

УДК 620.179.1

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РАЗІ ЙОГО ВЗАЄМОДІЇ З ФЕРОМАГНІТНИМ ЗРАЗКОМ

В. Мартинов, Д. Трушаков

*Кіровоградський національний технічний університет  
пр. Університетський, 8, Кіровоград 25006 Україна  
[Dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:Dmitriy-kntu@yandex.ru)*

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

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

Накладний параметричний вихрострумовой перетворювач з П-подібним осердям (ВСП) традиційно застосовують у процесі вихрострумовой дефектоскопії виробів з властивостями анізотропії. Цей перетворювач є котушкою індуктивності з феромагнітним осердям П-подібної форми, на яке намотана обмотка з кількістю витків  $w$ . Для визначення внесених контрольованою областю активного і реактивного опорів необхідно знати комплексну магнітну проникність.

Мета досліджень – створення математичної моделі, за допомогою якої можна описати взаємодію П-подібного ВСП та контрольованого феромагнітного зразка й отримати вирази для розрахунку внесених у ВСП активного та реактивного опорів.

У попередніх дослідженнях [1–4] розглянуто математичну модель, у якій внесені активний і реактивний опори визначали громіздкими виразами.

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

**Уявлення П-подібного ВСП сумісно з контрольованим зразком у вигляді трансформатора.** П-подібний накладний параметричний ВСП є котушкою 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

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

де  $\dot{U}$  – напруга живлення ВСП;  $Z_0$  – опір обмотки ВСП у повітрі;  $Z_{\text{вн}}$  – 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:

$$L = L_0 + L_{\text{вн}} = \frac{W \cdot \Phi}{I},$$

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

За достатньо значних магнітних проникностей матеріалу 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 зобразити як трансформатор, первинна обмотка якого є обмоткою ВСП з кількістю витків  $w_1$  [4]. Вторинна обмотка трансформатора має один виток ( $w_2=1$ ) з опором  $Z$ . Ця обмотка є короткозамкненою. 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 у повітрі, то в схемі заміщення не буде замкненого вторинного витка, а схема заміщення матиме вигляд, показаний на рис. 1, б. У цьому випадку можна вважати, що трансформатор працює на “холостому ходу”.

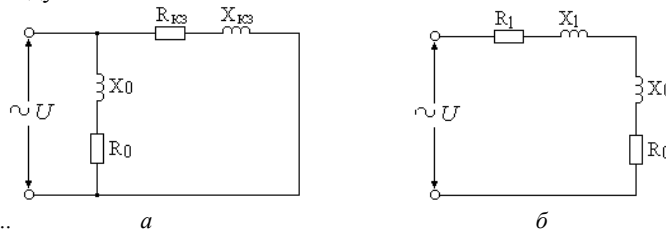


Рис. 1. Схема заміщення ВСП у випадках, коли він перебуває на металі досліджуваного зразка (а) та у повітрі (б)

**Фізичні процеси, що відбуваються у контрольованому феромагнітному шарі.** Магнітний потік, створюваний у контрольованому шарі, визначаємо зі співвідношення [6]

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

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

Амплітуда робочого магнітного потоку

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44fw_1}. \quad (2)$$

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

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

Розглянемо модель контрольованого шару у вигляді пластини феромагнітного зразка, що міститься під полюсами П-подібного ВСП (рис. 2).

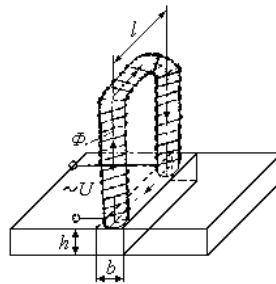


Рис. 2. Уявний контрольований феромагнітний зразок у вигляді пластини, що міститься під полюсами П-подібного магнітопроводу

Комплексну потужність, яка поглинається в контрольованому шарі, визначаємо через втрати в матеріалі контрольованої області  $P_{\text{ФЕР}}$ :

$$S = P_{\text{ФЕР}} + jP_{\text{ФЕР}} / \text{tg} \delta \quad (4)$$

Якщо петлю гістерезису замінити еліпсом тієї ж самої площі, то втрати в матеріалі осердя, згідно з [5]

$$P_{\text{ФЕР}} = \omega \mu_r \mu_0 H^2 V \sin \delta, \quad (5)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу контрольованої області;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – стала величина;  $V = hbl$  – об'єм контрольованої області;  $\delta$  – кут магнітних втрат матеріалу контрольованої області.

Як відомо, напруженість магнітного поля [6]:

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_r \mu_0 S}. \quad (6)$$

де  $B$  – магнітна індукція в контрольованій області;

$S = hb$  – площа поперечного перерізу контрольованої області.

Підставимо вираз (6) в (5), одержимо:

$$P_{\text{ФЕР}} = \frac{\omega V \Phi^2 \sin \delta}{\mu_r \mu_0 S^2}. \quad (7)$$

Підставивши вираз (7) в (4), одержимо:

$$\underline{S} = \frac{\omega V \Phi^2 \sin \delta}{\mu_r \mu_0 S^2} + \frac{j \omega V \Phi^2 \cos \delta}{\mu_r \mu_0 S^2}. \quad (8)$$

або

$$\underline{S} = \frac{\omega V \Phi^2}{\mu_r \mu_0 S^2} (\sin \delta + j \cos \delta). \quad (9)$$

З іншого боку [6], комплексну потужність визначають через  $U_2$  і опір контрольованого шару таким співвідношенням:

$$\underline{S} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}}, \quad (10)$$

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

Із виразу (10) отримаємо

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

Підставимо в (11) вираз (9), одержимо

$$\underline{Z}^* = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U_2^2}{\omega V \Phi^2 (\sin \delta + j \cos \delta)}. \quad (12)$$

Комплексний опір контрольованого шару

$$\underline{Z} = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U_2^2 (\sin \delta + j \cos \delta)}{\omega V \Phi^2}. \quad (13)$$

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

$$R = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U_2^2 \sin \delta}{\omega V \Phi^2}, \quad (14)$$

$$X = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U_2^2 \cos \delta}{\omega V \Phi^2}. \quad (15)$$

Підставимо в вирази (14) і (15) вираз для  $U_2 = \frac{U_1}{w_1} = 6,28 f \Phi = \omega \Phi$ , одержимо вирази для активного  $R$  і реактивного  $X$  опорів контрольованого шару:

$$R = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 \omega \sin \delta}{V}, \quad (16)$$

$$X = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 \omega \cos \delta}{V}. \quad (17)$$

Зведені опори контрольованого шару

$$R' = R n^2 = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 w_1^2 \omega \sin \delta}{V}, \quad (18)$$

$$X' = X n^2 = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 w_1^2 \omega \cos \delta}{V}. \quad (19)$$

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

1. *Соболев В.С., Шкарлет Ю.М.* Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967.
2. *Гамалий В., Трушаков Д.* Моделювання вихорострумowego перетворювача з П-подібним магнітопроводом, розташованого над ферромагнітним зразком із тріщиною // Теор. електротехніка. 2005. Вип. 58. С. 176–182.
3. *Серебренніков С.В., Трушаков Д.В.* Дослідження вихорострумowych перетворювачів з П-подібним та стержневим осердями // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. 2005. Вип. 10. С. 126–130.
4. *Мартинов В., Трушаков Д.* Моделювання фізичних процесів у вихорострумowому перетворювачі при його взаємодії з контрольованим ферромагнітним зразком // Теор. лектротехніка. 2006. Вип. 59. С. 97–102.
5. *Поливанов К.М.* Ферромагнетики. М.: Государственное энергетическое издательство, 1957. 256 с.
6. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1973. 750 с.

**DETERMINATION THE PARAMETER OF EDDY-CURRENT  
TRANSFORMER WHICH INTERACTING WITH FERROMAGNETIC  
MATERIAL**

**V. Martinov, D. Trushakov**

*Kirovograd National Technical University  
University Str., 8, Kirovograd 25006, Ukraine  
Dmitriy-kntu@yandex.ru*

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.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕТОКОВОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СЛУЧАЕ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С  
ФЕРРОМАГНИТНЫМ ОБРАЗЦОМ**

В. Мартынов, Д. Трушаков

*Кировоградский национальный технический университет,  
просп. Университетский, 8, Кировоград 25006, Украина*

*[Dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:Dmitriy-kntu@yandex.ru)*

Приведены результаты теоретических исследований взаимодействия накладного вихретокового преобразователя с П-образным магнитопроводом и контролируемого ферромагнитного материала. Разработана упрощенная математическая модель и получены формулы для инженерного расчета внесенных в ВСП активного и реактивного сопротивлений, которые можно использовать для разработки вихретоковых дефектоскопов.

*Ключевые слова:* вихретоковый преобразователь, П-образный магнитопровод, контролируемый ферромагнитный образец, активное и реактивное сопротивления.

Стаття надійшла до редколегії 31.03.2010

Прийнята до друку 26.05.2010