

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ЯВИЩ

УДК 620.179.1

DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.11.2>

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО ВИХОРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПРОМІЖКУ МІЖ МАГНІТОПРОВОДОМ І ФЕРОМАГНІТНИМ ЗРАЗКОМ

Д. Трушаков¹, О. Козловський¹, С. Рендзіняк²

¹ *Центральноукраїнський національний технічний університет
просп. Університетський 8, 25006 Кропивницький, Україна
dmitro.trushakov@gmail.com*

² *Інститут енергетики і систем керування,
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна
serhii.y.rendziniak@lpnu.ua*

Стаття містить результати теоретичних досліджень взаємодії вихорострумового дефектоскопу зі зв'язаним вимірювальним коливальним контуром з трансформаторним зв'язком з феромагнітними зразками з метою підвищення точності вихорострумового контролю. В основу роботи вихорострумових дефектоскопів покладено резонансний спосіб відстроювання від впливу зазору. Досліджено взаємодію електромагнітного поля обмотки вихорострумового перетворювача з феромагнітним зразком. Такий прилад застосовують у вихорострумовій (електромагнітній) дефектоскопії для автоматичного і ручного контролю металевих виробів у випадках, коли важко здійснити фіксацію зазору між накладним вихорострумовим перетворювачем (котушкою індуктивності) з вимірювальним коливальним контуром і контрольованою поверхнею феромагнітного виробу. Вирішено проблему підвищення точності вихорострумового контролю шляхом уточненого розрахунку характеристик вимірювальної системи резонансного вихорострумового дефектоскопа.

Ключові слова: вихорострумова дефектоскопія, коливальний контур, вихорострумівий перетворювач.

Постановка проблеми. До складу вимірювальної системи вихорострумових дефектоскопів входять вихороструміві перетворювачі (ВСП) різних типів – зі стрижневим осердям, з П-подібним осердям, накладний, прохідний. При проведенні вихорострумової дефектоскопії при виявленні дефектів типу «тріщина» вихороструміві перетворювачі з П-подібним осердям у порівнянні зі звичайними стрижневими мають найбільшу чутливість до анізотропії властивостей контрольованого зразка, що вимагає удосконалення вимірювальних пристроїв і моделювання процесів у них.

Аналіз останніх досліджень. Розроблення нових підходів щодо виявлення дефектів типу «тріщина» вихорострумівими перетворювачами з П-подібним осердям у

порівнянні зі звичайними стрижневими, зокрема, дефектів зварного шва типу “непровар”, є актуальною проблемою, яка розглядається в багатьох працях, зокрема в [1-3]. В основу роботи запропонованих резонансних вихорострумів дефектоскопів покладено резонансний спосіб відстроювання від впливу зазору [4]. Цей спосіб полягає у виборі робочої точки на схилі резонансної кривої. При цьому способі використовують властивості коливального контуру. Резонансна частота і добротність коливального контуру залежать як від зміни зазору, так і від зміни характеристик матеріалу контролюваного виробу. Зміна зазору між накладним вихорострумів перетворювачем і поверхнею металевого виробу змінюватиме величину взаємного зв'язку між ними і таким чином змінювати імпеданс коливального контуру.

При дослідженні взаємодії трансформаторного П-подібного вихорострумів перетворювача з феромагнітним провідним середовищем розглядається переважно взаємодія електромагнітного поля обмотки вихорострумів перетворювача з феромагнітним зразком [4, 5].

Задачі дослідження. В основу дослідження поставлено проблему підвищення точності вихорострумів контролю. Вирішення цієї задачі досягається уточненням розрахунком вимірювальної системи резонансного вихорострумів дефектоскопа, яка містить зв'язаний вимірювальний коливальний контур у складі вихорострумів перетворювача з трансформаторним зв'язком.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що резонансні частоти ω_{01} , ω_{02} і добротності Q_1 , Q_2 зв'язаних коливальних контурів (рис. 1) розраховують за формулами

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad Q_1 = \frac{\omega_{01} L_1}{R_1}; \quad (1)$$

$$\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}, \quad Q_2 = \frac{\omega_{02} L_2}{R_2}. \quad (2)$$

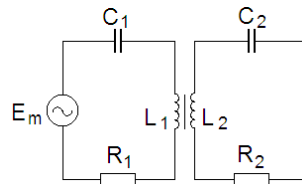


Рис. 1. Зв'язаний коливальних контур з трансформаторним зв'язком

Зв'язок між коливальними контурами характеризується взаємною індуктивністю M або коефіцієнтом зв'язку K

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (3)$$

Реактивні опори першого X_1 і другого X_2 коливальних контурів

$$X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}, \quad X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}. \quad (4)$$

Конструктивну схему запропонованого трансформаторного вихорострумowego перетворювача подано на рис. 2. Перетворювач має П-подібний симетричний магнітопровід, у центральній частині якого розміщена обмотка збудження 1, що має кількість витків w_1 , з боків – ідентичні вимірювальні напівобмотки 2.1 і 2.2, які увімкнені за диференціальною схемою. У якості ярма ВСП виступає феромагнітний об'єкт контролю (ОК). Отримане таким способом умовне ярмо має довжину, яка дорівнює відстані між полюсами магнітопроводу a перетворювача, та ширину d , рівну його діаметру d . Товщина ярма рівна товщині ОК δ , що є співрозмірною за величиною діаметру магнітопроводу ВСП. Отже, площа поперечного перерізу цього ярма складе $S = d\delta$, або $S = \pi r^2$ при заміні його еквівалентним круговим перерізом.

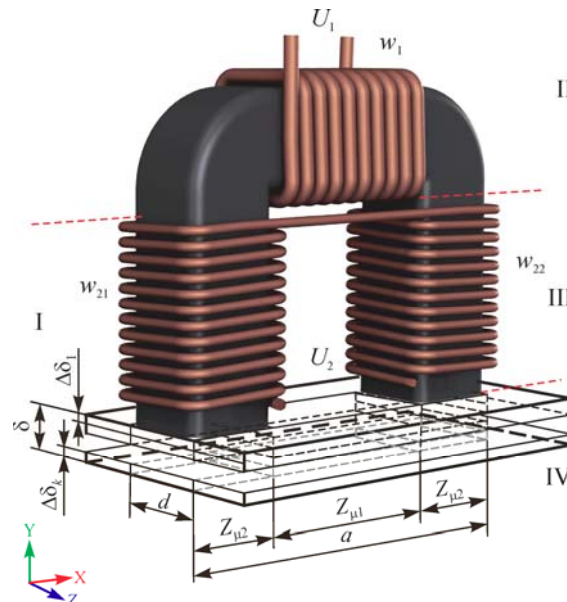


Рис. 2. Розрахункова модель ВСП з U-подібним магнітопроводом на контрольованій феромагнітній поверхні

Оскільки ВСП є симетричним вздовж осей Oy , Oz , тому вважаємо, що магнітний потік Φ розподілений у його магнітопроводі та об'єкті контролю рівномірно. Для зручності проведення розрахунків, розділимо магнітне коло на 4-ри ділянки: I, III, IV – з розподіленими параметрами; II – із зосередженими.

Схему заміщення магнітного кола «вихорострумований перетворювач - об'єкт контролю» подано на рис. 3. Дефект у феромагнітному зразку типу «тріщина» враховано шляхом введення опору повітряного зазору $R_{0,d}$, якщо він відсутній то $R_{0,d} = 0$.

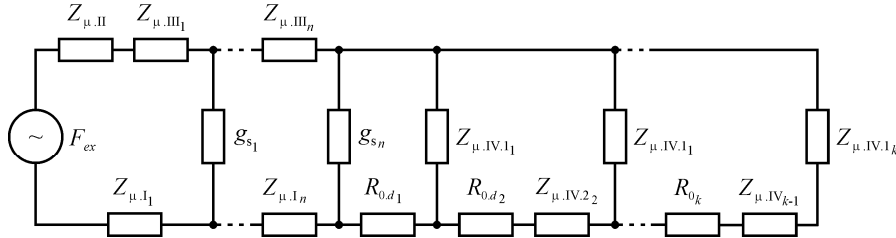


Рис. 3. Схема заміщення магнітного кола ВСП-ОК

Параметри ділянок I, III можливо вважати постійними, а отже – описати їх за допомогою системи лінійних рівнянь [6]:

$$\begin{cases} -\frac{dU_y}{dy} = (Z_{\mu,I,y} + Z_{\mu,III,y})\Phi_y \\ -\frac{d\Phi_y}{dy} = \underline{Y}_s U_y \end{cases}, \quad (5)$$

де U_y – різниця магнітних потенціалів між стержнями ділянок I та III; Φ_y – магнітний потік у стержнях; $Z_{\mu,I,y}$, $Z_{\mu,III,y}$ – комплексні магнітні опори одиниці довжини, відповідно, ділянок I та III; \underline{Y}_s – комплексна магнітна провідність між стержнями I та III, віднесена до одиниці довжини.

Розв'язком системи рівнянь (5) при $y = l$ і граничних умовах: $U_{y=l} = U_y$, $\Phi_{y=l} = \Phi_w - \Phi_{ок}$ є рівності [6]:

$$U_y = U_l \operatorname{ch}\left(\sqrt{Z_{\mu}\underline{Y}}\left(1-\frac{y}{l}\right)\right) + (\Phi_w - \Phi_{ок})\sqrt{\frac{Z_{\mu}}{\underline{Y}}}\operatorname{sh}\left(\sqrt{Z_{\mu}\underline{Y}}\left(1-\frac{y}{l}\right)\right), \quad (6)$$

$$\Phi_y = U_l\sqrt{\frac{Z_{\mu}}{\underline{Y}}}\operatorname{sh}\left(\sqrt{Z_{\mu}\underline{Y}}\left(1-\frac{y}{l}\right)\right) + (\Phi_w - \Phi_{ок})\operatorname{ch}\left(\sqrt{Z_{\mu}\underline{Y}}\left(1-\frac{y}{l}\right)\right), \quad (7)$$

де \underline{Y} – повна комплексна магнітна провідність між стержнями I та III і повна магнітна провідність розсіювання між ними; Φ_w – робочий магнітний потік; $\Phi_{ок}$ – магнітний потік, що пронизує об'єкт контролю; l – довжина ділянки I (III) магнітопроводу ВСП; $U_l = Z_{\mu,IV}(\Phi_w - \Phi_{ок})$ – різниця магнітних потенціалів між стержнями I та III; $\Phi_w - \Phi_{ок}$ – результуючий магнітний потік у стержнях I та III при $y = l$; Z_{μ} – повний комплексний опір ділянок I та III; $Z_{\mu,IV}$ – еквівалентний комплексний магнітний опір об'єкту контролю.

Для визначення $Z_{\mu,IV}$, що входить у (6), (7) розіб'ємо умовно об'єкт контролю, що знаходиться під полюсами ВСП на k -шарів однакової товщини $\Delta\delta$ (рис. 2). Якщо представити кожен елементарний шар феромагнітного матеріалу як суму двох магнітних опорів [7], тоді комплексний магнітний опір k -го шару становитиме

$$Z_{\mu,IV,k} = Z_{\mu,1} + kZ_{\mu,2} + R_{0,d,k}, \quad (8)$$

де $R_{0.d.k}$ – сумарний опір дефектів (повітряних зазорів) k -го шару ОК [7], $R_{0.d.k} = 2d / \mu_0 S_m$, S_m – площа поперечного перерізу магнітопроводу у зоні повітряного зазору; $Z_{\mu.1}$, $Z_{\mu.2}$ – повний опір, відповідно, ділянок 1 та 2 (рис. 2):

$$Z_{\mu.1} = \left(\frac{a}{d\Delta\delta_i} \right) [\rho_R + j\rho_X], \quad Z_{\mu.2} = \left(\frac{\delta}{d\Delta\delta_i} \right) [\rho_R + j\rho_X];$$

ρ_R, ρ_X – питомі активний і реактивний опори матеріалу ОК.

Тоді магнітний потік, що замикається по феромагнітному зразку, дорівнює:

– під першим полюсом

$$\Phi_{ок.1} = I_1 w_1 \left[\frac{1}{Z_{\mu.e}} + \sum_1^k \frac{1}{(R_{0.d.1.k} + Z_{\mu.1} + kZ_{\mu.2})} \right], \quad (9)$$

– під другим полюсом

$$\Phi_{ок.2} = I_1 w_2 \left[\frac{1}{Z_{\mu.e}} + \sum_1^k \frac{1}{(R_{0.d.2.k} + Z_{\mu.1} + kZ_{\mu.2})} \right], \quad (10)$$

де I_1 – струм обмотки збудження; $Z_{\mu.e}$ – магнітний опір ВСП: $Z_{\mu.e} = Z_{\mu.1} + Z_{\mu.11} + Z_{\mu.111}$.

Оскільки вимірювальні обмотки з'єднані послідовно-зустрічно, то вихідна електрорушійна сила (ЕРС) на їх затискачах дорівнюватиме:

$$\underline{E}_2 = -j\omega w_{21} \int_0^l \underline{\Phi}_{I,y} dy + j\omega w_{22} \int_0^l \underline{\Phi}_{III,y} dy, \quad (11)$$

Оскільки $-\underline{\Phi}_{I,y} = \underline{\Phi}_y$ і $\underline{\Phi}_{III,y} = \underline{\Phi}_y$, то (11) набуде вигляду:

$$\underline{E}_2 = \underline{E}_2^{(1)} + \underline{E}_2^{(2)} + \underline{E}_2^{(3)} + \underline{E}_2^{(4)}, \quad (12)$$

де $\underline{E}_2^{(1)} = -j\omega w_{21} \int_0^l \underline{U}_l \sqrt{\frac{Z_{\mu}}{Y}} \operatorname{sh} \left(\sqrt{Z_{\mu} Y} \left(1 - \frac{y}{l} \right) \right) dy$;

$\underline{E}_2^{(2)} = -j\omega w_{21} \int_0^l \left(\underline{\Phi}_w - I_1 w_1 \left[\frac{1}{Z_{\mu.e}} + \sum_1^k \frac{1}{(R_{0.d.1.k} + Z_{\mu.1} + kZ_{\mu.2})} \right] \right) \operatorname{ch} \left(\sqrt{Z_{\mu} Y} \left(1 - \frac{y}{l} \right) \right) dy$;

$\underline{E}_2^{(3)} = j\omega w_{22} \int_0^l \underline{U}_l \sqrt{\frac{Z_{\mu}}{Y}} \operatorname{sh} \left(\sqrt{Z_{\mu} Y} \left(1 - \frac{y}{l} \right) \right) dy$;

$\underline{E}_2^{(4)} = j\omega w_{22} \int_0^l \left(\underline{\Phi}_w - I_1 w_2 \left[\frac{1}{Z_{\mu.e}} + \sum_1^k \frac{1}{(R_{0.d.2.k} + Z_{\mu.1} + kZ_{\mu.2})} \right] \right) \operatorname{ch} \left(\sqrt{Z_{\mu} Y} \left(1 - \frac{y}{l} \right) \right) dy$.

Розв'язавши рівняння (12), отримаємо такі складові ЕРС вторинної обмотки ВСП:

$$\underline{E}_2^{(1)} = -j\omega w_{21} \frac{-U_l l}{\underline{Y}} (1 - \operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}_\mu \underline{Y}});$$

$$\underline{E}_2^{(2)} = -j\omega w_{21} \frac{l}{\sqrt{\underline{Z}_\mu \underline{Y}}} \operatorname{sh}(\sqrt{\underline{Z}_\mu \underline{Y}}) \left(\Phi_w - I_1 w_1 \left[\frac{1}{\underline{Z}_{\mu,e}} + \sum_1^k \frac{1}{(R_{0,d,1,k} + \underline{Z}_{\mu,1} + k \underline{Z}_{\mu,2})} \right] \right);$$

$$\underline{E}_2^{(3)} = j\omega w_{22} \frac{-U_l l}{\underline{Y}} (1 - \operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}_\mu \underline{Y}});$$

$$\underline{E}_2^{(4)} = j\omega w_{22} \frac{l}{\sqrt{\underline{Z}_\mu \underline{Y}}} \operatorname{sh}(\sqrt{\underline{Z}_\mu \underline{Y}}) \left(\Phi_w - I_1 w_1 \left[\frac{1}{\underline{Z}_{\mu,e}} + \sum_1^k \frac{1}{(R_{0,d,2,k} + \underline{Z}_{\mu,1} + k \underline{Z}_{\mu,2})} \right] \right).$$

На основі представлені математичної моделі розроблено вихорострумий дефектоскоп, структурну схему якого подано на рис. 4 [7]. Його вимірювальна підсистема містить два ідентичні коливальні контури з трансформаторним зв'язком: зв'язаний вимірювальний та зв'язаний еталонний. До складу вимірювального коливального контуру входить накладний вихорострумий перетворювач, що встановлюється на контрольовану поверхню феромагнітного виробу з деяким «заважаючим» зазором, що виникає, наприклад, внаслідок забруднення поверхні. Вихід автогенератора, що є джерелом синусоїдної напруги, приєднано паралельно до входів зв'язаного вимірювального та зв'язаного еталонного коливальних контурів. Вихід зв'язаного вимірювального коливального контуру підключено через фільтр високих частот до індикатора. Крім того, виходи зв'язаного вимірювального і зв'язаного еталонного з коливальних контурів під'єднані до входів суматора, вихід якого приєднано через фільтр низьких частот до керуючого входу автогенератора.

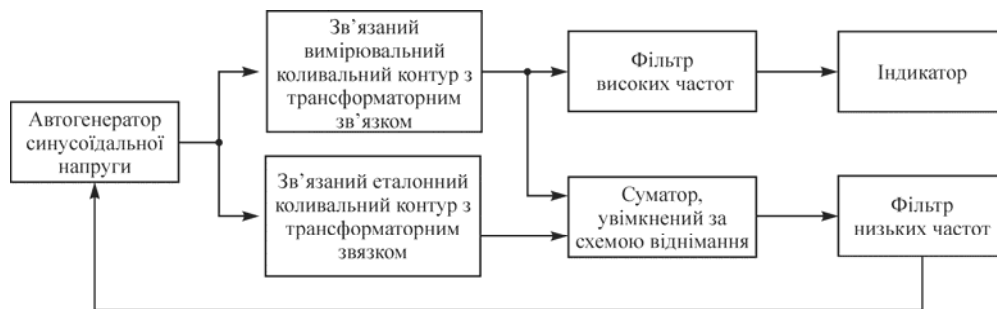


Рис. 4. Структурна схема вихорострумного дефектоскопу

Вихорострумий дефектоскоп працює наступним чином (рис. 4). Автогенератор збуджує підключені до його виходу зв'язаний вимірювальний зв'язком і зв'язаний еталонний коливальні контури з трансформаторним зв'язком. Автоматичне настроювання частоти автогенератора виконується наступним чином. Вихідна напруга зв'язаного вимірювального з трансформаторним зв'язком коливального контуру, яка пропорційна величині зазору, надходить на перший вхід суматора. Одночасно на другий

вхід суматора надходить вихідна напруга із зв'язаного еталонного коливального з трансформаторним зв'язком контуру. Сигнали у вигляді вихідних напруг зв'язаного вимірювального коливального контуру і зв'язаного еталонного коливального контуру порівнюються у суматорі за амплітудою. Внаслідок цього на виході суматора, який увімкнений за схемою віднімання, в залежності від співвідношення сигналів утворюється різницевий сигнал, який проходячи через фільтр низьких частот надходить на керуючий вхід автогенератора і змінює його частоту. В результаті автогенератор виробляє таку частоту, при якій сигнали із зв'язаного вимірювального з трансформаторним зв'язком коливального контуру та зв'язаного еталонного з трансформаторним зв'язком коливального контуру будуть однаковими. При цьому відбувається відстроювання від впливу такого заважаючого фактору, як коливання зазору між накладним вихорострумовим перетворювачем, який входить у зв'язаний вимірювальний з трансформаторним зв'язком коливальний контур 2, та контрольованою поверхнею феромагнітного виробу. Поява тріщини призводить до різкої зміни вихідного сигналу із зв'язаного вимірювального коливального контуру з трансформаторним зв'язком. Такі швидкі імпульсні зміни згладжуються фільтром низьких частот і не впливають на настройку автогенератора. У випадку, якщо знайдено дефект типу «тріщина», сигнал від вихорострумового перетворювача має характер короткого імпульсу, знаходиться у смузі пропускання фільтра високих частот і надходить на індикатор. Сигнал, який обумовлено зміною зазору є повільним та знаходиться у смузі пропускання фільтра низьких частот і подається на керуючий вхід автогенератора. Цим досягається підтримка постійного значення частоти у зв'язаному вимірювальному з трансформаторним зв'язком коливальному контурі, при якій здійснюється відстроювання від впливу коливань зазору між накладним вихорострумовим перетворювачем і контрольованою поверхнею феромагнітного виробу.

Висновки.

У результаті теоретичного дослідження отримано вираз вихідної електрорушійної сили у вимірювальній обмотці П-подібного вихорострумового перетворювача з трансформаторним зв'язком, що дає змогу підвищити точність вихорострумового контролю через взаємодію електромагнітного поля П-подібного вихорострумового перетворювача з трансформаторним зв'язком та контрольованого феромагнітного зразка.

Побудовано структурну схему вихорострумового дефектоскопу для контролю металевих виробів, в основу роботи якого покладено запропонований спосіб. Розроблена структура вихорострумового дефектоскопу забезпечує більш точне виявлення дефектів типу «тріщина» при проведенні вихорострумової дефектоскопії феромагнітних деталей та виробів.

Розроблений метод вихорострумової дефектоскопії дефектів феромагнітних виробів типу «тріщина» захищено патентом України [8].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // Sensors (2011). – 11. – P. 2525–2565; (doi:10.3390/s110302525).*

2. *Stupakov O., Kikuchi H., Liu T., Takagi T.* Applicability of local magnetic measurements // Measurement. – 2009. – Vol. 42. – Issue 5. – P. 706-710.
3. *Jindřich Jansa, Karel Slobodnik, Pavel Karban, Ivo Doležel.* Cross-correlation technique for revealing defects in pulsed eddy current defectoscopy //Electrical Engineering. – No 77. – 2014. – P. 47-53.
4. *Martinov Vitaliy V., Trushakov Dmitry V.* Simulation of physical processes in eddy-current transformer during its interection with the tested ferromagnetic specimen. // Przegląd elektrotechniczny (VIIIth International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”). – Poland: Wilkasy. – 2007. – P.208-210.
5. *Namola O.* Electromagnetic circuit model of eddy-current defectoscope / O. Namola, M. Namola, V. Horyachko // Computational problems of electrical engineering. - 2013. – Vol. 3. – № 1. – P. 25-28
6. *Нерсесян В.Б.* Расчет токовых вихревого преобразователя трансформаторного типа на основе теории цепей с распределенными параметрами // Известия академии наук Армянской ССР. – 1985. – Том XXXVIII. – No 1. – P.30-36/
7. *Гамалий В.Ф.* Математическое моделирование взаимодействия вихретокового преобразователя и ферромагнитного образца с трещиной / В.Ф. Гамалий, С.В. Серебрянников, Д.В. Трушаков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – №2. – С. 46–48.
8. Патент 63505 Україна, МПК (2011.01) G01N 27/00. Спосіб відстроювання від впливу зазору у вихорострумівій дефектоскопії ферромагнітних виробів / Д. В. Трушаков, В.В. Мартинов; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. № 201103291; заяв. 21.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл. № 19.

SIMULATION OF THE RESONANT EDDY-CURRENT CONVERTER OF THE TRANSFORMER TYPE FOR THE GAP CONTROL BETWEEN MAGNETIC CORE AND FERROMAGNETIC SAMPLES

D. Trushakov¹, O. Kozlovskiy¹, S. Rendzinyak²

¹ *Central Ukrainian National Technical University,
8 University Av., UA–25006 Kropivnitskiy, Ukraine
dmityro.trushakov@gmail.com*

² *Institute of Power Engineering and Control System,
Lviv Polytechnic National University,
12 S. Bandera St., UA–79013 Lviv, Ukraine
serhii.y.rendziniak@lpnu.ua*

The results of theoretical researches of the interaction between resonant eddy-current converter of the transformer type with a coupled measuring oscillatory circuit and ferromagnetic samples for improve the accuracy of the eddy-current control are presented. The main operation procedure of the eddy-current converter is the resonant method of adjustment from the effect of the gap. The interaction of the electromagnetic field of the winding of the eddy-current converter and the ferromagnetic sample is investigated.

On the basis of the presented mathematical model, the eddy-current defectoscope was improved. Its measuring subsystem contains two identical oscillatory circuits with a transformer

coupling, namely the coupled measuring and standard circuits. The measuring oscillatory circuit consists of an overhead eddy-current current converter, which is installed on a controlled surface of a ferromagnetic product with some appear gap due to surface dirtying. The output of the sinusoidal self-oscillator is connected in parallel to the inputs of the connected measuring and associated reference oscillatory circuits. The output of the connected measuring oscillatory circuit is connected through the high pass filter to the indicator. The outputs of the connected measuring and associated reference oscillatory circuits are connected to the inputs of the adder, the output signal of which is stimulated to the control input of the sinusoidal self-oscillator through a low pass filter.

The appearance of the crack results in a sharp change in the output signal from the coupled measuring oscillatory circuit with a transformer coupling. Such fast impulse changes are smoothed by the low pass filter and do not affect the self-oscillator, but the signal from them is received to the indicator. The signal due to the gap change is slow and take places in the bandwidth of the low pass filter and is received to the controller input of the self-oscillator. It thus maintains a constant value of the frequency in a coupled measuring oscillatory circuit of the transformer type.

Such an appliance is used in the eddy-current (electromagnetic) defectoscopy for automatic and manual control of metal products in cases where it is important to fix the gap between the overhead eddy-current converter (inductor) with the measuring oscillatory circuit and the controlled surface of the ferromagnetic product. The problem of increase the accuracy of the eddy-current control by the specified calculation of the characteristics of the measuring system of the resonance eddy-current defectoscopy is solved.

Key words: eddy-current defectoscopy, oscillatory circuit, eddy-current converter.

Стаття: надійшла до редакції 25.03.2019,
доопрацьована 09.03.2019,
прийнята до друку 11.04.2019