

УДК 620.179.1

## МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИХРОСТРУМОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В РАЗІ ЙОГО ВЗАЄМОДІЇ З КОНТРОЛЬОВАНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ ЗРАЗКОМ

В. Мартинов, Д. Трушаков

*Кіровоградський національний технічний університет  
пр. Університетський, 8, Кіровоград 25006, Україна  
relintern@kdtu.kr.ua, miek@kdtu.kr.ua*

Наведено результати теоретичних досліджень взаємодії накладного вихрострумowego перетворювача ВСП з П-подібним магнітопроводом та феромагнітного матеріалу. Розроблено математичну спрощену модель та отримано формули для інженерного розрахунку внесених у перетворювач активного та реактивного опорів, що можуть бути використані під час розробки вихрострумowych дефектоскопів.

*Ключові слова:* вихрострумовой перетворювач, П-подібний магнітопровод, контрольований феромагнітний зразок, активний та реактивний опори.

Характер взаємодії вихрострумowego перетворювача (ВСП) з провідним середовищем у разі дефектоскопії феромагнітних деталей та вузлів на практиці визначити важко. Це зумовлено складним математичним апаратом, який використовують для опису цієї взаємодії [6]. Особливо складно описувати взаємодію ВСП з П-подібним магнітопроводом та контрольованим феромагнітним зразком, що містить дефект типу “тріщина” [2]. Така конструкція ВСП порівняно зі звичайним стрижневим має найбільшу чутливість до анізотропії властивостей контрольованого зразка, наприклад, що зумовлена дефектами зварного шва типу “непровар” [5].

Метою досліджень є створення нової спрощеної математичної моделі, що спроможна описати взаємодію П-подібного ВСП та контрольованого феромагнітного зразка і дає змогу отримати вирази для спрощеного розрахунку (інженерного розрахунку) внесених у ВСП активного та реактивного опорів.

У попередніх дослідженнях [7] розглянуто математичну модель, що враховувала лише активну складову внесеного у ВСП опору, але цього недостатньо для точного визначення вихідного сигналу ВСП.

Ми пропонуємо розглянути взаємодію ВСП–контрольований феромагнітний зразок як взаємодію електромагнітного поля, що створене ВСП, із пластиною феромагнітного матеріалу.

**Зображення П-подібного ВСП сумісно з контрольованим зразком у вигляді трансформатора.** П-подібний накладний параметричний ВСП – це котушка індуктивності з феромагнітним осердям П-подібної форми, на яке намотана високочастотна обмотка з кількістю витків  $w$ . Магнітний потік  $\Phi$  від ВСП індукуює в контрольованому зразку вихрові струми, інтенсивність яких визначена електромагнітними властивостями матеріалу контрольованого зразка.

Залежність сили струму в обмотці ВСП

$$i = \frac{\dot{U}}{Z_0 + Z_{\text{дi}}} = \frac{\dot{U}}{Z},$$

де  $\dot{U}$  – напруга живлення ВСП;  $Z_0$  – опір обмотки ВСП у повітрі;  $Z_{\text{дi}}$  – додатковий опір, внесений у ВСП зразком;  $Z$  – повний опір обмотки ВСП.

Імпеданс обмотки ВСП складається з активного  $R$  та індуктивного  $X_L$  опорів:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2},$$

де  $f$  – частота струму;  $L$  – індуктивність обмотки ВСП,

$$L = L_0 + L_{\text{дi}} = \frac{W \cdot \Phi}{I}.$$

Тут  $L_0$  – індуктивність обмотки ВСП у повітрі;  $L_{\text{дi}}$  – додаткова індуктивність, внесена у ВСП зразком.

За достатньо значних магнітних проникностей магнітопроводу ВСП і контрольованого зразка потоками розсіяння можна знехтувати і вважати, що через зразок замикається весь магнітний потік

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R_m},$$

де  $R_m$  – магнітний опір кола ВСП–зразок.

ВСП сумісно з металом дослідного зразка можна уявити як трансформатор, первинна обмотка якого є обмоткою ВСП з кількістю витків  $w_1$ . Вторинна обмотка трансформатора має один виток ( $w_2=1$ ) з опором  $Z$ . Коефіцієнт трансформації в цьому випадку дорівнює кількості витків ВСП:  $k_{12}=w_1$ . Схема заміщення для цього трансформатора показана на рис. 1, а. Якщо ВСП не накладений на контрольований зразок металу, тобто перебуває в повітрі, то в схемі заміщення не буде замкненого вторинного витка, а схема заміщення матиме вигляд, показаний на рис. 1, б. В цьому випадку можна вважати, що трансформатор працює на “холостому ході”.

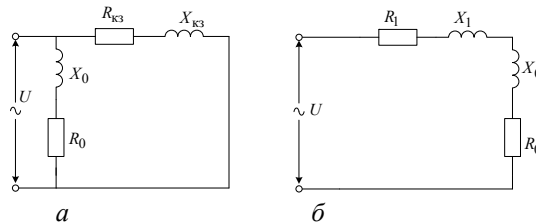


Рис. 1. Схема заміщення ВСП у випадку, коли він перебуває на металі досліджуваного зразка (а), та у випадку, коли ВСП є в повітрі (б).

**Математична модель фізичних процесів, що відбуваються в контрольованому феромагнітному шарі.** Магнітний потік, який виникає в контрольованому шарі, визначимо зі співвідношення [1]

$$U_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m, \quad (1)$$

де  $U_1$  – значення напруги, яка підводиться до обмотки;  $f$  – робоча частота;  $\Phi_m$  – амплітудне значення робочого магнітного потоку;  $w_1$  – кількість витків обмотки.

Амплітуда робочого магнітного потоку

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f w_1}. \quad (2)$$

Контрольований шар розглядаємо як вторинну обмотку трансформатора з кількістю витків  $w_2=1$ . Напруга  $U_2$  у контрольованому шарі

$$U_2 = \frac{U_1}{w_1}. \quad (3)$$

Для отримання параметрів, унесених контрольованим шаром зразка у ВСП, розглянемо модель контрольованого шару у вигляді пластини феромагнітного зразка, що міститься під полюсами П-подібного осердя ВСП (рис. 2).

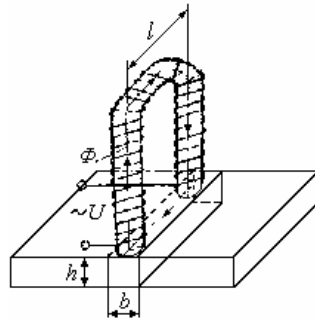


Рис. 2. Уявний контрольований феромагнітний зразок у вигляді пластини, що міститься під полюсами П-подібного магнітопроводу.

Комплексну потужність, яка поглинається в контрольованому шарі, визначимо через вектор Умова–Пойнтинга. Вектори електромагнітного поля, яке виникає в контрольованому шарі знайдемо, вважаючи цей шар пластиною феромагнітного матеріалу, розміщеною у змінному магнітному полі. Формули напруженості електричного поля і магнітної індукції беремо з [4]:

$$\dot{E}_m = -j B_{m\dot{\delta}} \frac{\omega b}{2} \cdot \frac{sh p y}{sh p \frac{b}{2}}; \quad (4)$$

$$\dot{B}_m = B_{m\text{н\ddot{o}}} \frac{\tilde{p} b}{2} \cdot \frac{ch \tilde{p} \frac{b}{2}}{sh \tilde{p} \frac{b}{2}}, \quad (5)$$

де  $B_{m\text{н\ddot{o}}} = \frac{\dot{O}_\delta}{b \cdot h}$  – середнє значення магнітної індукції у контрольованому шарі;

$\tilde{p} = \sqrt{j\omega\mu_a\gamma} = k + jk$ ;  $k = \sqrt{\frac{\omega\mu_a\lambda}{2}}$ ;  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота;  $\mu_a = \mu\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність;  $\gamma$  – питома провідність контрольованого шару;  $b$  – ширина контрольованого шару;  $h$  – товщина контрольованого шару.

Вектор Умова–Пойнтинга визначимо за формулою

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{2} (\dot{E}_m \dot{B}_m)_{y=\pm\frac{b}{2}}. \quad (6)$$

Підставимо у вирази (4) і (5) значення координати  $y = \frac{b}{2}$ , отримаємо

$$(\dot{E}_m \dot{B}_m)_{y=\pm\frac{b}{2}} = -jB_{m\text{н\ddot{o}}}^2 \frac{\omega b}{2} \cdot \frac{\tilde{p} b}{2} \cdot \frac{ch \tilde{p} \frac{b}{2}}{2}. \quad (7)$$

Гіперболічний котангенс комплексного аргументу, як відомо [3], такий:

$$ch \tilde{p} \frac{b}{2} = ch(k \frac{b}{2} + jk \frac{b}{2}) = \frac{shkb - j \sin kb}{chkb - \cos kb}. \quad (8)$$

Використаємо (8) і співвідношення  $\tilde{p} = k + jk$  та перетворимо вираз (7), отримаємо

$$(\dot{E}_m \dot{B}_m)_{y=\frac{b}{2}} = \frac{B_{m\text{н\ddot{o}}}^2 \omega b^2 k}{4\mu_a} \left[ \frac{shkb - \sin kb}{chkb - \cos kb} - j \frac{shkb + \sin kb}{chkb - \cos kb} \right]. \quad (9)$$

Комплексна потужність, яка поглинається у контрольованому шарі,

$$S = 2l \cdot h \left( \frac{\dot{E}_m \cdot \dot{B}_m}{2} \right)_{y=\frac{b}{2}} = \frac{B_{m\text{н\ddot{o}}}^2 \omega b k \cdot V}{4\mu_a} \cdot \frac{shkb - \sin kb - j(shkb + \sin kb)}{chkb - \cos kb}, \quad (10)$$

де  $l \cdot h$  – площа поверхонь, на яких визначали вектор Умова–Пойнтинга;  $V = b \cdot h \cdot l$  – об'єм контрольованого шару.

Комплексну потужність визначимо через  $U_2$ , а опір контрольованого шару за таким співвідношенням:

$$\underline{S} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}}, \quad (11)$$

де  $\underline{Z}^*$  – спряжений комплексний опір контрольованого шару.

Із виразу (11) отримаємо

$$\underline{Z}^* = \frac{U_2^2}{S}. \quad (12)$$

Підставимо в (12) вираз (10):

$$\underline{Z}^* = \frac{2\mu_a U_2^2 (chkb - \omega kb) [shkb - \sin kb + j(shkb + \sin kb)]}{B_{m\ddot{n}\ddot{o}}^2 \omega b k \cdot V (sh^2 kb + \sin^2 kb)}. \quad (13)$$

Виділимо в (13) дійсну та уявну частини, одержимо вирази для визначення активного і реактивного опорів контрольованого шару:

$$R = \frac{2\mu_a U_2^2 (chkb - \cos kb) \cdot (shkb - \sin kb)}{B_{m\ddot{n}\ddot{o}}^2 \omega \cdot b \cdot k \cdot V (sh^2 kb + \sin^2 kb)}; \quad (14)$$

$$X = \frac{2\mu_a U_2^2 (chkb - \cos kb) \cdot (shkb + \sin kb)}{B_{m\ddot{n}\ddot{o}}^2 \omega \cdot b \cdot k \cdot V (sh^2 kb + \sin^2 kb)}. \quad (15)$$

Підставимо в (14) і (15) вираз для  $B_{m\ddot{n}\ddot{o}} = \frac{U_1}{4,44 f w_1 b h}$ ,  $U_2 = \frac{U_1}{w_1}$ , матимемо вирази для внесених складових активного  $R$  і реактивного  $X$  опорів ВСП у разі його взаємодії з контрольованим феромагнітним зразком:

$$R = \frac{19,72 f \mu_a h (chkb - \cos kb) \cdot (shkb - \sin kb)}{\pi k l (sh^2 kb + \sin^2 kb)}; \quad (16)$$

$$X = \frac{19,72 f \mu_a h (chkb - \cos kb) \cdot (shkb + \sin kb)}{\pi k l (sh^2 kb + \sin^2 kb)}. \quad (17)$$

Зведені опори контрольованого шару такі:

$$R' = R n^2 = \frac{19,72 f \mu_a h \cdot w_1^2 (chkb - \cos kb) \cdot (shkb - \sin kb)}{\pi k l (sh^2 kb + \sin^2 kb)}; \quad (18)$$

$$X' = X n^2 = \frac{19,72 f \mu_a h \cdot w_1^2 (chkb - \cos kb) \cdot (shkb + \sin kb)}{\pi k l (sh^2 kb + \sin^2 kb)}, \quad (19)$$

де  $n = \frac{w_1}{w_2} = w_1$  – коефіцієнт трансформації.

Вирази (18), (19) можна використати для інженерного розрахунку внесених у ВСП активного та реактивного опорів під час розробки вихрострумів дефектоскопів.

1. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1996. 623 с.
2. *Гамалий В., Трушаков Д.* Моделивання вихорострумowego перетворювача з П-подібним магнітопроводом, розташованого над ферромагнітним зразком із тріщиною // Теор. електротехніка. 2005. Вип. 58. С. 176–182.
3. *Двайт Г.Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1977. 224 с.
4. *Купалян С.Д.* Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1970. Ч. 3. 247 с.
5. *Серебренніков С.В., Трушаков Д.В.* Дослідження вихорострумowych перетворювачів з П-подібним та стержневим осерддями // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. 2005. Вип. 10. С. 126–130.
6. *Соболев В.С., Шкарлет Ю.М.* Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967.
7. *Smirnov B.G., Trushakov D.V.* Basic equations of physical processes arising in eddy-current transformer with u-type rod if interected with a ferromagnetic material // Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. 2005. P. 299–303.

**SIMULATION THE PHYSICAL PROCESSES OF EDDY-CURRENT  
TRANSFORMER WHICH INTERACTING WITH TESTING  
FERROMAGNETIC MATERIAL**

**V. Martinov, D. Trushakov**

*Kirovograd National Technical University  
8 University Str., Kirovograd, 25006, Ukraine  
relintern@kdtu.kr.ua, miek@kdtu.kr.ua*

The work contains the results of theoretical research of interaction between a laying-in U-type core eddy current transformer (ECT) and tested ferromagnetic material. There has been developed a mathematical simplified model and received equations for engineering calculation of introduced real resistance and reactance which can used for development eddy current defectoscopes.

*Key words:* eddy current transformer, U-type core, testing ferromagnetic material, real resistance and reactance.

Стаття надійшла до редколегії 20.11.2006  
Прийнята до друку 10.03.2007