

Ю.В. ХОМЯК, асп., НТУ «ХПИ»

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Розроблено розрахункову модель для оцінки взаємодії вихорострумowego перетворювача з об'єктом, який має поверхневу тріщину. Наведено співвідношення для розрахунку залежностей сигналів вихорострумowego перетворювача від взаємного розташування його обмоток і поверхневої тріщини сталевго зразка. Були проведені якісні порівняння результатів розрахунків з використанням даної моделі і експериментальних даних.

The numerical model of interaction of eddy-current probe with an object that has a surface crack is developed. It is shown formulas for calculating the eddy-current probe signal. The comparison of calculation and experiment is performed.

Введение. Важное место в решении задач неразрушающего контроля занимают вихретоковые методы [1-3], обладающие существенными преимуществами по сравнению с другими. С целью создания новых современных приборов, реализующих вихретоковый метод, необходимо изучение его особенностей. Глубокое исследование вихретокового метода возможно выполнить только с помощью его математической модели.

Определение зависимостей сигналов вихретокового преобразователя (ВТП) от параметров дефектов сплошности является одной из важных задач дефектоскопии. Для оценки взаимодействия ВТП с объектом, который имеет поверхностную трещину существуют расчетные модели и методы [4-8]. Известные модели имеют сложный вычислительный аппарат как при аналитических (если возможно), так и численных расчетах.

Целью данной работы является разработка упрощенной математической модели взаимодействия ВТП с ферромагнитным образцом, содержащим трещину.

Основная часть. В работе [9] проведен теоритический анализ работы накладного трансформаторного ВТП и показано соотношение для выходного сигнала измерительной обмотки:

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \left(j\omega M_{13} + \omega^2 \frac{M_{12}M_{23}}{R_2 + j\omega L_2} \right), \quad (1)$$

где U_3 – сигнал измерительной обмотки; I_1 – ток возбуждающей обмотки; ω – циклическая частота; R_2, L_2 – эквивалентные электрические параметры исследуемого образца с трещиной; M_{13} – взаимная индуктивность между возбуждающей и измерительной обмотками; M_{12} –

взаимная индуктивность между возбуждающей обмоткой и ОК; M_{23} – взаимная индуктивность между измерительной обмоткой и ОК. Член $j\omega M_{13}$ не зависит от свойств ОК, а является лишь характеристикой преобразователя. Если использовать конструкцию ВТП представленную на рис. 1, то можно считать $M_{13} = 0$.

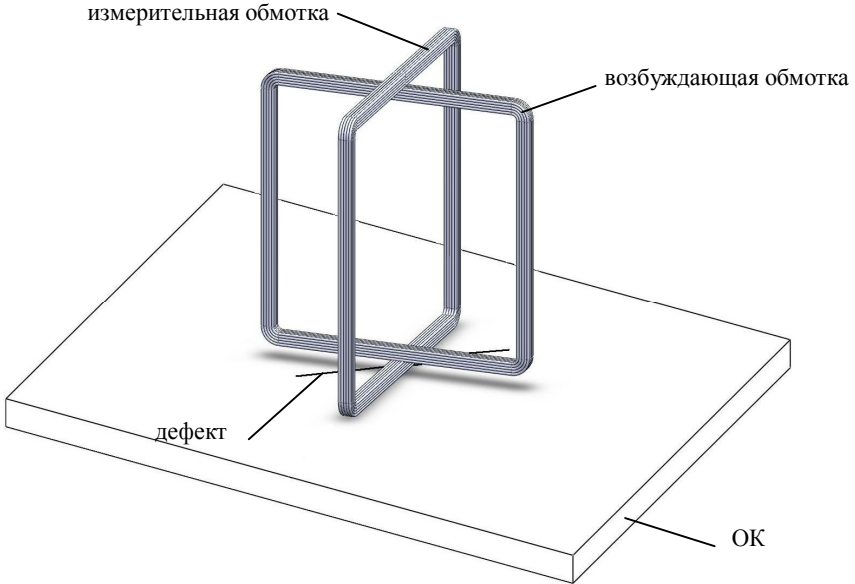


Рис. 1. Конструкция вихрекового преобразователя с ортогональными обмотками

Тогда выражение (1) примет вид

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \omega^2 \frac{M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что выходное напряжение вихрекового преобразователя является функцией взаимоиндуктивностей его обмоток с ОК:

$$\dot{U}_3 = f(M_{12} \cdot M_{23}). \quad (3)$$

В работах [4, 10, 11] показана возможность рассмотрения трещины, как системы линейных токов, совмещенных с контуром поверхностного

дефекта. Развивая данную мысль можно представить дефект как отрезок проводника с током [4].

На рис. 2 показана расчетная модель ВТП. Обмотки преобразователя и трещина представлены бесконечно тонкими проводниками.

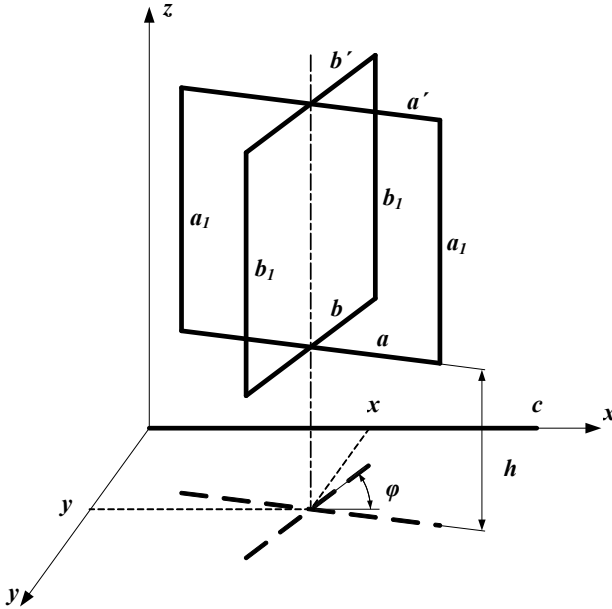


Рис.2. Расчетная модель взаимодействия ВТП с трещиной

На рисунке 2 обозначены: a – нижний участок возбуждающей обмотки; b – нижний участок измерительной обмотки; a_1 – боковая сторона возбуждающей обмотки; b_1 – боковая сторона измерительной обмотки; a' – верхний участок возбуждающей обмотки; b' – верхний участок измерительной обмотки; c – дефект; x, y – координаты проекции центра преобразователя; h – расстояние между дефектом и преобразователем (зазор); φ – угол между дефектом и измерительной обмоткой. Тогда искомые взаимоиנדуктивности можно принять:

$$M_{12} = M_{ac} - M_{a'c}; \quad M_{23} = M_{bc} - M_{b'c} \quad (4)$$

Для нахождения M_{ac} , $M_{a'c}$, M_{bc} , $M_{b'c}$ воспользуемся соотношениями для линейных участков [12]. Тогда для M_{ac} можно записать:

$$M_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \varphi \left(x_2 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{22} + D_{21}} + y_2 \operatorname{Arth} \frac{c}{D_{22} + D_{12}} - \right. \\ \left. - x_1 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{11} + D_{12}} - y_1 \operatorname{Arth} \frac{c}{D_{11} + D_{21}} + \frac{h}{\sin \varphi} A \right); \quad (5)$$

$$A = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_1 + y_1 + D_{11}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2 + y_2 + D_{22}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \\ - \operatorname{arctg} \left(\frac{x_1 + y_2 + D_{12}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2 + y_1 + D_{21}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right); \quad (6)$$

$$D_{11} = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (7)$$

$$D_{12} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (8)$$

$$D_{21} = \sqrt{\left(c - x - \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (9)$$

$$D_{22} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \cos \varphi - c \right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (10)$$

$$k^2 = D_{12}^2 + D_{21}^2 - D_{11}^2 - D_{22}^2; \quad (11)$$

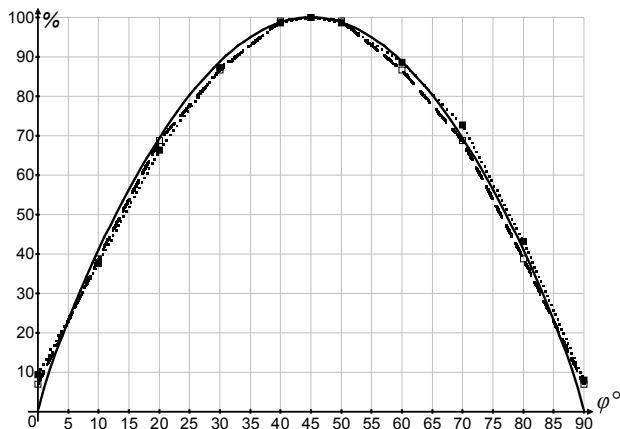
$$x_1 = \frac{2a^2(D_{21}^2 - D_{11}^2 - c^2) + k^2(D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2)}{4c^2a^2 - k^4}c; \quad (12)$$

$$y_1 = \frac{c^2(D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2) + k^2(D_{21}^2 - D_{11}^2 - c^2)}{4c^2a^2 - k^4}a; \quad (13)$$

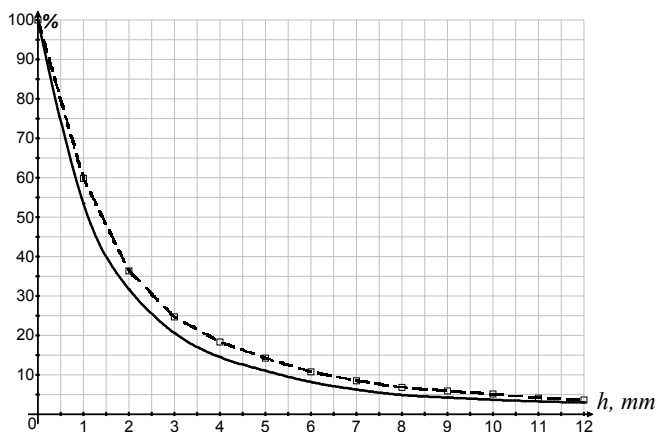
$$x_2 = x_1 + c; \quad y_2 = y_1 + a. \quad (14)$$

Для остальных участков вычисления производятся аналогично, в соответствующих координатах. Для $M_{a'c}$: вместо $h - h + a_1$; M_{bc} : вместо $\varphi - 90^\circ - \varphi$, вместо $a - b$; $M_{b'c}$: вместо $\varphi - 90^\circ - \varphi$, вместо $a - b$, вместо $h - h + b_1$.

На рис. 3 приведены результаты расчетов и экспериментов для угла ориентации преобразователя относительно трещины и для зазора.



а)



б)

Рис. 3 – Зависимости сигнала ВТП от угла (а) и зазора (б)
(расчетные кривые – сплошные)

Выводы. Результаты расчетов с использованием разработанной модели хорошо согласуются с экспериментами. Данная модель позволяет находить зависимости сигналов ВТП при заданных параметрах его обмоток и дефекта, а также их взаимного расположения. Целесообразно использовать такой подход для решения задач дефектоскопии вихретоковым методом.

Список литературы: 1. В.В. Клюев, Ю.К. Федосенко, В.Ф. Мужижкий. Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – №2. – с.4-9. 2. Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк. Развитие возможностей вихретоковой дефектоскопии // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – с.3–7. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с: ил. Вихретоковый контроль. Книга 2 / Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я.Останин. 4. Хомяк Ю.В. Фізична модель впливу тонкої поверхневої тріщини металевого зразка на накладний вихрострумний перетворювач // анотації доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – НТУ «ХП» – 2009. – С. 529. 5. П.Н. Шкатов. Математическая модель для решения задач электромагнитной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1988. – №1. – с.59-66. 6. В.М. Синеглазов, В.Г. Вовк. Математическое моделирование процесса вихретокового контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – с.26-29. 7. П.Н. Шкатов, С.В. Клюев. Математическое моделирование воздействия дефектов сплошности на вихретоковые преобразователи // Контроль. Диагностика. – 2005. – №6. – с.17-21. 8. В.Ф. Гамалий, С.В. Серебренников, Д.В. Трушаков. Математическое моделирование взаимодействия вихретокового преобразователя и ферромагнитного образца с трещиной // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – №2. – с.44-47. 9. Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк. Теоретическое исследование накладного вихретокового преобразователя с минимальной взаимной индуктивностью // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Харків: НТУ «ХП» – №48. – 2008. – с.100–103. 10. В.Е. Щербинин, М.Л. Шур, Р.В. Загидулин. Топография магнитного поля узкого поверхностного дефекта // Дефектоскопия. – 1986. – №7. – с.86-88. 11. Р.В. Загидулин. К расчету признаков классификации дефектов сплошности конечной протяженности в ферромагнитных изделиях // Дефектоскопия. – 1995. – №10. – с.50-58. 12. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.: ил.