

УДК 620.179.1

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИХОРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З П-ПОДІБНИМ МАГНІТОПРОВОДОМ З МЕТОЮ КОМПЕНСАЦІЇ ЗАВАД

Д. Трушаков¹, С. Рендзіняк², О. Козловський¹

¹Центральноукраїнський національний технічний університет,
просп. Університетський 8, 25006 Кропивницький, Україна
dmitro.trushakov@gmail.com, kozlovskiyioa@gmail.com

²Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери 12, 79013 Львів, Україна
emd@polynet.lviv.ua

Розглянуто особливості взаємодії вихорострумowego перетворювача (ВСП) з феромагнітним провідним середовищем при проведенні дефектоскопії феромагнітних деталей і вузлів. Запропоновано удосконалити конструкції вимірювальної системи резонансного вихорострумowego дефектоскопа з трансформаторним зв'язком з двома зв'язаними вимірювальними коливальними контурами та диференціальним датчиком, який має дві вимірювальні обмотки, з метою компенсації зовнішніх завад. За результатами дослідження встановлено залежність потоку вихорових струмів від магнітного потоку первинної обмотки і властивостей контрольованого об'єкта. Показано, що трансформаторний перетворювач більш стійкий до зовнішніх факторів, оскільки вимірювальні обмотки вмикаються зустрічно і ЕРС, викликані зовнішніми факторами, взаємно компенсуються.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, П-подібний магнітопровід, контрольований феромагнітний зразок, вада.

Постановка проблеми. Характер взаємодії вихорострумowego перетворювача (ВСП) з феромагнітним провідним середовищем при проведенні дефектоскопії феромагнітних деталей і вузлів описується за допомогою законів електромагнітного поля, що вимагає розв'язування систем рівнянь у частинних похідних. Однак в окремих задачах, зокрема, зменшення впливу зовнішніх завад, такий підхід нераціональний, і тому виникає необхідність застосування методів, які виключають необхідність розв'язування складних систем рівнянь.

Аналіз останніх досліджень у цьому напрямку вихорострумовой дефектоскопії дає змогу дійти висновку, що не зважаючи на велику кількість робіт з вказаної тематики [1-4, та ін.] до теперішнього часу проблему компенсації завад повністю не вирішено. До складу вимірювальної системи вихорострумowych дефектоскопів входять вихорострумові перетворювачі (ВСП) різних типів – зі стрижневим осердям, з U-подібним осердям, накладний, прохідний. Кожний з вказаних типів має конструктивні особливості, відповідно для моделювання процесів у них застосовують різні підходи. Однак при проведенні вихорострумовой дефектоскопії з виявленими впливами зовнішніх факторів, таких як

температура, електромагнітні завади тощо, вони не дають чіткої відповіді на питання, як покращити не тільки точність вимірювань, а також й здатність визначення характеру дефектів контрольованого зразка.

Задачі дослідження. У цій роботі при дослідженні взаємодії трансформаторного ВСП із феромагнітним провідним середовищем пропонується, як і в попередніх роботах [5-7] розглядати взаємодію електромагнітного поля обмотки ВСП з феромагнітним зразком. В основу дослідження поставлено задачу підвищення точності вихорострумового контролю з метою компенсації завад, що досягається удосконаленням конструкції вимірювальної системи резонансного вихорострумового дефектоскопа з трансформаторним зв'язком з двома зв'язаними вимірювальними коливальними контурами та диференціальним датчиком, який має дві вимірювальні обмотки.

Виклад основного матеріалу. П-подібний ВСП над контрольованою феромагнітною пластиною представлено на рис. 1, де a – відстань між центрами стрижнів ВСП; h – товщина контрольованого зразка; b – ширина контрольованої ділянки ($b = d$); d – діаметр осердя ВСП, l – довжина контрольованої ділянки.

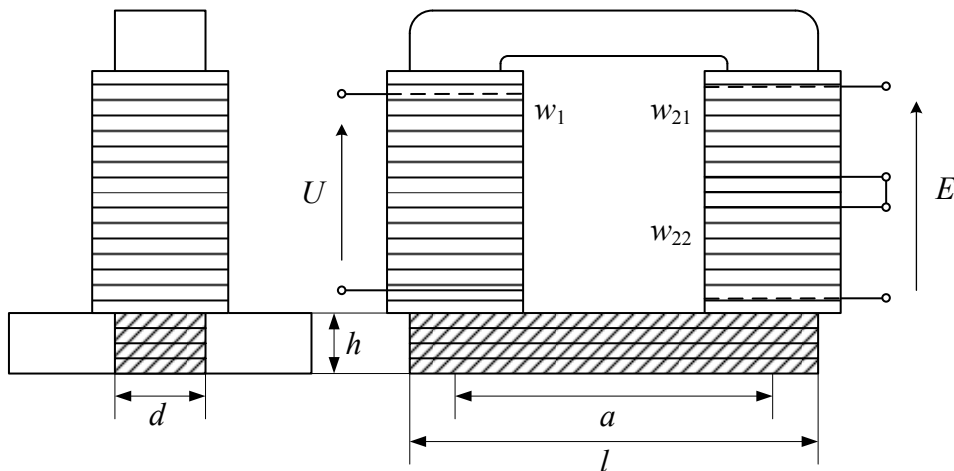


Рис. 1. П-подібний ВСП над контрольованою феромагнітною пластиною

Аналіз взаємодії трансформаторного ВСП із феромагнітним провідним середовищем здійснюється з такими допущеннями: магнітні потоки в осерді і контрольованій ділянці однакові і розподілені рівномірно.

Струм первинної обмотки w_1 збуджує магнітний потік $\Phi = \Phi_{0m} \sin \omega t$ в осерді та контрольованому об'єкті, вимірювальні обмотки w_{21} , w_{22} з'єднано зустрічно, при цьому $w_{21} = w_{22}$.

Комплексну повну потужність \underline{S} , що виділяється у контрольованому середовищі, визначають за виразом [8]

$$\underline{S} = \int_V \gamma E^2 dV + j2\omega \int_V \left(\frac{\mu_a H^2}{2} - \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \right) dV, \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля; H – напруженість магнітного поля; μ_a – абсолютна магнітна проникність контрольованого матеріалу; $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; γ – питома провідність матеріалу об'єкта.

Оскільки магнітна індукція і напруженість магнітного поля ділянки магнітного кола в лінійному ізотропному середовищі пропорційні, то напруженість магнітного поля дорівнює

$$H = \frac{B}{\mu_{r2}\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_{r2}\mu_0 S_2}, \quad (2)$$

де μ_{r2} – відносна магнітна проникність матеріалу контрольованого середовища; S_2 – площа поперечного перерізу об'єкта; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Напруженості електричного E і магнітного H полів пов'язані співвідношенням [8]

$$\underline{E} = \underline{Z}_C \underline{H}, \quad (3)$$

де \underline{Z}_C – хвильовий опір матеріалу об'єкта (контрольованого середовища).

Хвильовий опір залежить як від абсолютної магнітної проникності μ_a , так і від провідності об'єкта γ :

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\gamma}}, \quad (4)$$

де ω – кутова або циклічна частота.

Підставляючи вирази (3) і (4) у вираз (2), одержуємо

$$\underline{E} = \sqrt{\frac{j\omega}{\gamma\mu_{r2}\mu_0}} \cdot \frac{\Phi}{S_2}. \quad (5)$$

Тоді активні втрати в матеріалі об'єкта визначимо як

$$P_{fer} = \text{Re}(\underline{S}) = \int_V \gamma E^2 dV = \gamma E^2 V_2, \quad (6)$$

де V_2 – об'єм об'єкта.

З урахуванням виразу (5) отримуємо

$$P_{fer} = \frac{\omega\Phi^2 V_2}{\mu_{r2}\mu_0 S_2^2}. \quad (7)$$

Ці активні втрати в матеріалі контрольованого середовища викликані вихровими струмами, тому з іншої сторони визначимо їх за законом Джоуля-Ленца

$$P_{fer} = RI^2, \quad (8)$$

де I – значення вихрових струмів у контрольованому середовищі (об'єкті); R – опір контрольованої ділянки, який визначимо як

$$R = \frac{l}{\gamma S_2}, \quad (9)$$

Якщо підставити вираз (9) у (8), тоді отримаємо

$$P_{fer} = \frac{l}{\gamma S_2} I^2, \quad (10)$$

Порівнюючи вирази (10) і (7), встановлюємо, що причиною активних втрат у контрольованому середовищі є наведені магнітним потоком вихрові струми, які в свою чергу збуджують магнітний потік, напрям якого за законом Ленца протилежний тому первинному потоку, що навів вихрові струми.

Із рівності виразів втрат (7) і (10) визначимо значення вихрового струму:

$$I = \frac{\omega \Phi}{Z_C}, \quad (11)$$

Дві вимірювальні котушки w_{21} і w_{22} увімкнуті послідовно і зустрічно, утворюючи вимірювальну обмотку із спільними затискачами. Коли перетворювач не контактує з об'єктом контролю, магнітний потік, створений обмоткою w_1 , наводить у вимірювальних котушках ЕРС e_1 і e_2 , які мають однакове діюче значення. Позаяк w_{21} і w_{22} увімкнуті зустрічно, то ЕРС e_1 і e_2 знаходяться у протифазі та сумарна ЕРС на виході вимірювальної обмотки дорівнює нулю.

Якщо перетворювач встановити на контрольований об'єкт, то вихрові струми, наведені в контрольованому об'єкті створюють власний магнітний потік Φ_2 з напрямом, протилежним до потоку Φ .

Величина цього потоку оцінюється виразом

$$\Phi_2 = \mu_{r2} \mu_0 \frac{I}{2} \sqrt{\frac{hd}{\pi}}, \quad (12)$$

де I – вихровий струм, який визначається за виразом (11). Після заміни цього струму з (11), одержимо

$$\Phi_2 = \mu_{r2} \mu_0 \frac{\omega \Phi}{2Z_C} \sqrt{\frac{hd}{\pi}}. \quad (13)$$

З отриманого виразу встановлюємо залежність потоку вихрових струмів від потоку первинної обмотки Φ і властивостей контрольованого об'єкта. Під впливом потоку Φ_2 крім індуктивного і активного опорів обмоток w_{21} і w_{22} змінюється взаємна індуктивність M між обмотками (звичайно зменшується). У результаті змінюються модулі і фази ЕРС e_1 і e_2 і величина вихідного сигналу $e=e_1-e_2$. Прирости цих параметрів залежать від властивостей контрольованого середовища (об'єкта), що обумовлює інформаційну цінність трансформаторних перетворювачів.

Будь-які зміни параметрів об'єкта контролю викликають зміну вихрових струмів та їхнього магнітного потоку. Відповідно будуть змінюватись величини ЕРС котушок w_{21} і w_{22} . Такі перетворювачі отримали назву диференційних, позаяк вихідним сигналом є не

абсолютне значення ЕРС вимірювальної обмотки, а їхня різниця. Вони більш стійкі до впливу зовнішніх факторів: температури, електромагнітних завад і інших.

Висновки. Розглянуто взаємодію електромагнітного поля диференційного вимірювального перетворювача з контрольованим середовищем. Отримано оцінку магнітного потоку вихрових струмів. Показано, що трансформаторний перетворювач більш стійкий до зовнішніх факторів із-за того, що вимірювальні обмотки вмикаються зустрічно і ЕРС, викликані цими факторами, взаємно компенсуються.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *García-Martín J.* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing / J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez // *Sensors*. – 2011. – 11. – P. 2525–2565. (doi:10.3390/s110302525).
2. *Stupakov O.* Applicability of local magnetic measurements / O. Stupakov, H. Kikuchi, T. Liu, T. Takagi // *Measurement*. 2009. – Vol. 42. – Issue 5. — P. 706-710.
3. *Jansa Jindřich.* Cross-correlation technique for revealing defects in pulsed eddy current defectoscopy / Jindřich Jansa, Karel Slobodnik, Pavel Karban, Ivo Doležel // *Electrical Engineering*. – 2014. – No 77. – P. 47-53.
4. *Гамалій В.* Моделювання вихорострумowego перетворювача з П-подібним магнітопроводом, розташованого над феромагнітним зразком із тріщиною / В. Гамалій, Д. Трушаков // *Теоретична електротехніка*. – 2005. – Вип. 58. – С. 176-182.
5. *Мартинов В.* Моделювання фізичних процесів у вихорострумowego перетворювачі в разі його взаємодії з контрольованим феромагнітним зразком / В. Мартинов, Д. Трушаков // *Теоретична електротехніка*. – 2007. – Вип.59. – С. 97-102.
6. *Martinov V.* Simulation of physical processes in eddy-current transformer during its interaction with the tested ferromagnetic specimen / V. Martinov, D. Trushakov // *Przegląd elektrotechniczny (VIIIth International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering” – Poland: Wilkasy)*. – 2007. – No. 2. – P. 208-210.
7. *Мартинов В.* Визначення внесених опорів під час взаємодії вихорострумowego перетворювача з контрольованим феромагнітним зразком / В. В. Мартинов, Д. В. Трушаков // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Електротехнічні та електромеханічні системи»*. – 2008. – №615 – С. 84-88.
8. *Нейман Л.Р.* Теоретические основы электротехники. Том второй: Учебник для вузов / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян –Л.: Энергия, 1967. – 407 с.

*Стаття: надійшла до редакції 16.05.2018,
доопрацьована 23.05.2018,
прийнята до друку 23.05.2018.*

**DEVELOPMENT OF THE EDDY-CURRENT FLAW DETECTOR FROM U-TYPE
MAGNETIC CIRCUIT WITH THE PURPOSE OF COMPENSATION OF
EXTERNAL INTERFERENCES**

D. Trushakov¹, S. Rendzinyak², O. Kozlovskiy¹

¹*Central Ukrainian National Technical University
ave. University, 8, 25006 Kropyvnytskyi, Ukraine
dmitro.trushakov@gmail.com, kozlovskiyoa@gmail.com*

²*Lviv Polytechnic National University
S. Bandera 12, 79013 Lviv, Ukraine
emd@polynet.lviv.ua*

The features of the interaction of the eddy-current transducer with the ferromagnetic conducting medium during the flaw detection of ferromagnetic components and pieces of equipment with the revealed influences of external factors such as temperature, electromagnetic interference, etc. are considered. Existing approaches do not provide a clear answer to the question of how to improve not only the accuracy of measurements, but also the ability to determine the nature of the defects of the controlled sample. The research goal is to increase the accuracy of the eddy-current control by compensating of external interferences. The improvement of the construction of the measuring system of the resonance eddy-current flaw detector with a transformer connection with two connected measuring oscillatory circuits and a differential sensor having two measuring coil blocks is proposed. These design changes practically do not affect the ability of the eddy-current flaw detector to detect defects of different types and do not reduce its sensitivity to the anisotropy of the properties of the controlled sample or the gap between the transducer sensor and the controlled product. This takes on special significance for the eddy-current flaw detectors, the basis of which is the resonance method of tracking from the effect of the gap, when the resonance frequency and the quality factor of the measuring oscillatory circuit are monitored. According to the results of the research, the dependence of the eddy-currents flux on the magnetic flux of the primary coil and the properties of the controlled sample was established. It is shown that the transformer transducer is more resistant to external factors, since the measuring coils are back-to-back connected and EMF, caused by external factors, are mutually compensating.

Key words: measuring transducer, U-type magnetic circuit, controlled ferromagnetic sample, external interference.