

ВИЗНАЧЕННЯ ВНЕСЕНИХ ОПОРІВ ПІД ЧАС ВЗАЄМОДІЇ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З КОНТРОЛЬОВАНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ ЗРАЗКОМ

© Мартинов В.В., Трушаков Д.В., 2008

Наведено результати теоретичних досліджень взаємодії накладного вихрострумowego перетворювача з П-подібним магнітопроводом та контрольованого феромагнітного матеріалу. Отримано формули для інженерного розрахунку внесених у вихрострумний перетворювач активного та реактивного опорів у разі його взаємодії з контрольованим феромагнітним зразком. Результати досліджень можна використовувати у вихрострумній дефектоскопії.

In the work there has been presented the results of theoretical research of interaction between a laying-in U-type core eddy-current transformer and tested ferromagnetic material. Received equations for engineering calculation of introduced real resistance and reactance in eddy-current transformer which interacting with testing ferromagnetic material. The results of this research can be used for eddy-current defectoscopy.

Постановка проблеми. Характер взаємодії вихрострумowego перетворювача (ВСП) з провідним середовищем під час виконання дефектоскопії феромагнітних деталей та вузлів на практиці визначити важко. Це зумовлено складним математичним апаратом, що використовується для опису цієї взаємодії. Особливо складно описується взаємодія ВСП з П-подібним магнітопроводом та контрольованим феромагнітним зразком.

Аналіз останніх досліджень у цьому напрямку вихрострумовой дефектоскопії дає змогу дійти висновку, що досі проблему повністю ще не вирішено. Цю проблему було розглянуто в роботах [1–3].

Задачі дослідження. У цій роботі дослідження спрямоване на одержання формул для внесених опорів П-подібного ВСП у разі його взаємодії з феромагнітним зразком, враховуючи закони електромагнітного поля і теорії електричних кіл. У цих дослідженнях математична модель взаємодії ВСП та контрольованого феромагнітного зразка розроблена з врахуванням взаємної індукції зразка та обмотки ВСП. Натомість, у попередніх дослідженнях [3] математична модель ґрунтувалася на взаємодії електромагнітних полів обмотки ВСП з феромагнітним зразком.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо взаємодію П-подібного ВСП із феромагнітною пластиною (рис. 1).

Нехтуючи потоком розсіювання, визначимо магнітний потік в осерді ВСП і контрольованій області:

$$\Phi = \frac{wI}{\sum R_m}, \quad (1)$$

де w – кількість витків обмотки ВСП; I – діюче значення струму; $\sum R_m$ – сума магнітних опорів ділянок.

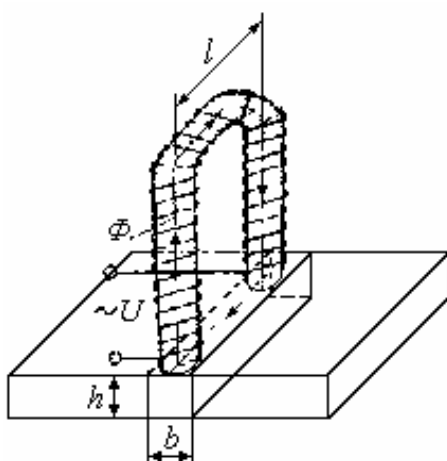


Рис. 1. Уявлений вигляд контрольованого феромагнітного зразка у вигляді пластины, що знаходиться під полюсами П-подібного ВСП

Магнітна індукція у контрольованій ділянці зразка

$$B = \frac{\Phi}{S_3}, \quad (2)$$

де S_3 – площа поперечного перерізу в контрольованій ділянці під ВСП.

Напруженість магнітного поля в контрольованій ділянці

$$H = \frac{B}{m_3 m_0}, \quad (3)$$

де m_3 – відносна магнітна проникність матеріалу зразка; $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – стала величина.

Магнітний потік в контрольованій ділянці створений струмом обмотки ВСП, тому щодо контрольованої ділянки його можна розглядати як потік взаємної індукції, тобто

$$\Phi = M \cdot I, \quad (4)$$

де M – коефіцієнт взаємної індукції обмотки ВСП і контрольованої ділянки.

Із виразу (4) маємо

$$M = \frac{\Phi}{I}. \quad (5)$$

Підставивши вираз (1) в вираз (5), отримаємо

$$M = \frac{w}{\sum R_m}. \quad (6)$$

Як відомо [4], напруженості електричного і магнітного полів у контрольованому середовищі зв'язані співвідношенням

$$\dot{E} = \underline{Z}_{en} \cdot \dot{H}, \quad (7)$$

де \underline{Z}_{en} – хвильовий опір матеріалу контрольованої ділянки.

Цей опір визначається властивостями середовища і частотою струму в обмотці ВСП [4]:

$$\underline{Z}_{en} = \sqrt{\frac{j\omega m_a}{g}}, \quad (8)$$

де ω – циклічна або кругова частоти струму обмотки ВСП; $m_a = m_3 \cdot m_0$ – абсолютна магнітна проникність матеріалу контрольованої ділянки; g – питома провідність цього матеріалу.

Підставивши вирази (8) і (3) в вираз (7), одержимо:

$$\dot{E} = \sqrt{\frac{j\omega}{g m_3 m_0}} \cdot \frac{\Phi}{S_3}. \quad (9)$$

Комплексна потужність, яка виділяється в контрольованій ділянці, визначається виразом [4]:

$$\underline{S} = \int_V g E^2 dV + j2\omega \int_V \left(\frac{m_a H^2}{2} - \frac{e_0 E^2}{2} \right) dV. \quad (10)$$

Перший доданок у виразі (10) зображає втрати від вихрових струмів, а другий – реактивну потужність.

Визначимо активну і реактивну складові потужності, вважаючи контрольовану ділянку паралелепіпедом з об'ємом $V_3 = S_3 \cdot l$, де l – довжина контрольованої ділянки:

$$P = g E^2 V_3 = \frac{w \Phi^2 l}{m_3 m_0 S_3}, \quad (11)$$

$$Q = \frac{w \Phi^2 l}{m_3 m_0 S_3} \left(1 - \frac{w e_0}{g} \right). \quad (12)$$

Отже, в контрольованій ділянці виділяється комплексна потужність

$$\underline{S} = P + jQ = \frac{w\Phi^2 l}{m_3 m_0 S_3} + j \frac{w\Phi^2 l}{m_3 m_0 S_3} \left(I - \frac{we_0}{g} \right). \quad (13)$$

З іншого боку \underline{S} можна визначити так [4]:

$$\underline{S} = \frac{U^2}{\underline{Z}^*}, \quad (14)$$

де U – напруга на кінцях контрольованої ділянки; \underline{Z}^* – спряжений комплексний опір контрольованої ділянки.

Із виразу (14) цей опір визначається так:

$$\underline{Z}^* = \frac{U^2}{\underline{S}}. \quad (15)$$

Напругу, яка виникає між кінцями контрольованої ділянки, вважаючи цю ділянку провідником, розміщеним у змінному магнітному полі, визначають за виразом [4]:

$$U = jw\Phi. \quad (16)$$

Підставивши в вираз (15) вирази (16) і (13), отримаємо

$$\underline{Z}^* = \frac{w^2 \Phi^2}{\frac{w\Phi^2 l}{m_3 m_0 S_3} \left(I + j \left(I - \frac{we_0}{g} \right) \right)}. \quad (17)$$

Після скорочення і перетворення дробу у виразі (17) маємо

$$\underline{Z}^* = \frac{wm_3 m_0 S_3}{l \left(I + j \left(I - \frac{we_0}{g} \right) \right)}. \quad (18)$$

Позбувшись комплексного числа у знаменнику, одержимо

$$\underline{Z}^* = \frac{wm_3 m_0 S_3 \left(I - j \left(I - \frac{we_0}{g} \right) \right)}{l \left(I + \left(I - \frac{we_0}{g} \right)^2 \right)}. \quad (19)$$

Комплексний опір контрольованої ділянки визначаємо за виразом

$$\underline{Z} = \frac{wm_3 m_0 S_3 \left(I + j \left(I - \frac{we_0}{g} \right) \right)}{l \left(I + \left(I - \frac{we_0}{g} \right)^2 \right)}. \quad (20)$$

Активний і реактивний опори контрольованої ділянки

$$R = \frac{wm_3 m_0 S_3}{l \left(I + \left(I - \frac{we_0}{g} \right)^2 \right)}, \quad (21)$$

$$X = \frac{wm_3 m_0 S_3 \left(1 - \frac{we_0}{g}\right)}{l \left(1 + \left(1 - \frac{we_0}{g}\right)^2\right)}. \quad (22)$$

Під впливом контрольованої ділянки опір обмотки ВСП змінюється на величину [5]:

$$R_{\text{вн}} = \frac{w^2 M^2 R}{R^2 + X^2}; \quad X_{\text{вн}} = -\frac{w^2 M^2 X}{R^2 + X^2}, \quad (23)$$

де $R_{\text{вн}}$, $X_{\text{вн}}$ – внесені активний і реактивний опори.

Підставивши в вираз (23) вирази (6),(21) і (22) і виконавши перетворення, одержимо співвідношення для обчислення внесених контрольованою ділянкою активного і реактивного опорів:

$$R_{\text{вн}} = \frac{ww^2 l}{m_3 m_0 S_3 (\sum R_M)^2}, \quad (24)$$

$$X_{\text{вн}} = \frac{-ww^2 l \left(1 - \frac{we_0}{g}\right)}{m_3 m_0 S_3 (\sum R_M)^2}. \quad (25)$$

Оцінімо порядок величини $\frac{we_0}{g}$. Для цього із довідників виберемо значення

$g = 7,692 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$; $e_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$, тоді одержимо $\frac{we_0}{g} = 7,232 \cdot 10^{-18} \cdot f$. Якщо робоча

частота досягає сотень мегагерц, ця величина буде дуже малою, порядку 10^{-10} , і нею можна знехтувати, тобто виходить, що

$$|R_{\text{вн}}| = |X_{\text{вн}}|. \quad (26)$$

Вирази (24),(25) для обчислення внесених активного і реактивного опорів одержані, враховуючи припущення, що магнітне поле, створене ВСП, зосереджується в об'ємі паралелепіпеда, обмеженого розмірами магнітного осердя ВСП. Зважаючи на те, що розміри виробу, який контролюється, більші від розмірів цього осердя, магнітне поле в контрольованій ділянці може займати об'єм, більший за об'єм $V_3 = S_3 l$. Це збільшення об'єму магнітного поля зумовлено тим, що змінне електромагнітне поле в об'ємі V_3 наводитиме електромагнітне поле в ділянках, прилеглих до об'єму V_3 . Розміри цих ділянок, відраховані від граней паралелепіпеда, необхідно вважати такими, що дорівнюють глибині проникнення електромагнітного поля у досліджуваний феромагнітний зразок [4]:

$$D = \sqrt{\frac{2}{wm_3 m_0 g}}. \quad (27)$$

Якщо в вираз (27) підставити значення $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$, $g = 7,692 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ і $w = 2\pi f$,

одержимо

$$D = \frac{0,181468184}{\sqrt{m_3 f}}, \quad (28)$$

де m_3 – відносна магнітна проникність контрольованого матеріалу; f – робоча частота ВСП.

Для феромагнітних матеріалів m_3 може мати значення від декількох одиниць до сотень одиниць. Тому при $m_3=10$ і $f=10^3 \text{ Гц}$ глибина проникнення електромагнітного поля в

контрольований феромагнітний зразок: $D = 0,00181468184$ м, тобто, близько 2 мм. Із збільшенням робочої частоти глибина проникнення D зменшуватиметься.

Формула для обчислення $R_{вн}$ і $X_{вн}$ з врахуванням збільшення об'єму, зайнятого магнітним полем, матиме вигляд

$$R'_{вн} = X'_{вн} = \frac{ww^2(l + 2D)}{m_3 m_0 (S_3 + 2D \cdot h) (\sum R_M)^2}, \quad (29)$$

де h – товщина контрольованого об'єкта.

Площа поперечного перерізу $S_3 = bh$, тому

$$R'_{вн} = X'_{вн} = \frac{ww^2 l \left(1 + \frac{2D}{l}\right)}{m_3 m_0 S_3 \left(1 + \frac{2D}{b}\right) (\sum R_M)^2} = R_{вн} \frac{1 + \frac{2D}{l}}{1 + \frac{2D}{b}}, \quad (30)$$

де $R_{вн}$ визначається за виразом (24).

Розглянемо відношення $\frac{R'_{вн}}{R_{вн}}$:

$$\frac{R'_{вн}}{R_{вн}} = \frac{1 + \frac{2D}{l}}{1 + \frac{2D}{b}}. \quad (31)$$

Як зрозуміло із виразу (31) $\frac{R'_{вн}}{R_{вн}}$ залежить від частоти і властивостей матеріалу контрольованої ділянки (D) і розмірів ВСП (l, b). Тому під час визначення внесених опорів обчислюється $R_{вн}$ за виразом (24), знаходимо відношення $\frac{R'_{вн}}{R_{вн}}$ за виразом (31) і вносимо поправку

на збільшення об'єму V_3 . У разі зростання робочої частоти D зменшується і відношення $\frac{R'_{вн}}{R_{вн}}$, наближаючись до одиниці.

Висновки. За виконаними теоретичними дослідженнями були отримані такі результати: 1) одержані вирази для визначення внесених активного та реактивного опорів у разі взаємодії вихрострумowego перетворювача з П-подібним магнітопроводом та контрольованого феромагнітного зразка, враховуючи закони електромагнітного поля і теорії електромагнітних кіл з врахуванням взаємної індукції зразка та обмотки вихрострумowego перетворювача; 2) знайдено коефіцієнт, який враховує вплив глибини проникнення електромагнітних хвиль на величину внесених опорів. Отримані вирази можна використати у вихрострумівій дефектоскопії феромагнітних виробів.

1. Гамалий В., Трушаков Д. Моделирование вихрострумowego перетворювача з П-подібним магнітопроводом, розташованого над феромагнітним зразком із тріщиною // Теор. Електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 176–182. 2. Смірнов Б.Г., Трушаков Д.В. Електромагнітні явища в вихрострумовому перетворювачі під час його взаємодії з феромагнітним зразком // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 563. – С. 127–134. 3. Мартинов В., Трушаков Д. Моделирование фізичних процесів в вихрострумовому перетворювачі при його взаємодії з контрольованим феромагнітним зразком // Теор. електротехніка. – 2006. – Вип. 59. 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1996. – 623 с. 5. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А.Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.