УДК 620.179.14

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харків
Ю.В. ХОМЯК, аспирант, НТУ «ХПИ», Харків
М.В. ДОБРОБАБА, магистр, НТУ «ХПИ», Харків

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ НАКЛАДНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Досліджено модель для оцінки взаємодії вихорострумового перетворювача з об'єктом, який має поверхневу тріщину. Наведено математичні співвідношення для цієї моделі. Проведені розрахунки залежностей сигналів вихорострумового перетворювача від його геометричних параметрів та взаємного розташування обмоток і поверхневої тріщини в сталевому зразку.

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 calculation of dependence of signals of eddy-current probe from geometrical parameters and position was carried out.

Введение. В настоящее время большенство вихретоковых дефектоскопов имеют в своем составе вихретоковые преобразователи (ВТП) которые регистрируют первичное поле и поле дефекта – «классические ВТП» [1,2]. Такие ВТП одновременно служат источником возбуждения и регистрации вихревых токов в испытуемом объекте. Совмещение в одном преобразователе двух операций – возбуждение поля и измерения – является во многих, если не в большинстве, случаях не преимуществом, а скорее всего недостатком, так как здесь полностью исключается возможность (с целью повышения селективности метода) наиболее выгодного размещения измерительной обмотки относительно источника возбуждающего поля [3].

Для эффективной вихретоковой дефектоскопии металлоизделий авторами был разработан ортогональный вихретоковый преобразователь [4]. Его применение позволяет решать ряд задач для получения дефектоскопической информации с отстройкой от мешающих факторов, таких как влияние зазора, магнитной проницаемости, электрической проводимости объекта контроля (ОК) и т.п.

Основная часть. Целью данной работы является исследование математической модели взаимодействия ВТП с ферромагнитным образцом, содержащем трещину.

Для математического моделирования в работах [5-7] предложена модель взаимодействия ВТП с объектом, который содержит поверхностную трещину.

В модели приняты условия и ограничения, предусматривающие что вихревые токи в образце имеют поверхностную локализацию и они преимущественно направлены вдоль дефекта, то есть трещина рассматривается, как отрезок бесконечно тонкого проводника с током.

Обмотки преобразователя представлены бесконечно тонкими проводниками контур которых повторяет контур витков обмоток (рис. 1).

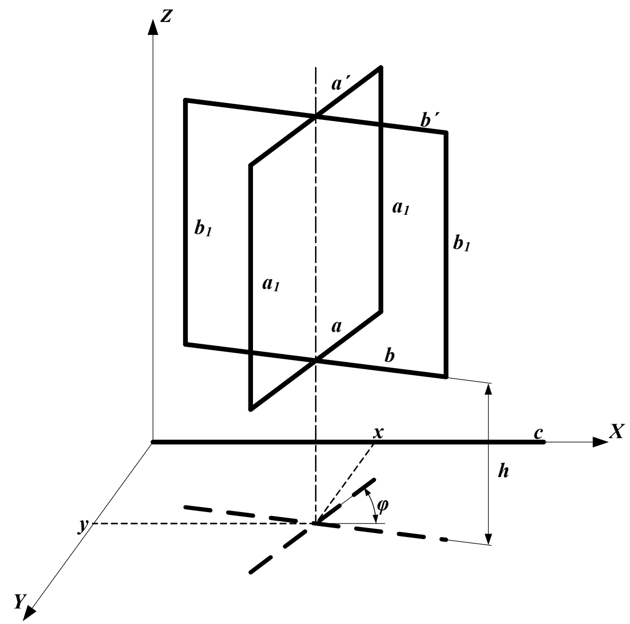


Рис.1. Расчетная модель взаимодействия ВТП с трещиной:
a – нижний участок возбуждающей обмотки; *b* – нижний участок измерительной обмотки; a_1 – боковая сторона возбуждающей обмотки; b_1 – боковая сторона измерительной обмотки; *a′* – верхний участок возбуждающей обмотки; *b′* – верхний участок измерительной обмотки; *c* – дефект; *x, y* – координаты проекции центральной части преобразователя; *h* – расстояние между плоскостью дефекта и преобразователем; *φ* – угол между дефектом и участком возбуждающей обмотки

В работе [8] авторами проведен теоритический анализ работы накладного трансформаторного ВТП и показано что выходное напряжение вихретокового преобразователя является функцией произведения взаимоиндуктивностей его обмоток с ОК:

$$U = f(M_{12} \cdot M_{23}), \qquad (1)$$

где U – сигнал измерительной обмотки; M_{12} – взаимная индуктивность возбуждающей обмотки и ОК; M_{23} – взаимная индуктивность измерительной обмотки и ОК.

Из предварительного анализа данной модели следует (рис. 1), что боковые участки возбуждающей и измерительной обмоток (a_1 и b_1) имеют нулевую взаимоиндукцию с дефектом, так как они ориентированы перпендикулярно к нему. Поэтому рассмотрим взаимоиндуктивности M_{ac}, $M_{a'c}$, M_{bc}, $M_{b'c}$ участков *a*, *a´*, *b*, *b´* с дефектом *c*. Тогда

$$M_{12} = M_{ac} - M_{a'c}\,,\; M_{23} = M_{bc} - M_{b'c}\,. \qquad (2)$$

Найдем указанные взаимоиндуктивности по методике [9] для геометрических параметров ВТП и координат в соответствии с рис. 1.

$$M_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi}\cos\varphi\left(\chi_{2ac}\operatorname{Arth}\frac{a}{D_{22ac}+D_{21ac}} + \gamma_{2ac}\operatorname{Arth}\frac{c}{D_{22ac}+D_{12ac}} - \right.$$

$$\left. - \chi_{1ac}\operatorname{Arth}\frac{a}{D_{11ac}+D_{12ac}} - \gamma_{1ac}\operatorname{Arth}\frac{c}{D_{11ac}+D_{21ac}} + \frac{h}{\sin\varphi}A_{ac}\right), \qquad (3)$$

где χ_{2ac} – расстояние дальнего конца отрезка *c* до общего перпендикуляра с *a*; γ_{2ac} – расстояние дальнего конца отрезка *a* до общего перпендикуляра с *c*; χ_{1ac} – расстояние ближнего конца отрезка *c* до общего перпендикуляра с *a*; γ_{1ac} – расстояние ближнего конца отрезка *a* до общего перпендикуляра с *c*; D_{11ac} – расстояние между ближними концами отрезков *a* и *c*; D_{12ac} – расстояние между ближним концом отрезка *c* и дальним концом отрезка *a*; D_{21ac} – расстояние между ближним концом отрезка *a* и дальним концом отрезка *c*; D_{22ac} – расстояние между дальними концами отрезков *a* и *c*; A_{ac} – коэффициент влияния зазора *h*. Перечисленные величины находятся по формулам (4-12):

$$D_{11ac} = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2 + h^2}\,; \qquad (4)$$

$$D_{12ac} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2 + h^2}\,; \qquad (5)$$

$$D_{21ac} = \sqrt{\left(c - x + \frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2 + h^2}\,; \qquad (6)$$

$$D_{22ac} = \sqrt{\left(c - x - \frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2 + h^2}\,; \qquad (7)$$

$$k_{ac}^2 = D_{12ac}^2 + D_{21ac}^2 - D_{11ac}^2 - D_{22ac}^2; \qquad (8)$$

$$\chi_{1ac} = \frac{2a^2\left(D_{21ac}^2 - D_{11ac}^2 - c^2\right) + k_{ac}^2\left(D_{12ac}^2 - D_{11ac}^2 - a^2\right)}{4c^2a^2 - k_{ac}^4}c; \qquad (9)$$

$$\gamma_{1ac} = \frac{2c^2\left(D_{12ac}^2 - D_{11ac}^2 - a^2\right) + k_{ac}^2\left(D_{21ac}^2 - D_{11ac}^2 - c^2\right)}{4c^2a^2 - k_{ac}^4}a; \qquad (10)$$

$$\chi_{2ac} = \chi_{1ac} + c\,,\; \gamma_{2ac} = \gamma_{1ac} + a\,; \qquad (11)$$

$$A_{ac} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{1ac} + \gamma_{1ac} + D_{11ac}}{h}\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{2ac} + \gamma_{2ac} + D_{22ac}}{h}\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) -$$

$$- \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{1ac} + \gamma_{2ac} + D_{12ac}}{h}\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{2ac} + \gamma_{1ac} + D_{21ac}}{h}\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right). \qquad (12)$$

Аналогично для взаимоиндуктивности между *a´* и *c* с учетом того что *a´* = *a*:

$$M_{a'c} = \frac{\mu_0}{2\pi}\cos\varphi\left(\chi_{2a'c}\operatorname{Arth}\frac{a}{D_{22a'c}+D_{21a'c}} + \gamma_{2a'c}\operatorname{Arth}\frac{c}{D_{22a'c}+D_{12a'c}} - \right.$$

$$\left. - \chi_{1a'c}\operatorname{Arth}\frac{a}{D_{11a'c}+D_{12a'c}} - \gamma_{1a'c}\operatorname{Arth}\frac{c}{D_{11a'c}+D_{21a'c}} + \frac{(h+a_1)}{\sin\varphi}A_{a'c}\right), \qquad (13)$$

где $\chi_{2a'c}$ – расстояние дальнего конца отрезка *c* до общего перпендикуляра с *a´*; $\gamma_{2a'c}$ – расстояние дальнего конца отрезка *a´* до общего перпендикуляра с *c*; $\chi_{1a'c}$ – расстояние ближнего конца отрезка *c* до общего перпендикуляра с *a´*; $\gamma_{1a'c}$ – расстояние ближнего конца отрезка *a´* до общего перпендикуляра с *c*; $D_{11a'c}$ – расстояние между ближними концами отрезков *a´* и *c*; $D_{12a'c}$ – расстояние между ближним концом отрезка *c* и дальним концом отрезка *a´*;

$D_{21a'c}$ – расстояние между ближним концом отрезка a' и дальним концом отрезка c; $D_{22a'c}$ – расстояние между дальними концами отрезков a' и c; $A_{a'c}$ – коэффициент влияния зазора $h+a_1$. Перечисленные величины находятся по формулам (14-22):

$$D_{11a'c}=\sqrt{\left(x-\frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2+\left(y-\frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2+(h+a_1)^2}\,; \tag{14}$$

$$D_{12a'c}=\sqrt{\left(x+\frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2+\left(y+\frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2+(h+a_1)^2}\,; \tag{15}$$

$$D_{21a'c}=\sqrt{\left(c-x+\frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2+\left(y-\frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2+(h+a_1)^2}\,; \tag{16}$$

$$D_{22a'c}=\sqrt{\left(c-x-\frac{a}{2}\cos\varphi\right)^2+\left(y+\frac{a}{2}\sin\varphi\right)^2+(h+a_1)^2}\,; \tag{17}$$

$$k_{a'c}^2=D_{12a'c}^2+D_{21a'c}^2-D_{11a'c}^2-D_{22a'c}^2; \tag{18}$$

$$\chi_{1a'c}=\frac{2a^2\left(D_{21a'c}^2-D_{11a'c}^2-c^2\right)+k_{a'c}^2\left(D_{12a'c}^2-D_{11a'c}^2-a^2\right)}{4c^2a^2-k_{a'c}^4}c; \tag{19}$$

$$\gamma_{1a'c}=\frac{2c^2\left(D_{12a'c}^2-D_{11a'c}^2-a^2\right)+k_{a'c}^2\left(D_{21a'c}^2-D_{11a'c}^2-c^2\right)}{4c^2a^2-k_{a'c}^4}a; \tag{20}$$

$$\chi_{2a'c}=\chi_{1a'c}+c\,,\ \ \gamma_{2a'c}=\gamma_{1a'c}+a\,; \tag{21}$$

$$A_{a'c}=\mathrm{arctg}\left(\frac{\chi_{1a'c}+\gamma_{1a'c}+D_{11a'c}}{h+a_1}\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}\right)+\mathrm{arctg}\left(\frac{\chi_{2a'c}+\gamma_{2a'c}+D_{22a'c}}{h+a_1}\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}\right)-$$

$$-\mathrm{arctg}\left(\frac{\chi_{1a'c}+\gamma_{2a'c}+D_{12a'c}}{h+a_1}\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}\right)-\mathrm{arctg}\left(\frac{\chi_{2a'c}+\gamma_{1a'c}+D_{21a'c}}{h+a_1}\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}\right). \tag{22}$$

Для взаимоиндуктивности между отрезками b и c запишем:

$$M_{bc}=\frac{\mu_0}{2\pi}\sin\varphi\left(\chi_{2bc}\,\mathrm{Arth}\frac{b}{D_{22bc}+D_{21bc}}+\gamma_{2bc}\,\mathrm{Arth}\frac{c}{D_{22bc}+D_{12bc}}-\right.$$

$$\left.-\chi_{1bc}\,\mathrm{Arth}\frac{b}{D_{11bc}+D_{12bc}}-\gamma_{1bc}\,\mathrm{Arth}\frac{c}{D_{11bc}+D_{21bc}}+\frac{h}{\cos\varphi}A_{bc}\right), \tag{23}$$

где χ_{2bc} – расстояние дальнего конца отрезка c до общего перпендикуляра с b; γ_{2bc} – расстояние дальнего конца отрезка b до общего перпендикуляра с c; χ_{1bc} – расстояние ближнего конца отрезка c до общего перпендикуляра с b; γ_{1bc} – расстояние ближнего конца отрезка b до общего перпендикуляра с c; D_{11bc} – расстояние между ближними концами отрезков b и c; D_{12bc} – расстояние между ближним концом отрезка c и дальним концом отрезка b; D_{21bc} – расстояние между ближним концом отрезка b и дальним концом отрезка c; D_{22bc} – расстояние между дальними концами отрезков b и c; A_{bc} – коэффициент влияния зазора h. Перечисленные величины находятся по формулам (24-32):

$$D_{11bc}=\sqrt{\left(x-\frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2+\left(y+\frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2+h^2}\,; \tag{24}$$

$$D_{12bc}=\sqrt{\left(x+\frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2+\left(y-\frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2+h^2}\,; \tag{25}$$

$$D_{21bc}=\sqrt{\left(c-x+\frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2+\left(y+\frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2+h^2}\,; \tag{26}$$

$$D_{22bc}=\sqrt{\left(c-x-\frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2+\left(y-\frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2+h^2}\,; \tag{27}$$

$$k_{bc}^2=D_{12bc}^2+D_{21bc}^2-D_{11bc}^2-D_{22bc}^2; \tag{28}$$

$$\chi_{1bc} = \frac{2b^2\left(D_{21bc}^2 - D_{11bc}^2 - c^2\right) + k_{bc}^2\left(D_{12bc}^2 - D_{11bc}^2 - b^2\right)}{4c^2b^2 - k_{bc}^4}c; \tag{29}$$

$$\gamma_{1bc} = \frac{2c^2\left(D_{12bc}^2 - D_{11bc}^2 - b^2\right) + k_{bc}^2\left(D_{21bc}^2 - D_{11bc}^2 - c^2\right)}{4c^2b^2 - k_{bc}^4}b; \tag{30}$$

$$\chi_{2bc} = \chi_{1bc} + c\,,\ \gamma_{2bc} = \gamma_{1bc} + b\,; \tag{31}$$

$$A_{bc} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{1bc} + \gamma_{1bc} + D_{11bc}}{h}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right) +$$

$$+ \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{2bc} + \gamma_{2bc} + D_{22bc}}{h}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right) -$$

$$- \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{1bc} + \gamma_{2bc} + D_{12bc}}{h}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right) -$$

$$- \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{2bc} + \gamma_{1bc} + D_{21bc}}{h}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right). \tag{32}$$

Аналогично для взаимоиндуктивности между b' и c с учетом того что $b' = b$:

$$M_{b'c} = \frac{\mu_0}{2\pi}\sin\varphi\left(\chi_{2b'c}\operatorname{Arth}\frac{b}{D_{22b'c} + D_{21b'c}} + \gamma_{2b'c}\operatorname{Arth}\frac{c}{D_{22b'c} + D_{12b'c}} -\right.$$

$$\left. - \chi_{1b'c}\operatorname{Arth}\frac{b}{D_{11b'c} + D_{12b'c}} - \gamma_{1b'c}\operatorname{Arth}\frac{c}{D_{11b'c} + D_{21b'c}} + \frac{h + b_1}{\cos\varphi}A_{b'c}\right), \tag{33}$$

где $\chi_{2b'c}$ – расстояние дальнего конца отрезка c до общего перпендикуляра с b'; $\gamma_{2b'c}$ – расстояние дальнего конца отрезка b' до общего перпендикуляра с c; $\chi_{1b'c}$ – расстояние ближнего конца отрезка c до общего перпендикуляра с b'; $\gamma_{1b'c}$ – расстояние ближнего конца отрезка b' до общего перпендикуляра с c; $D_{11b'c}$ – расстояние между ближними концами отрезков b' и c; $D_{12b'c}$ –

расстояние между ближним концом отрезка c и дальним концом отрезка b'; $D_{21b'c}$ – расстояние между ближним концом отрезка b' и дальним концом отрезка c; $D_{22b'c}$ – расстояние между дальними концами отрезков b' и c; $A_{b'c}$ – коэффициент влияния зазора $h+b_1$. Перечисленные величины находятся по формулам (34-42):

$$D_{11b'c} = \sqrt{\left(x - \frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2 + (h + b_1)^2}\,; \tag{34}$$

$$D_{12b'c} = \sqrt{\left(x + \frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2 + (h + b_1)^2}\,; \tag{35}$$

$$D_{21b'c} = \sqrt{\left(c - x + \frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2 + (h + b_1)^2}\,; \tag{36}$$

$$D_{22b'c} = \sqrt{\left(c - x - \frac{b}{2}\sin\varphi\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\cos\varphi\right)^2 + (h + b_1)^2}\,; \tag{37}$$

$$k_{b'c}^2 = D_{12b'c}^2 + D_{21b'c}^2 - D_{11b'c}^2 - D_{22b'c}^2; \tag{38}$$

$$\chi_{1b'c} = \frac{2b^2\left(D_{21b'c}^2 - D_{11b'c}^2 - c^2\right) + k_{b'c}^2\left(D_{12b'c}^2 - D_{11b'c}^2 - b^2\right)}{4c^2b^2 - k_{b'c}^4}c; \tag{39}$$

$$\gamma_{1b'c} = \frac{2c^2\left(D_{12b'c}^2 - D_{11b'c}^2 - b^2\right) + k_{b'c}^2\left(D_{21b'c}^2 - D_{11b'c}^2 - c^2\right)}{4c^2b^2 - k_{b'c}^4}b; \tag{40}$$

$$\chi_{2b'c} = \chi_{1b'c} + c\,,\ \gamma_{2b'c} = \gamma_{1b'c} + b\,; \tag{41}$$

$$A_{b'c} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{1b'c} + \gamma_{1b'c} + D_{11b'c}}{h + b_1}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right) +$$

$$+ \operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{2b'c} + \gamma_{2b'c} + D_{22b'c}}{h + b_1}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right) -$$

$$-\operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{1b'c}+\gamma_{2b'c}+D_{12b'c}}{h+b_1}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right)-$$

$$-\operatorname{arctg}\left(\frac{\chi_{2b'c}+\gamma_{1b'c}+D_{21b'c}}{h+b_1}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right). \tag{42}$$

Полученные аналитические выражения (2-42) позволяют определить функцию геометрических параметров ВТП и координат:

$$\frac{U}{U_{\max}}=\frac{(M_{12}\cdot M_{23})}{(M_{12}\cdot M_{23})_{\max}}=f(a,b,c,a_1,b_1,x,y,h,\varphi), \tag{43}$$

где $U/U_{\max}$ – нормированная амплитуда сигнала ВТП, исходя из (1); a,b,c,a_1,b_1 – геометрические параметры ВТП и дефекта; x,y,h,φ – координаты ВТП относительно дефекта (см. рис. 1).

Для обобщенного исследования зависимостей выходного сигнала ВТП были выбраны единичные отрезки пропорциональными размерам обмоток ВТП. Расчет модели и построение зависимостей осуществлялись с применением программных продуктов MS EXEL, MATLAB, Advanced Grapher.

Анализ полученных аналитических выражений показывает, что особенностью ВТП [4] является зависимость полезного сигнала от угла φ между дефектом и возбуждающей обмоткой. Это дает возможность идентифицировать ориентацию протяженной трещины. На рис. 2 – 4 приведены результаты моделирования зависимости сигнала от φ для различных длин дефекта, зазора и соотношения размеров обмоток ВТП (справа на рисунках эти зависимости представлены в полярной системе координат: $0 < \varphi < \pi/2$).

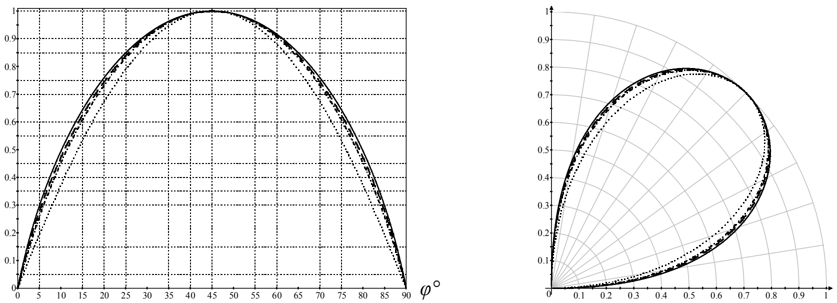


Рис. 2. Зависимость нормированной амплитуды от угла φ при различных длинах дефекта (—— – c=1; – – – c>10; −•−• – c=0,5; •••••• – c=0,1)

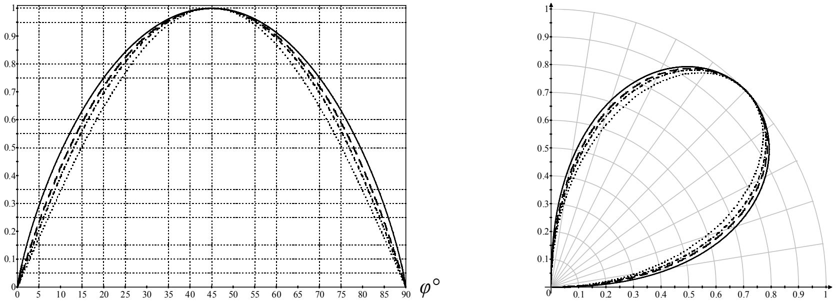


Рис. 3. Зависимость нормированной амплитуды от угла φ при различных зазорах (—— – h=0; – – – h=0.05; −•−• – h=0,1; •••••• – h=0,5)

Анализ данных, приведенных на рис. 2 – 3 показывает, что сигнал ВТП имеет максимумы при φ=45°, 135°, 225°, 315°, а форма зависимости $U/U_{\max}=f(\varphi)$ определяется величиной дефекта и зазора. Установлено наличие смещения максимума сигнала при различных соотношениях размеров возбуждающей и измерительной обмоток ВТП (рис. 4). Это дает возможность корректировать диаграмму направленности ВТП.

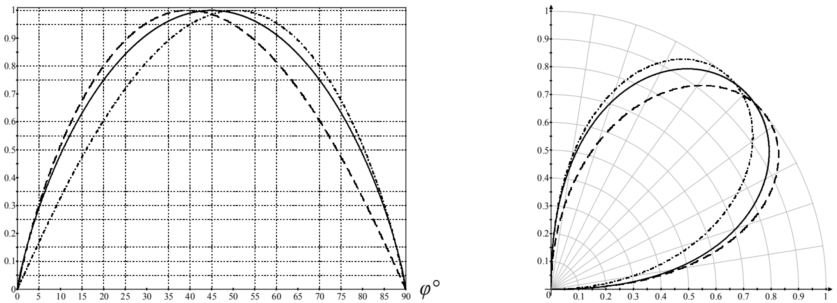


Рис. 4. Зависимость нормированной амплитуды от угла φ при разных отношениях длин обмоток ВТП (—— – a/b=1; – – – a/b =10; −•−• – a/b =0,1)

На рис. 5 приведены зависимости сигнала ВТП от длины трещины при различных зазорах. Видно, что при больших трещинах сигнал ВТП мало зависит от их длины, однако с увеличением зазора чувствительность к размеру трещины увеличивается.

Зависимость нормированной амплитуды сигнала от величины зазора представлена на рис. 6. Из анализа данных приведенных на рис. 6 следует, что чувствительность к влиянию зазора более существенна для коротких трещин.

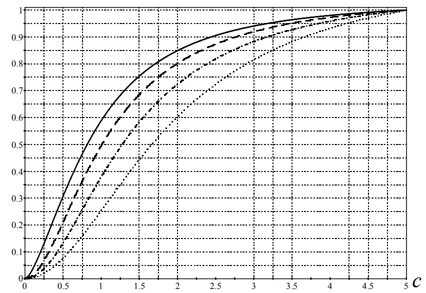


Рис. 5. Зависимость нормированной амплитуды от длины трещины c при различных зазорах (—— – h=0; – – – h=0,1; –·–· – h =0,25; ······ – h=0,5)

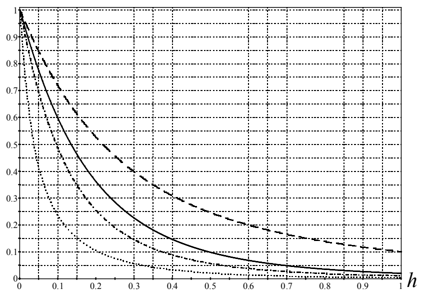


Рис. 6. Зависимость нормированной амплитуды от зазора h при различных длинах трещины (—— – c=1; – – – c=10; –·–· – c=0,5; ······ – c=0,1)

Для оценки влияния зазора при различных размерах a_1, b_1 (см. рис. 1) участков обмоток ВТП получены зависимости, представленные на рис. 7 – 8. При небольших зазорах выбор размеров a_1, b_1 не критичен, однако сигнал ВТП монотонно увеличивается при увеличении a_1 и b_1 пропорционально зазору. То есть, указанные размеры необходимо выбирать с учетом возможных рабочих зазоров или толщины неэлектропроводных покрытий.

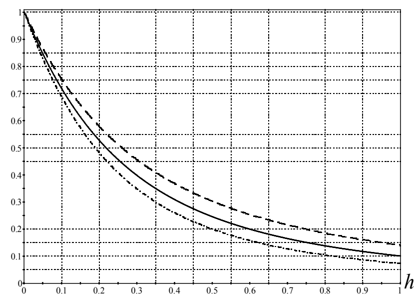


Рис. 7. Зависимость нормированной амплитуды от зазора h при различных длинах обмоток ВТП (—— – a_1=b_1=1; – – – a_1=b_1=2; –·–· – a_1=b_1=0,5)

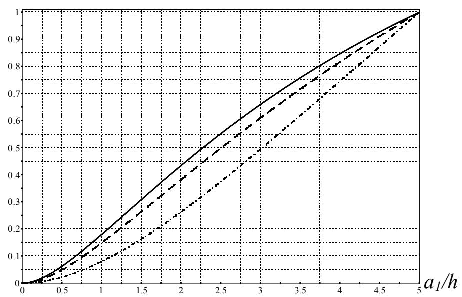
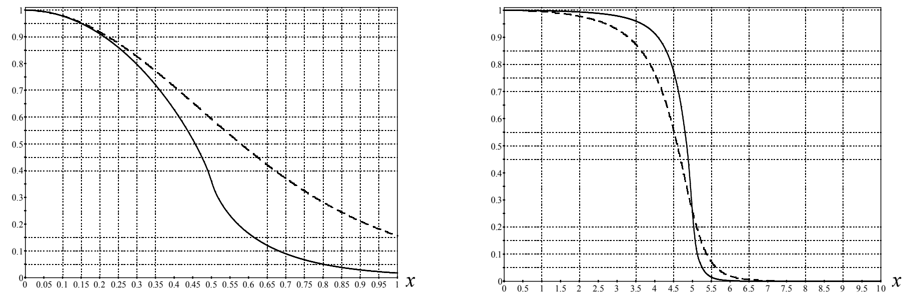


Рис. 8. Зависимость нормированной амплитуды от отношения a_1/h при различных зазорах (—— – h=1; – – – h=0,5; –·–· – h =0,1)

Зависимости амплитуды сигнала ВТП от перемещения вдоль короткого и длинного дефектов приведены на рис. 9. Точки перегиба графиков соответствуют краю дефектов. При увеличении зазора чувствительность к перемещению вблизи края дефекта уменьшается.



а) б)

Рис. 9. Зависимость нормированной амплитуды от перемещения x вдоль трещины c при различных зазорах (—— – h=0; – – – h=0,5): а) c=1; б) c=10

На рис. 10 – 11 представлены зависимости полезного сигнала ВТП от относительного перемещения x/c (0 соответствует середине дефекта, 0,5 – краю) для трещин различной длины. Из анализа данных следует, что чувствительность к перемещению вблизи края дефектов пропорциональна их размерам, то есть для протяженных дефектов возможно более точное определение их границ при сканировании.

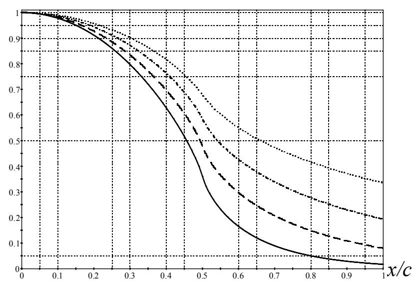


Рис. 10. Зависимость нормированной амплитуды от отношения x/c при различных длинах трещины (—— – c=1; – – – c=0,5; –·–· – c=0,25; ······ – c=0,1)

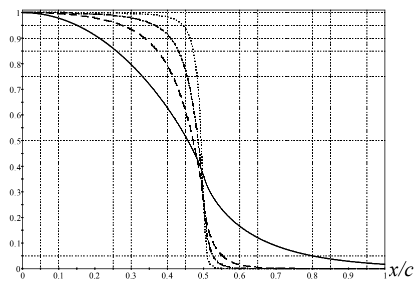


Рис. 11. Зависимость нормированной амплитуды от отношения x/c при различных длинах трещины (—— – c=1; – – – c=5; –·–· – c=10; ······ – c=25)

Для определения сигнала при перемещении ВТП от середины дефекта вдоль Y рассчитаны зависимости при различных размерах трещин (рис. 12) и зазоров (рис. 13).

Для рассмотренной модели также получены пространственные распределения сигнала ВТП при сканировании образца с поверхностной трещиной, рис. 14.

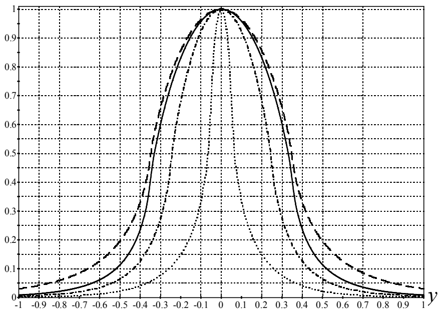


Рис. 12. Зависимость нормированной амплитуды от координаты y при различных длинах трещины (—— – c=1; – – – c>10; –·–· – c=0,5; ······ – c=0,1)

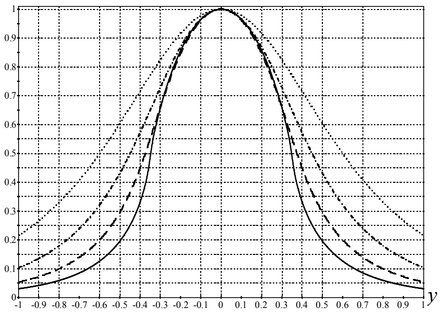


Рис. 13. Зависимость нормированной амплитуды от координаты y при различных зазорах (—— – h=0; – – – h=0,1; –·–· – h =0,25; ······ – h=0,5)

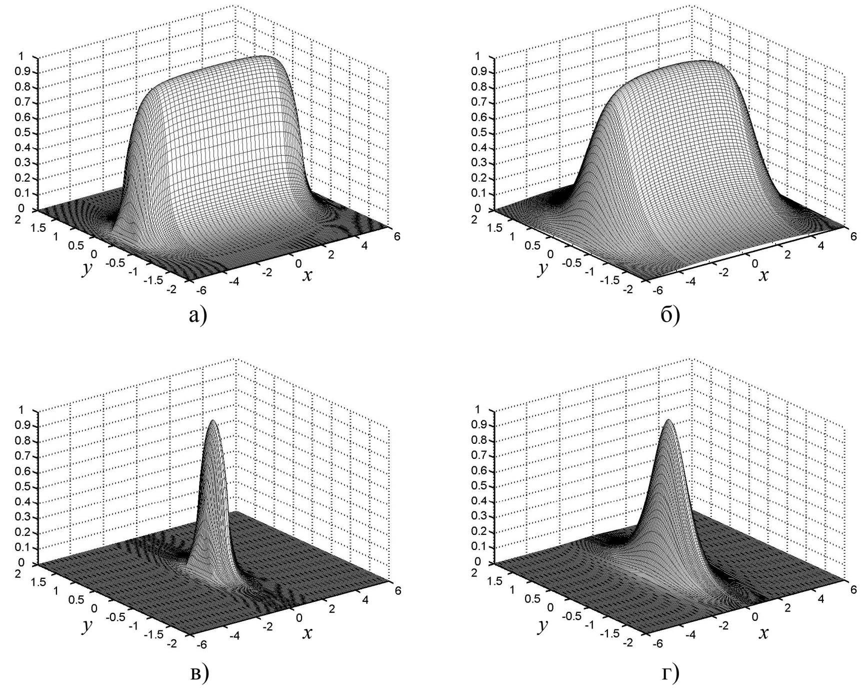


Рис. 14. Пространственное распределение сигнала ВТП:
а) c=10, h=0; б) c=10, h=0,5; в) c=1, h=0; г) c=1, h=0,5

Выводы. В данной работе получены аналитические зависимости сигналов ВТП от конструктивных и пространственных параметров, позволяющие расширить представление о закономерностях работы ортогонального вихретокового преобразователя. С помощью разработанной модели установлено, что сигнал ВТП имеет максимум при φ=45°, 135°, 225°, 315°, а форма зависимости $U/U_{\max} = f(\varphi)$ определяется величиной дефекта и зазора. При различных соотношениях размеров возбуждающей и измерительной обмоток ВТП наблюдается смещение максимума сигнала до ±10°. Показано, что для больших трещин сигнал ВТП мало зависит от их длины, однако с увеличением зазора чувствительность к размеру трещины увеличивается, а чувствительность к влиянию зазора существенна для коротких трещин. При небольших рабочих зазорах выбор размеров a_1, b_1 не критичен, однако сигнал ВТП монотонно увеличивается при увеличении a_1 и b_1 пропорционально зазору. При увеличении зазора чувствительность к перемещению ВТП вблизи края дефекта уменьшается. Исследованная модель позволяет находить пространственные распределения сигнала ВТП при сканировании образца с поверхностной трещиной. Используя результаты данной работы можно осуществить выбор параметров ортогонального ВТП для решения конкретных задач вихретоковой дефектоскопии.

Список литературы: **1.** Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн 2: Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин Вихретоковый контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.: ил. **2.** Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов). Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с. **3.** *Н.Н. Зацепин.* О некоторых особенностях формирования магнитного поля вихревых токов над поверхностными дефектами проводящих изделий. // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Матеріали Четвертої національної науково-технічної конференції, 19 – 23 травня 2003 р., Київ, 2003 р., с.98-100. **4.** Патент на корисну модель № 55471 UA, МПК G01N 27/90. Накладний вихорострумовий перетворювач для неруйнівного контролю / *Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк*; заяв. 05.07.2010; опубл. 10.12.2010. **5.** *Хомяк Ю.В.* Фізична модель впливу тонкої поверхневої тріщини металевого зразка на накладний вихорострумовий перетворювач // анотації доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – НТУ «ХПІ»– 2009. – С. 529. **6.** *Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк.* Расчетная модель ортогонального вихретокового преобразователя // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – Харків: НТУ «ХПІ» – №12. – 2010. – с.196–201. **7.** *Сучков Г.М., Хомяк Ю.В.* Розвиток моделі взаємодії вихорострумового перетворювача з металевим зразком, що містить поверхневу тріщину // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 27-28 квітня 2010 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2010. – с.217–218. **8.** *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 «ХПІ» – №48. – 2008. – с.100–103. **9.** *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.: ил.

Поступила в редколегію 20.05.11