uncertainty of Measurements of the Light Output of Scintillators (REVIEW)

**METROLOGICAL TRACEABILITY**

Melnikov O. O., Gavrilkin V. G., Petrenko A. V., Manska O. O., Levbarg O. S. Metrological traceability of pH measurements in Ukraine

**ACCURACY AND RELIABILITY**

Kupko O. D. Analysis of Exactness of Methods of Calculation of Area of Square Diaphragm By the Method of Monte Carlo

**CONVERTERS AND SENSORS**

Hraniak V. F., Kukharchuk V. V. Mathematical Model of Overhead Transformer Eddy Current Sensor of Absolute Movement

**MEASURING INSTRUMENTS AND DEVICES**

Chereshchuk G. A., Kalashnikov E. E., Potylchak O. P. Weight Measuring Devices for Work In Special Conditions of Operation

**MODELS AND MODELING**

Litvinov K. A. Mathematical Models of the Reactor of Ammonia Selectra with Oscillatory Impulsed Trend of Measuring Parameters

**PARAMETERS AND CHARACTERISTICS**

Hryhorenko I. V., Hryhorenko S. M., Bozhenko M. M. Analysis of Correlation in the Evaluation of the Uncertainty of the Results of Temperature Measurement in the Process of Manufacturing Lipstick

**METHODS AND PROCEDURES**

Kozubovsky V. R., Aljakshv I. P. Methods of Thermostabilization of Gas Sensors

**MILITARY METROLOGY**

Bojko V. M. Generalized Information Model of System of the Metrological Control and Management of Reference Signals of Time and Frequency which are Used in Armed Forces of Ukraine: Pressing Questions of Optimization of System

**COMPETENCE OF LABORATORIES**

Nykytyuk O. A., Novikov V. M. Laboratory Risk Management Within the Requirements of DSTU ISO / IEC 17025: 2017

**INFORMATION**

DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.32-37

УДК 681.586

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАКЛАДНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АБСОЛЮТНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ

## Mathematical Model of Overhead Transformer Eddy Current Sensor of Absolute Movement

**В. Ф. Граняк** кандидат технічних наук, доцент,  
Вінницький національний аграрний університет,  
Україна  
**В. В. Кухарчук** доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри,  
Вінницький національний технічний університет,  
Україна,  
e-mail: titanxp2000@ukr.net

**V. F. Hraniak**, candidate of technical sciences, docent,  
Vinnitsa National Agrarian University,  
Ukraine,  
**V. V. Kukharchuk**, doctor of technical sciences,  
professor, head of the department,  
Vinnitsa National Technical University,  
Ukraine,  
e-mail: titanxp2000@ukr.net

Розроблено математичну модель накладного трансформаторного вихрострумowego первинного вимірювального перетворювача абсолютного переміщення. Показано, що у функціональній залежності від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем за постійного значення струму струмової обмотки у вихідному сигналі перебувають як амплітудне значення вихідної напруги так і зміщення її початкової фази. Встановлено, що за вимірювального перетворення типу «аксіальне зміщення — амплітудне значення вихідної напруги» та діапазону вимірювання від 0,5 до 2,5 мм статична характеристика типового накладного трансформаторного вихрострумowego сенсора матиме суттєву нелінійність. Показано, що ефективним способом зменшення похибки нелінійності статичної характеристики зазначеного первинного вимірювального перетворювача є звуження діапазо-

The mathematical model of the overhead transformer eddy current primary measuring transducer of absolute movement is developed in the work. It is shown that in the functional dependence on the distance between the sensor and the conductive medium at a constant value of the current of the current winding in the output signal are both the amplitude value of the output voltage and the displacement of its initial phase. It is established that during the measurement transformation of the type "axial displacement — amplitude value of the output voltage" and the measurement range from 0.5 to 2.5 mm, the static characteristic of a typical overhead transformer eddy current sensor will have significant nonlinearity. It is shown that an effective way to reduce the nonlinearity error of the static characteristic of the specified primary measuring transducer is to narrow the measuring range.

**Ключові слова:** накладний трансформаторний вихрострумовой сенсор, математична модель, статична характеристика, абсолютне переміщення, чутливість.  
**Keywords:** overhead transformer eddy current sensor, mathematical model, static characteristic, absolute displacement, sensitivity.

### ВСТУП

Широковживаним на сьогодні є визначення поточного технічного стану силових електричних машин (турбо- та гідроагрегатів, гідрогенераторів, оборотних машин і т. ін.) за допомогою вібродіагностування [1]. Це пов'язано як з високою інформативністю такого параметра, так і з можливістю вимірювання цього параметра безпосередньо за реального режиму роботи електричної машини без втручання в її конструкцію [2]. Серед інших віброхарактеристик високу інформативність має радіальна й осьова складові.

Під час дослідження осьової складової вібросигналу найбільший інтерес з точки зору інформативності стосовно технічного стану машини, зокрема технічного стану її опорних вузлів, можна отримати на основі аналізу значення зміщення ротора відносно статора чи іншої жорстко закріпленої конструкції, що не є його частиною [3]. Особливістю цієї складової вібросигналу є те, що вона має слабкий кореляційний зв'язок з кутовим положенням ротора та частотою його обертання [4]. Основною причиною



В. Ф. Граняк



В. В. Кухарчук

її виникнення є люфт ходу ротора в осьовому напрямку внаслідок дії осьової складової сили, що передається від робочого органу (може також додаватися і гравітаційна складова, у випадку вертикальної конструкції електричної машини). Оскільки в процесі розвитку дефектів опорних вузлів (їх зношення) поступово зростає і люфт за дії однакової осьової проекції зусилля, то поточний контроль такого технічного параметра дозволяє не лише виявити наявність дефектів підшипникових вузлів, але й дозволяє запобігти повному руйнуванню агрегата, що має високу ймовірність у випадку аварійного виходу з ладу вузлів кріплення ротора.

Перспективними для моніторингу осьового зміщення ротора електричних машин є засоби вимірювання абсолютного переміщення, в основу яких покладено вихрострумний метод вимірювання. Такі сенсори дозволяють вимірювати абсолютні переміщення феромагнітних конструкцій порядку 0,1 мкм за забезпечення необхідної для роботи системи технічного контролю чи діагностування швидкодії. А також, у випадку використання накладних вихрострумних вимірювальних перетворювачів (ВВП) не потребують втручання у конструкцію електричної машини [5]. Однак, широке застосування таких ВВП та засобів вимірювання осьового зміщення, побудованих на їх основі, ускладнюється відсутністю високоточних математичних моделей вихрострумних сенсорів [6]. Тож, розроблення таких математичних моделей має значне як загальнотеоретичне, так і прикладне значення.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Накладні ВВП можуть бути параметричними, якщо мають одну обмотку, та трансформаторними, з двома і більше обмотками [6]. Проте трансформаторні сенсори мають ряд суттєвих переваг перед параметричними. Зокрема, вони характеризуються більш високою стабільністю вихідного сигналу. Також, за використання однообмоткових (параметричних) сенсорів власний опір обмотки додається з корисним внесеним опором, що робить вихідний сигнал більш залежним від зовнішніх впливних величин (температури, вологості та ін.) [6]. Ураховуючи сказане, є очевидним, що для побудови високоточних систем технічного контролю та діагностування силових електричних машин доцільним є використання засобів вимірювання саме на основі трансформаторних ВВП. Тому у подальших дослідженнях зосередимося саме на них.

З точки зору моделювання вихідних сигналів накладних ВВП за певних умов (зазори, частоти, струмі тощо) основною задачею є розрахунок комплексної

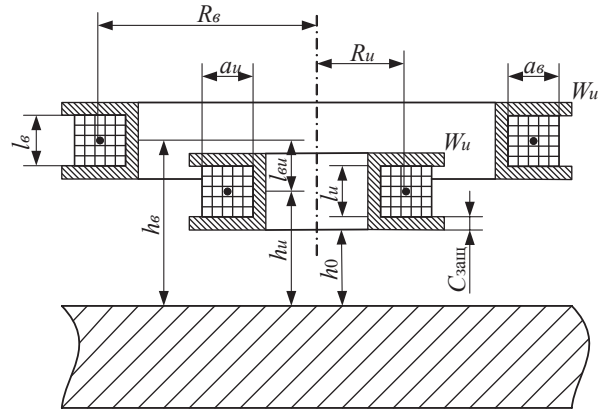


Рис. 1. Розрахункова модель накладного двохобмоткового ВВП

Fig. 1. Estimated model of overhead double-winding GDP

внесеної напруги на вимірювальній обмотці двохобмоткового ВВП.

Найчастіше на практиці використовується котушка з коловими витками.

Типову конструктивну схему такого сенсора без каркаса та елементів кріплення наведено на рис. 1 [6]. Безпосередньо на основі даних рис. 1 з урахуванням товщини захисної щічки  $C_{заш}$ , взаємного розташування  $l_{вн}$  і висоти обмоток  $l_b$ ,  $l_i$  можна знайти значення зазорів.

### АНАЛІЗ ШЛЯХІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Основним вихідним параметром трансформаторного вихрострумного сенсора є значення ЕРС або напруги на вимірювальних обмотках.

Коли поблизу накладного ВВП немає об'єкта контролю, то початкова напруга на його вимірювальній обмотці визначатиметься взаємоіндуктивністю  $M$  між його котушками:

$$\underline{U}_2 = -j\omega M_{12} \underline{I}_1, \quad (1)$$

причому значення взаємоіндуктивності між обмотками для конкретного сенсора  $M_{12}$  можна отримати за допомогою відомих співвідношень [8, 9].

Розглянемо сенсор з малим поперечним перерізом обмоток, а потім поширимо отримані результати на реальні сенсори. Взаємне розташування

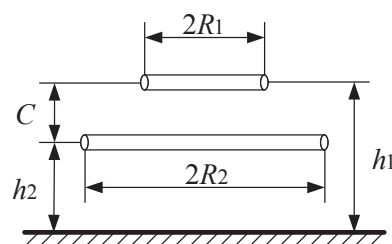


Рис. 2. Розташування обмоток трансформаторного сенсора

Fig. 2. Location of transformer sensor windings

обмоток для ідеального випадку наведено на рис. 2.

Як показано у [9], напруженість електричного поля може бути описана таким виразом:

$$\underline{E} = -j\omega W_1 \underline{A}_1, \quad (2)$$

де  $\underline{A}_1$  — вектор-потенціал сумарного поля у верхньому півпросторі;  $W_1$  — кількість витків струмової обмотки.

ЕРС вимірювальної обмотки визначається як циркуляція напруженості електричного поля  $\underline{E}$ , по контуру вимірювальної обмотки радіусом  $R_2$ :

$$EPC_2 = \oint_{R_2} \underline{E} dl, \quad (4)$$

де  $l$  — контур інтегрування.

У силу того, що напруженість  $\underline{E}$  постійна на будь-якому співвісному з струмовою обмоткою контурі, маємо

$$EPC_2 = 2\pi R_2 W_2 \underline{E}, \quad (5)$$

де  $W_2$  — кількість витків вимірювальної обмотки сенсора.

Підставивши (4) у (5), отримаємо:

$$EPC_2 = -j2\pi\omega R_2 W_1 W_2 \underline{A}_1. \quad (6)$$

Виконавши перетворення (6), можна отримати відповідні точні вирази ЕРС вимірювальної обмотки для середовищ різної структури. Проте, інтерпретація цих виразів, навіть за допомогою сучасної комп'ютерної техніки, є достатньо трудомісткою задачею. Звідси доцільним є використання саме наближених розрахунків для поля у верхньому півпросторі. Ураховуючи це, а також (6), отримуємо таку формулу для ЕРС вимірювальної обмотки у першому наближенні:

$$EPC_2 = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} (34x - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{3c}{2R_2}} \underline{I} - j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} (34x - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-3\frac{h_1+h_2}{2R_2}} \underline{I}\varphi_1(\lambda). \quad (7)$$

У наведеному виразі

$$c = |h_2 - h_1|, \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{3}{2R_2}. \quad (9)$$

Підставимо у (7)  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м), отримаємо:

$$EPC_2 = -j\omega 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{3c}{2R_2}} \underline{I} - j\omega 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-3\frac{h_1+h_2}{2R_2}} \underline{I}\varphi_1(\lambda). \quad (10)$$

У відповідності з (10) можна побудувати еквівалентну схему заміщення сенсора над провідним середовищем, наведену на рис. 3, уважаючи, що перший доданок виразу (10) є ЕРС, наведена у вимірювальній обмотці струмовою обмоткою зі струмом  $\underline{I}$ ,

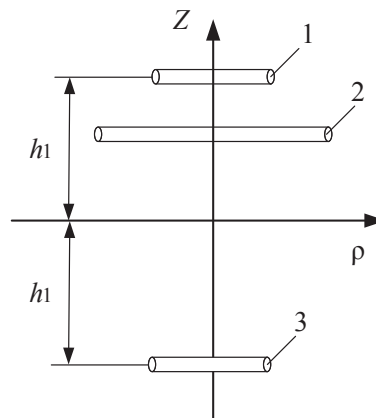


Рис. 3. Схема заміщення двообмоткового трансформаторного сенсора: 1, 2 — обмотки сенсора, 3 — уявна обмотка  
Fig. 3. Scheme of replacement of the two-winding transformer sensor: 1, 2 — sensor windings, 3 — imaginary winding

а другий доданок — ЕРС, наведена дзеркальним відображенням струмової обмотки зі струмом  $\underline{I}\varphi_1(\lambda)$ .

У відповідності з наведеною схемою заміщення, вираз (10) можна записати у такому виді:

$$EPC_2 = -j\omega M_{12} \underline{I} - j\omega M_{32} \underline{I}\varphi_1(\lambda), \quad (11)$$

де  $M_{12}$  — взаємна індуктивність між струмовою та вимірювальною обмотками;  $M_{32}$  — взаємна індуктивність між зображенням струмової обмотки та вимірювальною обмотками.

$$M_{12} = 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\frac{3c}{2R_2}}, \quad (12)$$

$$M_{32} = 34 \cdot 10^{-7} (x - 0,3) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-3\frac{h_1+h_2}{2R_2}}. \quad (13)$$

Перші частини формул (7), (10) та (11) дають вираз для початкової ЕРС сенсора  $EPC_{\text{п}}$  за відсутності провідного середовища, другі частини — ЕРС, що наводиться вихровим струмом провідного середовища, тобто відносну  $EPC_{\text{вн}}$ .

Ураховуючи відносно невелике значення напруженості магнітного поля, що створюється струмовою обмоткою, значення відносної магнітної проникності торцевої частини ротора можна вважати постійним. У такому випадку [8]:

$$\varphi_1(\lambda) = j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14\beta^2}}{3\mu + \sqrt{9 + 14\beta^2}}, \quad (14)$$

де  $\mu$  — відносна магнітна проникність торцевої частини ротора;  $\beta$  — коефіцієнт, що враховує електромагнітні властивості торцевої частини ротора (феромагнітного середовища, що впливає на сенсор) та визначається у такий спосіб:

$$\beta = R_2 \sqrt{\omega \sigma \mu_0}, \quad (15)$$

де  $\sigma$  — питома електропровідність торцевої частини ротора;  $\mu$  — відносна магнітна проникність торцевої частини ротора.

Уведемо такі позначення:

$$\begin{cases} U_2 = -EPC_2, \\ U_{2n} = 34 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I, \end{cases} \quad (16)$$

де  $U_2$  — напруга на вимірювальній котушці;  $U_{2n}$  — модуль початкової напруги на вимірювальній котушці за відсутності провідного середовища.

З урахуванням (16), а також урахувавши те, що відстань між сенсором та струмовідним середовищем  $x$  дорівнює  $h_2$  та прив'язавши нульову початкову фазу до початкової фази струму в струмовій обмотці, можемо записати таку наближену залежність:

$$U_2 = jU_{2n} \left( e^{-\frac{3c}{2R_2}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}} \right). \quad (17)$$

Отриманий вираз однозначно пов'язує вхідну (відстань між сенсором та струмовідним середовищем) і вихідну (комплексну напругу на вимірювальній котушці) величини. Оскільки від відстані між сенсором та струмовідним середовищем залежать два параметри: амплітудне значення вихідної напруги та її зміщення за фазою, — то на основі (17) можна подати рівняння перетворення такого сенсора у виді:

$$U_2(x) = \sqrt{2} \cdot \left[ j \cdot 34 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I \times \left( e^{-\frac{3c}{2R_2}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}} \right) \right], \quad (18)$$

$$\varphi_2(x) = \arg \left[ j \cdot 34 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I \times \left( e^{-\frac{3c}{2R_2}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}} \right) \right]. \quad (19)$$

Вирази (18) та (19), по суті, є рівняннями перетворення накладного трансформаторного ВВП за перетворення вимірювального сигналу у діюче значення напруги та зміщення фази, відповідно. Оскільки на практиці амплітудне значення вихідної напруги прямо пропорційне амплітуді струму обмотки струму, то доволі поширеною практикою є зменшення останнього з метою зменшення потужності інформаційних кіл сенсора та застосування додаткового нормуючого підсилювача на виході вимірювальної котушки [5]. У такому випадку рівняння (18) можна записати

у такому виді:

$$U_2(x) = k \left[ j \cdot 48 \cdot 10^7 \omega(x-0,3)W_1W_2\sqrt{R_1R_2}I \times \left( e^{-\frac{3c}{2R_2}} + e^{-\frac{6x-c}{2R_2}} j \frac{3\mu - \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}}{3\mu + \sqrt{9 + 14R_2^2 \omega \sigma \mu \mu_0}} \right) \right], \quad (20)$$

де  $k$  — коефіцієнт підсилення нормуючого перетворювача.

Для моделювання залежностей (19) та (20) задамося параметрами вихрострумового сенсора, наведеного у [9], для якого характерні такі технічні параметри: радіус струмової обмотки — 1,5 мм, радіус вимірювальної обмотки — 7,5 мм, кількість витків струмової обмотки — 260, кількість витків вимірювальної обмотки — 400, частота напруги живлення — 125 Гц, відстань між обмотками — 2 мм, діюче значення струму струмової обмотки — 0,1 А. Також для моделювання було прийнято: коефіцієнт підсилення

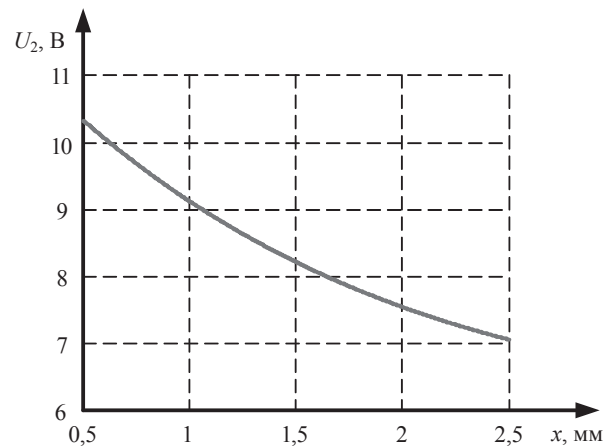


Рис. 4. Статична характеристика накладного трансформаторного ВВП за діючим значенням напруги  
Fig. 4. Static characteristics of the overhead transformer GDP by the current voltage value

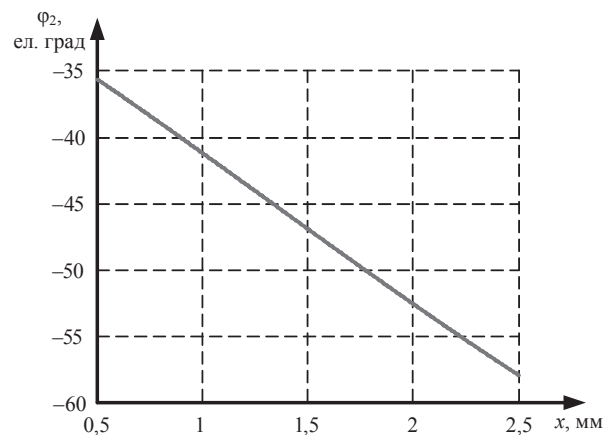


Рис. 5. Статична характеристика накладного трансформаторного ВВП за зміщенням початкової фази  
Fig. 5. Static characteristics of the overhead transformer GDP by the displacement of the initial phase

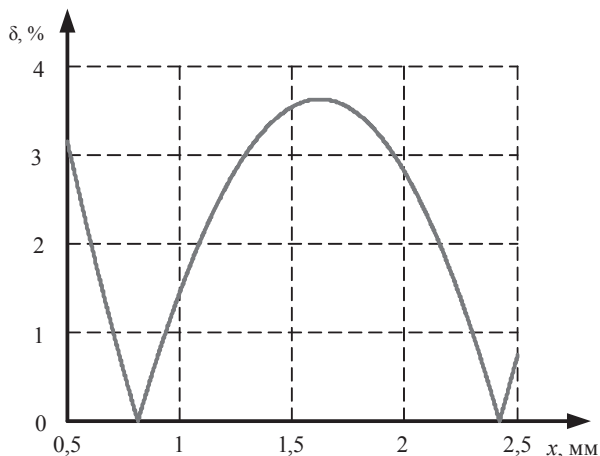


Рис. 6. Залежність відносної похибки нелінійності від виміряного значення відстані між сенсором та струмовідним середовищем

Fig. 6. Dependence of the relative error of nonlinearity on the measured value of the distance between the sensor and the conductive medium

нормуючого перетворювача — 265, питома електропровідність торцевої частини ротора —  $10^7$  См/м; відносна магнітна проникність торцевої частини ротора —  $10^7$ . Статичні характеристики сенсора за діючим значенням струму та зміщенням початкової фази наведено на рис. 4 та рис. 5, відповідно.

Як впливає з аналізу статичних характеристик (рис. 4 та рис. 5), задовільна чутливість за забезпечення заданих габаритних розмірів та енергетичних характеристик сенсора забезпечується лише за амплітудним значенням напруги, оскільки доволі легко піддається масштабуванню шляхом використання масштабного перетворювача з необхідним коефіцієнтом. Тоді як чутливість, що забезпечується за вказаних габаритних розмірів накладного трансформаторного ВВП, є недостатньою для вимірювання осьового зміщення ротора у діапазоні від 0,5 до 2,5 мм з необхідною точністю та не може бути масштабована без використання доволі складних вимірювальних перетворювачів [10].

Ще однією особливістю, що впливає із аналізу статичної характеристики перетворення відстані між сенсором та струмовідним середовищем в амплітуду вихідної напруги (рис. 4), є її нелінійний характер, що для заданих параметрів моделювання носить значний характер. З метою оцінювання нелінійності статичної характеристики остання була апроксимована лінійною залежністю, що проходила через точки (0,5 мм; 10 В) та (2,5 мм; 7 В). Для отриманих значень вихідної напруги оцінено відносну похибку нелінійності за такою залежністю:

$$\delta(x) = \frac{|UL_2(x) - U_2(x)|}{U_2(x)} \cdot 100\%, \quad (21)$$

де  $UL_2(x)$  — напруга на виході сенсора, розрахована за допомогою лінійної апроксимації.

Результати моделювання (21) наведено на рис. 6.

Як впливає з рис. 6, відносна похибка нелінійності статичної характеристики для заданих параметрів сенсора та заданого діапазону вимірювання перевищує 3,6 %, що є недопустимим за побудови сучасних високоточних засобів вимірювання осьового зміщення ротора електричних машин. Ураховуючи сказане, є очевидною необхідність розроблення підходів для зменшення цієї складової похибки. Перспективними шляхами зменшення нелінійності статичної характеристики є зменшення діапазону вимірювань. Тож дослідимо вплив ширини вимірювального діапазону на зміну похибки нелінійності описаного вище сенсора.

Для дослідження впливу зменшення діапазону вимірювань проведемо апроксимацію лінійною статичною характеристикою звуженого удвічі діапазону вимірювання (від 1,0 до 2,0 мм). Апроксимацію звуженої статичної характеристики було здійснено оптимальною лінійною залежністю за зміни напруги початку та кінця характеристики з кроком квантування 0,1 В. Отримана лінійна характеристика проходила через точки (1,0 мм; 9,1 В) та (2,0 мм; 7,5 В). Результати моделювання відносної похибки нелінійності для звуженого діапазону наведено на рис. 7.

Як впливає із аналізу залежності відносної похибки нелінійності, наведеної на рис. 6 та рис. 7, звуження діапазону вимірювання є ефективним методом зменшення похибки нелінійності. Зокрема,

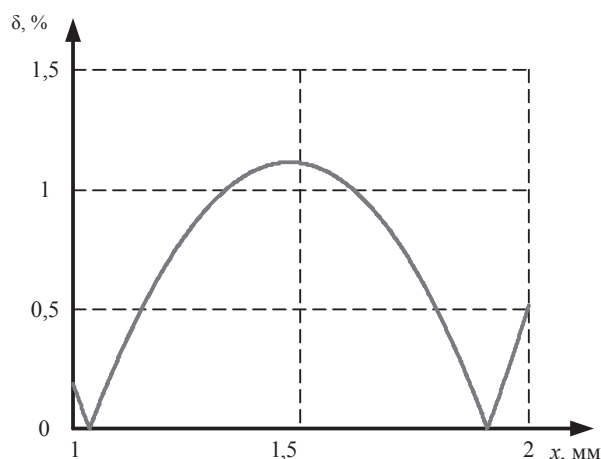


Рис. 7. Залежність відносної похибки нелінійності від виміряного значення відстані між сенсором та струмовідним середовищем для звуженого діапазону вимірювання

Fig. 7. Dependence of the relative error of nonlinearity on the measured value of the distance between the sensor and the conductive medium for the narrowed measuring range

для досліджуваного сенсора зменшення діапазону вимірювання вдвічі призводить до трикратного зменшення відносної похибки нелінійності.

### ВИСНОВКИ

Отримано математичну модель накладного трансформаторного ВВП. Показано, що у функціональній залежності від відстані між сенсором та струмопровідним середовищем за постійного значення струму струмової обмотки перебуває як діюче значення напруги вимірювальної обмотки, так і зміщення її початкової фази.


Показано, що за збереження допустимих габаритних розмірів сенсора чутливість за перетворення відстані між сенсором та струмопровідним середовищем у зміщення початкової фази вихідного струму є недостатньою (для наведених конструктивних параметрів сенсора не перевищує 35 електричних градусів), для забезпечення необхідної точності вимірювання у повному діапазоні зміни аксіального зміщення. Тоді як за перетворення відстані між сенсором та струмопровідним середовищем в амплітудне значення напруги, значення останньої може бути доволі легко масштабоване до забезпечення необхідного

значення чутливості. Зокрема, для описаного сенсора, з урахуванням коефіцієнта підсилення нормуючого перетворювача, за забезпечення максимального рівня вихідної напруги  $\approx 10,24$  В та діапазону зміни відстані між сенсором та струмопровідним середовищем від 0,5 до 2,5 мм, вихідний сигнал напруги змінювався в діапазоні від 10,325 до 7,053 В. Тож, враховуючи сказане, є очевидною доцільність використання саме первинного вимірювального перетворення типу «відстань — амплітудне значення вихідної напруги».

Теоретично доведено, що у діапазоні зміни відстані від 0,5 до 2,5 мм та первинному вимірювальному перетворенню типу «аксіальне зміщення — амплітудне значення вихідної напруги» статична характеристика сенсора матиме суттєву нелінійність (для заданих конструктивних параметрів сенсора відносна похибка нелінійності перевищуватиме 3,6%).

Для зменшення нелінійності статичної характеристики накладних трансформаторних ВВП запропоновано несуттєве звуження діапазону вимірювання. Зокрема, для наведених конструктивних параметрів сенсора звуження діапазону вимірювання вдвічі призводить до трикратного зменшення відносної похибки нелінійності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Алексеев Б.А. (2002) Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. Москва: НЦ ЭНАС (Alekseev B.A. (2002) Determination of the state (diagnosis) of large hydrogenerators. Moscow: NTs ENAS). 144 с/р.
2. Hraniak V.F., Kukharchuk V.V., Kucheruk V.Y., Khassenov A. (2018) Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machines. Bulletin of the Karaganda University: PHYSICS Series. 1 (89): 72-80.
3. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. (1996) Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва: Машиностроение (Shirman A.R., Soloviev A.B. (1996) Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment. Moscow: Engineering). 276 с/р.
4. Rao S.S. (2007) Vibration of continuous systems. New York, USA: Jon Wiley & Sons. 720 p.
5. Троицкий В.А. (2011) Вихретоковый контроль. Учебн. Пособие. Киев: Феникс (Troitsky V.A. (2011) Eddy current control. Training Allowance. Kiev: Phoenix). 148 с/р.
6. Кухарчук В.В., Ведмицький Ю.Г., Граняк В.Ф. (2019) Вимірювання параметрів обертового руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Монографія: Вінниця: ВНТУ (Kukharchuk V.V., Vedmitsky Yu.G., Graniak V.F. (2019) Vimiryuvannya parameters in the obturnal rukh of electro-mechanical overturning energy in the transition modes of the robot. Monograph: Vinnitsya: VNTU). 152 с/р.
7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. (1981) Расчёт индуктивностей. Ленинград: Энергоиздат (Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. (1981) Calculation of inductances. Leningrad Energoizdat). 136 с/р.
8. Учанин В.Н. (2010) Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации. Техническая диагностика и неразрушительный контроль. (Uchanin V.N. (2010) Eddy current overhead transducers: advanced classification, comparative analysis and typical implementation examples. Technical diagnostics and non-destructive testing). 2010; 4: 22—28.
9. Соболев В.С., Шкарлет В.С. (1967) Накладные и экранные датчики. Монография. Новосибирск: Наука (Sobolev V.S., Shkarlet V.S. (1967) Overhead and screen sensors. Monograph. Novosibirsk: Science). 144 с.
10. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. (1989) Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. Москва: Энергоатомиздат (Viktorov V.A., Lunkin B.V., Sovlukov A.S. (1989) Radio wave measurements of process parameters. Moscow: Energoatomizdat). 208 с/р. 

Отримано / received: 16.05.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М.І. Стадніком (Україна).  
Prof. M.I. Stalnik, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.