

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАЛЬНОГО РЕЖИМУ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

Ю. Ю. Лисенко¹, Ю. В. Куц¹, В. М. Учанін², В. Ф. Петрик¹

¹ Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: j.lysenko@kpi.ua, vuchanin@gmail.com

Проаналізовано формування сигналів вихрострумів перетворювачів в імпульсному режимі роботи. Запропоновано метод реалізації імпульсного вихрострумівого контролю з формуванням загасаючих гармонічних коливань, який стійкіший до впливу шумів і завад, що супроводжують автоматизоване дослідження параметрів виробів і матеріалів. Розроблено та проаналізовано еквівалентну схему системи “об’єкт контролю–вихрострумівий перетворювач”. Отримана математична модель сигналів вихрострумівого перетворювача дала змогу запропонувати як інформативні параметри частоту власних коливань та коефіцієнт загасання, які визначають з фазової та амплітудної характеристик сигналів. На основі результатів моделювання розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, яке реалізує запропоновану методологію визначення цих параметрів та пов’язаних з ними характеристик об’єктів контролю. Цей метод експериментально досліджено на серіях різних тестових зразків. Отримані результати підтверджують можливість застосування запропонованих параметрів для вирішення завдань автоматизованого вихрострумівого контролю.

Ключові слова: імпульсний вихрострумівий неруйнівний контроль, дискретне перетворення Гільберта, фазова та амплітудна характеристика сигналу, власна частота, декремент.

RESEARCH OF OSCILLATION MODE IN AUTOMATED PULSED EDDY CURRENT TESTING SYSTEMS

Iu. Iu. Lysenko¹, Yu. V. Kuts¹, V. M. Uchanin², V. F. Petryk¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv;

² H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

The formation and analysis of eddy current probe signals obtained in pulsed excitation mode is considered. The proposed method of implementing pulsed eddy current testing with the formation of attenuating harmonic oscillations is more resistant to the effects of noise and interference that accompany the process of inspected object parameters evaluation. The equivalent scheme of the system “test object–eddy current probe” is developed and analyzed. The obtained mathematical model of the eddy current probe signals allowed proposing the natural frequency and the attenuation as informative signals parameters, which are determined from signals phase and amplitude characteristics. Developed algorithm and the proposed methodology was implemented for evaluation of eddy current signals parameters and related characteristics of testing objects. This method was experimentally verified on a series of different test specimens. The obtained results confirm the possibility to apply the proposed informative signals to solve some problems concerned with automated eddy current testing. The formation and analysis of eddy current probe signals obtained in pulsed excitation mode are considered. The proposed method of implementing pulsed eddy current testing with the formation of attenuating harmonic oscillations is more resistant to the effects of noise and interference that accompany the process of automated eddy current testing. The equivalent scheme of the system “test object–eddy current probe” is developed and analyzed. The obtained mathematical model of the eddy current probe signals allows proposing the natural frequency and the attenuation as informative signals parameters, which are determined from signal phase and amplitude characteristics. Methods of increasing the accuracy of determining the eddy current probe signals attenuation and frequency using trends of signals phase and amplitude characteristics are considered. The proposed

© Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц, В. М. Учанін, В. Ф. Петрик, 2021

signal processing method was verified by modeling the process of determining the eddy current probe signals attenuation and the frequency from the signal with Gaussian noise. Algorithmic and software were developed based on the simulation results and the proposed improved methodology was implemented for determining signals parameters and related parameters and characteristics of testing objects.

Keywords: *pulsed eddy current non-destructive testing, discrete Hilbert transform, phase and amplitude signal characteristics, natural frequency, signal attenuation.*

Вступ. Вихрострумний контроль (ВСК) ґрунтується на аналізі сигналів, отриманих за розміщення електропровідних матеріалів та виробів у змінному електромагнетному полі. Останніми десятиріччями цей метод широко застосовують у різних галузях промисловості через високу чутливість, достовірність та технологічність контролю [1, 2]. У ВСК найпоширенішим є використання гармонічних сигналів для збудження електромагнетного поля та аналіз амплітуди і фази отриманих гармонічних сигналів [3–5].

Один з напрямів розвитку ВСК пов'язаний з удосконаленням способів збудження вихрових струмів в об'єктах контролю (ОК) і методів аналізу інформаційних сигналів та пошуку нових інформативних параметрів сигналів вихрострумних перетворювачів (ВСП). Останніми роками для ВСК все частіше застосовують імпульсне збудження вихрових струмів [6–10]. Такий підхід дає змогу спростити технічні рішення та збільшити потужність зондувальних сигналів, і цим покращити співвідношення сигнал/шум (с/ш), чутливість та збільшити глибину контролю. Аналіз робіт та матеріалів засвідчили, що в імпульсному ВСК зазвичай використовують аперіодичний режим. У цьому випадку для характеристик ОК застосовують різні точкові оцінки, зокрема час до максимального рівня сигналу, висота піка, точки його наростання та перетину нуля. Проте ці параметри нестійкі до впливу шумів та призводять до значних похибок вимірювання і не дають змоги реалізувати весь потенціал імпульсного ВСК.

Водночас імпульсний ВСК з ВСП у режимі загасаючих коливань практично не досліджували. Відомі тільки нечисленні праці, в яких аналізували такий режим стосовно визначення варіацій товщини листів із нержавкої сталі [11, 12]. Тому нижче розглянули модельні та експериментальні дослідження методу імпульсного ВСК з ВСП у коливальному режимі.

Моделювання відбору та опрацювання вимірювальної інформації за сигналами імпульсного ВСК. Формування сигналів параметричного ВСП у режимі холостого ходу. Еквівалентну схему параметричного ВСП у режимі холостого ходу з імпульсним збудженням зображено на рис. 1, де $u_{\Gamma}(t)$ – імпульсний генератор сигналів з вихідним опором R ; C_1 – сумарна ємність, утворена міжвитковими ємностями котушки ВСП та іншими паразитними ємностями; R_1 , L_1 – відповідно активний опір та індуктивність котушки; i_1 , i_2 , i_3 – електричні струми у гілках схеми.

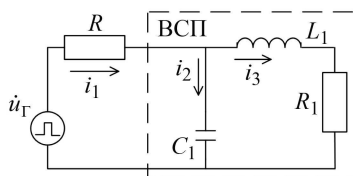


Рис. 1. Еквівалентна схема ВСП, підключеного до імпульсного генератора.

Вихідна напруга генератора $u_{\Gamma}(t)$ – періодична послідовність імпульсів прямокутної форми

$$u_{\Gamma}(t) = \begin{cases} u_0, & t \in n \cdot T_{\Pi} + \tau, \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & t \notin n \cdot T_{\Pi} + \tau, \end{cases} \quad (1)$$

де u_0 , T_n , τ – відповідно амплітуда, період та тривалість імпульсів.

Для визначення реакції ВСП на фронті сигналу (1) проаналізували перехідні процеси в електричному колі ВСП на основі характеристичного рівняння, що відповідає виразу вхідного комплексного опору контуру електричного ланцюга за змінного струму.

Вхідний комплексний опір еквівалентної схеми параметричного ВСП

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega) = R + \frac{R_1 + i\omega L_1}{1 + R_1 i\omega C_1 + (i\omega)^2 L_1 C_1}. \quad (2)$$

Відповідне (2) характеристичне рівняння запишемо так:

$$RZ_1 C_1 \cdot p^2 + (RR_1 C_1 + L_1) \cdot p + R + R_1 = 0, \quad (3)$$

де p – параметр характеристичного рівняння; $p = i\omega$, $i = \sqrt{-1}$; ω – кругова частота.

Розв'язком квадратного рівняння (3) є корені виду

$$p_{1,2} = -\frac{RR_1 C_1 + L_1}{2RL_1 C_1} \pm \sqrt{\frac{(RR_1 C_1 + L_1)^2}{4R^2 L_1^2 C_1^2} - \frac{R + R_1}{RL_1 C_1}}. \quad (4)$$

У розрахунках перехідних процесів повний струм контуру прийемо рівним сумі вимушеного та вільного струмів. Перший задає джерело живлення (генератор). Ця складова не містить інформації про властивості ОК, тому неважлива для аналізу сигналів ВСП. Вільний струм має загасаючий характер у часі і описуємо його моделлю виду $Ae^{\alpha t}$, де α – коефіцієнт загасання, який залежить від параметрів схеми та може бути визначений через корені характеристичного рівняння.

Залежно від співвідношення складових $(RR_1 C_1 + L_1)^2 / 4R^2 L_1^2 C_1^2$ і $R + R_1 / RL_1 C_1$ рівняння (4), можливі три типи коренів p_1 та p_2 рівняння (3) і відповідно три варіанти подання компонент вільного струму.

Критичний опір контуру, за якого починається аперіодичний розряд

$$R_{\text{кр}} = \frac{R_1 C_1 L_1 \pm 2L_1 \sqrt{L_1 C_1}}{R_1^2 C_1^2 - 4L_1 C_1}. \quad (5)$$

Можливі такі варіанти вибору резистора R у схемі на рис. 1:

1) $R > R_{\text{кр}}$, корені p_1 та p_2 є дійсними, $p_1 \neq p_2$ – від'ємними, відповідають загасаючому струму виду

$$i_g(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad p_1, p_2 < 0, \quad t \in T_a, \quad A_1, A_2 > 0, \quad (6)$$

де T_a – час аналізу $T_a < T_n$, A_1 та A_2 – сталі інтегрування;

2) $R = R_{\text{кр}}$, корені є дійсними, $p_1 = p_2$ – від'ємними, що відповідає загасаючому струму виду

$$i_g(t) = (A_1 + A_2 t) e^{p_1 t}, \quad p_1 = p_2 < 0, \quad t \in T_a, \quad A_1, A_2 > 0; \quad (7)$$

3) $R < R_{\text{кр}}$, корені є комплексно спряженими з від'ємною дійсною частиною виду $p_{1,2} = -\alpha \pm i\omega_0$, де $\alpha > 0$ – коефіцієнт загасання (декремент); ω_0 – кутова частота власних коливань, що відповідає струму у вигляді загасаючого гармонічного коливання

$$i_g(t) = A e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \nu), \quad p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0, \quad t \in T_a \gg \alpha^{-1}, \quad A > 0, \quad (8)$$

де A – стала інтегрування; ν – початкова фаза.

Для коливального режиму корені характеристичного рівняння є комплексно спряженими, а вільна складова струму – загасаюче синусоїдне коливання з кутовою частотою ω_0 та декрементом α

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R + R_1}{RL_1C_1} - \frac{(RR_1C_1 + L_1)^2}{4R^2L_1^2C_1^2}}, \quad \alpha = (RR_1C_1 + L_1)/2RL_1C_1. \quad (9)$$

Зниження напруги на ВСП у цьому випадку визначаємо формулою

$$u(t) = u_0s(t - \tau_0) + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \nu), \quad t \in T_a \gg \alpha^{-1}, \quad \tau_0 \in T_a, \quad A > 0, \quad (10)$$

де $s(t - \tau_0)$ – функція одиничного імпульсу.

У момент часу $t = 0$, формула (10) має вигляд

$$u(t = 0) = u_{C_1}(t = 0) - u_0s(t - \tau_0) = A \sin(\nu), \quad (11)$$

де $u_{C_1}(t = 0)$ – значення напруги на ємності C_1 в момент часу $t = 0$. Визначивши сталу інтегрування та початкову фазу, формула (10) набуває вигляду

$$(t - \tau_0) + (u_{C_1}(0) - u_0s(t - \tau_0))e^{-\alpha t} \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\omega_0} \sin\left(\omega_0 t + \arctg\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)\right). \quad (12)$$

Формування сигналів параметричного ВСП у режимі контролю об'єкта з немагнетного матеріалу. Для аналізу формування інформаційних сигналів у системі ВСП–ОК користуються її поданням системою індуктивно зв'язаних електричних контурів. З огляду на загальні правила та методики розрахунку лінійних електричних кіл, систему “параметричний ВСП–немагнетний ОК” можна подати еквівалентною схемою (рис. 2а). Немагнетний ОК представляє собою послідовно з'єднані елементи $R_2(\bar{w})$ та $L_2(\bar{w})$, які залежать від вектора параметрів та характеристик ОК \bar{w} , з введеним індуктивним зв'язком між котушками L_1 та $L_2(\bar{w})$.

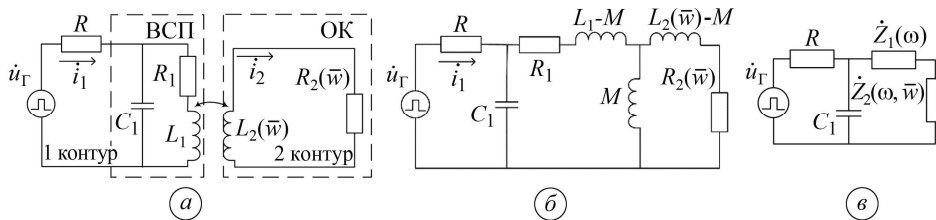


Рис. 2. Еквівалентна схема системи ВСП–ОК з імпульсним генератором (а), її еквівалент з розв'язкою індуктивних контурів (б) та спрощена еквівалентна схема (в).

Використовуючи метод характеристичних рівнянь, показали, що внесення ОК з немагнетного матеріалу в поле котушки призводить до зміни її електричних параметрів – активного опору та індуктивності, які впливають на декремент α , частоту власних коливань ω_0 та початкову фазу ν (за опорного сигналу частоти ω_0). Ці параметри можна використати в імпульсному ВСК з режимом коливань для визначення певних характеристик ОК.

Формування сигналів параметричного ВСП під час контролю об'єкта з феромагнетного матеріалу. Запропоновано [13] подати еквівалентну схему магнетного ОК еквівалентним RLC контуром, що формально відповідає отриманим експериментальним сигналам ВСП. Використавши такий підхід, еквівалентну схему ОК у системі “ВСП–магнетний ОК” подамо елементами $R_2(\bar{w})$, $C_2(\bar{w})$ та $L_2(\bar{w})$ з введеним індуктивним зв'язком між котушками L_1 та $L_2(\bar{w})$ (рис. 3а),

спрощуємо її методом розв’язання індуктивних контурів та зводимо до схеми на рис. 3б. Елементи цієї схеми записуємо формулами:

$$\dot{Z}_1(\omega) = R_1 + i\omega(L_1 - M), \quad (13)$$

$$\dot{Z}_2(\omega, \bar{\omega}) = \dot{Z}_3(\omega, \bar{\omega})i\omega M / (\dot{Z}_3(\omega, \bar{\omega}) + i\omega M), \quad (14)$$

$$\dot{Z}_3(\omega, \bar{\omega}) = R_2(\bar{\omega}) / (1 + i\omega C_2(\bar{\omega})R_2(\bar{\omega}) + i\omega(L_2(\bar{\omega}) - M)). \quad (15)$$

Вхідний опір еквівалентної схеми (рис. 3б) визначаємо виразом

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega, \bar{\omega}) = R + \frac{\dot{Z}_1(\omega) + \dot{Z}_3(\omega, \bar{\omega})}{1 + \dot{Z}_1(\omega)i\omega C_1 + \dot{Z}_3(\omega, \bar{\omega})i\omega C_1}. \quad (16)$$

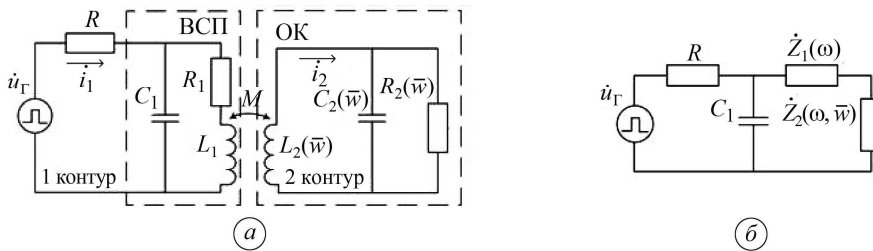


Рис. 3. Еквівалентна схема системи “ВСП–магнетний ОК” з імпульсним генератором (а) та її спрощений варіант (б).

За таких умов характеристичне рівняння має 4-й порядок і його розв’язують за допомогою відомих математичних перетворень (наприклад, через резольвенту, за формулою Декарта–Ейлера або методом Феррарі [14]). Корені, що є розв’язком рівняння 4-го порядку також можна привести до виду $p_{1,2}(\bar{\omega}) = -\alpha(\bar{\omega}) \pm i\omega_0(\bar{\omega})$.

Аналіз процесів у трансформаторному ВСП в умовах імпульсного збудження є подібним до такого у системах “параметричний ВСП–ОК”, але є складнішим. Характеристичні рівняння для випадку “трансформаторний ВСП–немагнетний ОК” та “трансформаторний ВСП–магнетний ОК” мають відповідно 4 та 5 порядок. Корені цих рівнянь за певних умов також можна привести до виду $p_{1,2}(\bar{\omega}) = -\alpha(\bar{\omega}) \pm i\omega_0(\bar{\omega})$.

Моделювання відбору та опрацювання виміральної інформації. Декремент α та частоту власних коливань ω_0 обчислюють відповідно з амплітуди і фази сигналу $u(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \nu) + u_{\text{ш}}(t)$, де $u_{\text{ш}}(t)$ – шумова складова, яку розглядають як реалізацію гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ^2 . Амплітуду і фазу сигналу отримують за допомогою перетворення Гільберта [15]. Загальну методику обчислення дискретних амплітуди та фази сигналу як функції часу наведено у праці [16]. З попередніх досліджень відомо, що амплітуда і фаза сигналів імпульсного ВСК у коливальному режимі змінюються в часі за законами близькими відповідно до експоненційного та лінійного.

Для зменшення впливу шумів та підвищення точності визначення α та ω_0 розглянуто використання апроксимації амплітуди та фази реальних сигналів ВСП.

Ефективність експоненціальної апроксимації для визначення α досліджували на моделях сигналів з декрементом $\alpha \in (0, 23 \cdot 10^6 \div 0, 27 \cdot 10^6) \text{ c}^{-1}$, який змінювався з кроком $0, 01 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$. Один з модельних сигналів ВСП, його обчислена ам-

плітуда (крива 1) та її тренд (крива 2) наведено на рис. 4а. На інтервалі аналізу відношення с/ш змінювалось від 100 до 10.

Декремент сигналу ВСП визначали за формулою

$$\alpha(\bar{w}) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t'_1, \bar{w})}{\hat{U}(t'_2, \bar{w})}, \quad (17)$$

де $\hat{U}(t'_1, \bar{w})$, $\hat{U}(t'_2, \bar{w})$ – значення апроксимованої кривої в моменти часу t'_1 і t'_2 , $\Delta T = t'_2 - t'_1$.

За результатами моделювання максимальні відносні похибки визначення декременту за амплітудою та її експоненціальним трендом становить 9 та 3%, відповідно. Таким чином, використання в експерименті експоненційної апроксимації дало змогу підвищити точність визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП в ~ 3 рази. Цей метод визначення декременту є чутливим до впливу шумів, тому його можна рекомендувати, коли співвідношення с/ш > 10. Показано [17], що мінімізація похибки визначення декременту досягається за оптимального часу спостереження $\Delta T = \Delta T_{\text{опт}} \approx 1,1089/\alpha$. Для підвищення точності визначення α використано ітераційний метод оцінювання оптимального інтервалу аналізу.

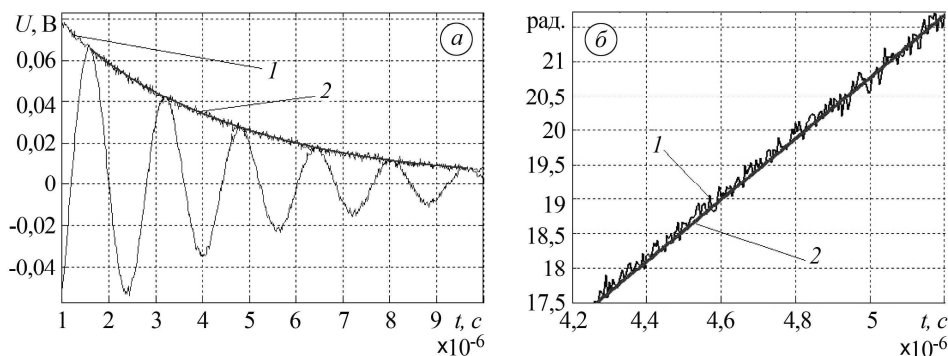


Рис. 4. Модельний сигнал ВСП (а) (крива 1 – обчислена амплітуда, 2 – її тренд) та фрагмент фазової характеристики (б) (крива 1 – фазова характеристика, 2 – її лінійний тренд).

Ефективність лінійної апроксимації для визначення власної частоти за фазою сигналу також перевіряли за допомогою моделювання. Фрагмент обчисленої фази (крива 1) та її лінійний тренд (крива 2) зображено на рис. 4б. Згладжували фазу за методом лінійної регресії Бартлетта–Кенуя. Частоту власних коливань визначали за лінійним трендом фази так:

$$f_{\text{Л}}(\bar{w}) = \Delta \tilde{\Phi}_{\text{Л}}[\Delta T_{\text{опт}}, \bar{w}] / 2\pi \Delta T_{\text{опт}} \approx 0,1456\alpha \Delta \tilde{\Phi}_{\text{Л}}[\Delta T_{\text{опт}}, \bar{w}], \quad (18)$$

де $\Delta \tilde{\Phi}_{\text{Л}}[\Delta T_{\text{опт}}, \bar{w}]$ – визначена за лінійним трендом та накопичена за час $\Delta T_{\text{опт}}$ фаза сигналу.

Моделювали визначення власної частоти сигналів у діапазоні частот $f \in [620 \dots 710]$ кГц з кроком 10 кГц. За результатами моделювання максимальні відносні похибки визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за фазою та її лінійним трендом становили відповідно 0,5 та 0,06%. Таким чином, використання лінійного тренду фазової характеристики сигналу дало змогу підвищити точність визначення частоти власних коливань експоненціально загасаючого сигналу ВСП у ~ 8 разів.

Методика аналізу сигналів імпульсного ВСК. Модель інформаційного сигналу ВСП подамо у вигляді адитивної суміші загасаючих гармонічних коливань та гауссового шуму:

$$u_{\text{PEC}}(t, \bar{w}) = U_m(\bar{w})e^{-\alpha(\bar{w})t} \cdot \cos(2\pi f(\bar{w})t) + u_{\text{ш}}(t), \quad t \in (t_1, t_2), \quad (19)$$

де U_m – амплітудне значення інформаційної складової сигналу ВСП; $\alpha(\bar{w})$ – коефіцієнт загасання сигналу; $f(\bar{w})$ – частота коливань сигналу; t – поточний час; (t_1, t_2) – інтервал аналізу сигналу ВСП; $u_{\text{ш}}(t)$ – шумова складова сигналу. Залежно від характеристик ОК – електрофізичних параметрів матеріалу, форми та геометричних розмірів, наявних дефектів, товщини діелектричного покриття – змінюється власна частота і коефіцієнт загасання цих коливань. В АЦП сигнал (19) перетворюється в цифрову форму $u_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]$, де j – номер відліку (ціла частина відношення t/T_d , T_d – період дискретизації). Методику обробки сигналів ВСП з імпульсним збудженням ілюструє рис. 5.

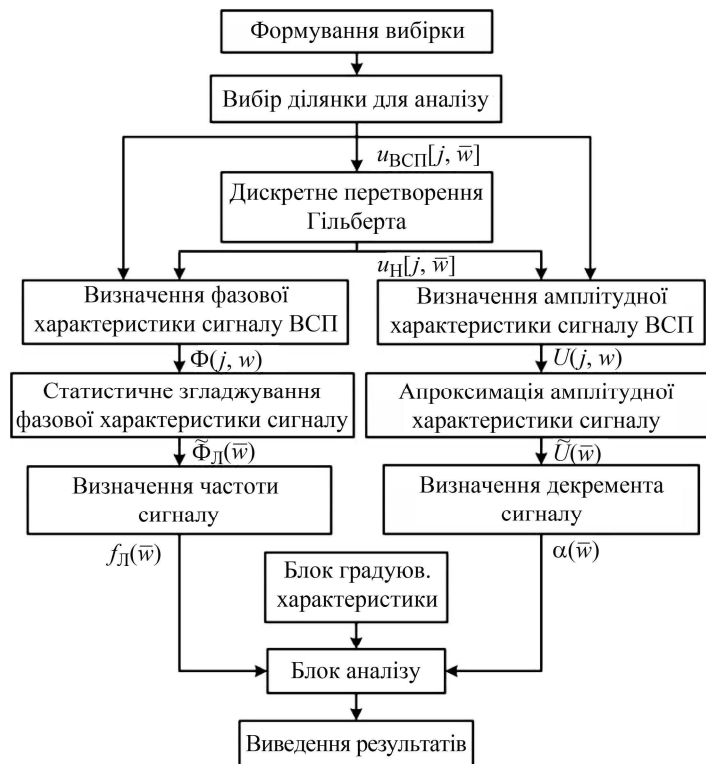


Рис. 5. Умовне графічне подання методики отримання та обробки вимірювальної інформації зі сигналів імпульсного ВСК.

Обробка та аналіз характеристик інформаційних сигналів ВСП складається з таких дій:

- 1) імпорт вихідної вибірки сигналу $u_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]$;
- 2) вибір ділянки аналізу сигналу (для підвищення точності обираємо ділянку, яка відповідає першим періодам сигналу ВСП, тобто періодам з найбільшими амплітудами);
- 3) визначення Гільберт-образу сигналів ВСП $\hat{u}_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]$;
- 4) визначення дискретних фази та амплітуди сигналів ВСП

$$\Phi[j, \bar{w}] = \arctg \frac{\hat{u}_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]}{u_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]} + \mathbf{L}(\hat{u}_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}], u_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]), \quad (20)$$

$$U[j, \bar{w}]_{\text{ВСП}} = \sqrt{u_{\text{ВСП}}^2[j, \bar{w}] + \hat{u}_{\text{ВСП}}^2[j, \bar{w}]}, \quad (21)$$

де $L(\hat{u}_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}], u_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}])$ оператор розгортання фази;

5) згладжування функції (20) за методом визначення лінійної регресії Бартлетта–Кенуя;

6) визначення частоти сигналів ВСП з лінійного тренду функції за виразом (18);

7) експоненціальна апроксимація амплітуди (21);

8) визначення декременту сигналів ВСП за формулою (17);

9) візуалізація отриманих результатів.

Експериментальні дослідження відбору та опрацювання вимірювальної інформації за сигналами імпульсного ВСК. Експериментальні дослідження на прикладі оцінювання товщини діелектричного покриття на електропровідній основі виконували в два етапи. На першому етапі аналізували вплив характеристик матеріалу ОК без покриття на параметри ВСП. Як ОК використовували заготовки плоскої форми з алюмінію Д16, бронзи БрО7Ф0,2 і сталі Ст-30 (питома електропровідність $\gamma_{\text{ал}} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м; $\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м; $\gamma_{\text{ст}} = 1,45 \cdot 10^6$ $\gamma_{\text{ст}} = 1,45 \cdot 10^6$ См/м) з товщиною, яка перевищувала глибину проникнення вихрових струмів. На другому – аналізували вплив товщини діелектричного покриття ОК на частоту і декремент сигналу.

На первинну котушку ($W_1 = 80$) накладного ВСП надходив збуджувальний імпульсний сигнал від генератора струму виду

$$i(t) = \begin{cases} 5 \text{ мА}, & t_1 + kT_{\text{п}} < t < t_1 + \tau + kT_{\text{п}}, \\ 0 \text{ А}, & t_1 + \tau + kT_{\text{п}} < t < t_1 + T_{\text{п}}(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (22)$$

де $T_{\text{п}} = 125 \cdot 10^{-6}$ с; $\tau = 62,4 \cdot 10^{-6}$ с – відповідно період повторювання і тривалість імпульсу.

Сигнал вимірювальної котушки ($W_2 = 420$) підсилювали та оцифровували в АЦП. Отримували вибірки сигналу $u[j]$, $j = 1, \dots, 10000$. Дискретизацію виконували з періодом $T_{\text{д}} = 4 \cdot 10^{-9}$ с.

Для згладжування фази інформаційного сигналу використали значення сигналу з середньої частини вибірки: для заготовок з алюмінію та бронзи – обсягом $j_{\text{ал}} = j_{\text{бр}} = 1500 \dots 6000$, для заготовок зі сталі – $j_{\text{ст}} = 1500 \dots 3501$. Фрагменти сигналів ВСП, отриманих на тестових зразках без покриттів, показано на рис. 6а (крива 1 – зразок зі сталі; 2 – бронзи; 3 – алюмінію). Різні значення електропровідності і магнетної проникності матеріалів призводять до зміни частоти і загасання сигналу ВСП. На рис. 6б зображено фрагменти сигналів за контролю заготовки зі сталі з різною товщиною діелектричного покриття. Як бачимо, зі збільшенням h вплив вихрових струмів ОК на інформаційний сигнал ВСП зменшується. Амплітуда сигналу збільшується, а частота коливань лишається незмінною.

На рис. 7а наведено графіки функцій $\alpha(h)$, які вказують на збільшення декременту сигналу зі зменшенням h . Залежність $\alpha(h)$ для ОК з магнетних та немагнетних матеріалів має експоненціальний характер. Характеристики матеріалу ОК впливають на швидкість загасання сигналу. Незначне відхилення результату від експоненціальної залежності можна пояснити прихованими дефектами, неконтрольованою зміною характеристик ОК, похибками вимірювання тощо.

Результати визначення частоти сигналів ВСП як функції товщини діелектричного покриття наведені на рис. 7б. Залежність $f(h)$ дає однозначний результат тільки для немагнетних матеріалів. Тут чутливість до товщини покриття збільшується зі зменшенням її значення.

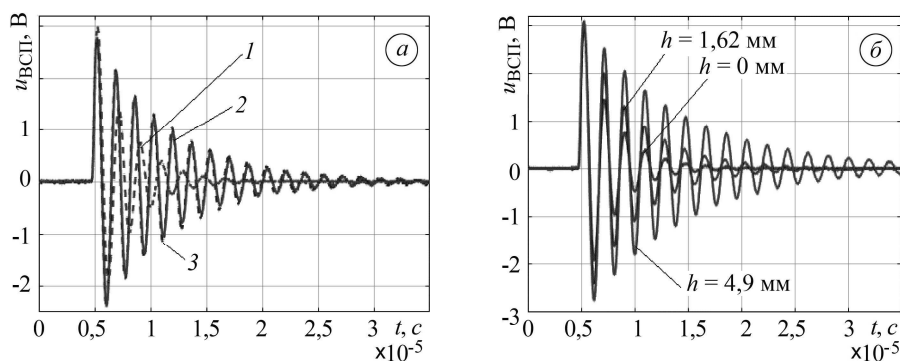


Рис. 6. Графік сигналів ВСП за імпульсного збудження в коливальному режимі для різних матеріалів без захисних покриттів (а) та для ОК зі сталі з різною товщиною діелектричного покриття (б).

Отримані модельні та експериментальні результати підтвердили можливість використання власної частоти і коефіцієнта загасання сигналу в задачах вихрострумового контролю та дають підстави рекомендувати використання режиму власних коливань ВСП за їх імпульсного збудження в автоматизованих системах ВСК.

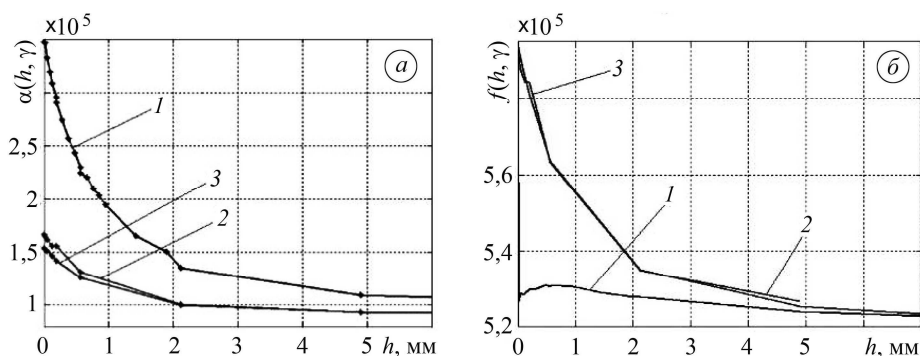


Рис. 7. Графіки функцій $\alpha(h)$ (а) та $f(h)$ (б) для різних матеріалів ОК: 1 – зразок зі сталі; 2 – бронзи; 3 – алюмінію.

ВИСНОВКИ

Розглянуто використання у імпульсному ВСК режимі власних коливань. Аналіз формування інформаційних сигналів в такому режимі збудження дав змогу визначити умови виникнення загасаючих гармонічних коливань та запропонувати як інформативні параметри сигналів перетворювача його власну частоту і декремент. Виконали експерименти з оцінювання взаємозв'язку інформативних параметрів сигналів перетворювача з характеристиками об'єкта контролю та запропонували методику опрацювання інформаційних сигналів. Підтверджено, що використання експоненціального тренду амплітуди дає змогу підвищити точність визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП в ~ 3 рази, а лінійного тренду фази – точність визначення частоти власних коливань сигналу у ~ 8 разів. Запропоновано методику отримання та опрацювання вимірювальної інформації з сигналів імпульсного ВСК. В її основу покладено визначення характеристик сигналу ВСП в умовах імпульсного збудження за допомогою дискретного перетворення Гільберта та оцінювання коефіцієнта загасання та власної частоти сигналів ВСП відповідно з експоненціального тренду амплітудної характеристики сигналу та лінійного тренду фазової характеристики сигналу. Методику можна реалізувати як у складі

засобів ВСК, так і автономно для модельних експериментів. Її ефективність перевірена за допомогою моделювання визначення декременту та частоти власних коливань сигналу ВСП в умовах дії гауссового шуму. Експериментальне дослідження запропонованих інформативних параметрів для імпульсного ВСК на серіях зразків підтвердило можливість використання власної частоти і коефіцієнта загасання сигналу, зокрема в задачах контролю електропровідності матеріалів та оцінювання товщини діелектричного покриття. Зроблено загальний висновок про те, що використання імпульсного ВСК у режимі власних коливань розширює теоретичний базис вихрострумовеї контролю і його можна застосовувати в автоматизованих системах.

Робота виконана в межах договору про співпрацю КПІ ім. Ігоря Сікорського та Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

1. Libby, H.L. Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods, Wiley-Interscience New York, **1971**.
2. Дорофеев, А.Л.; Казамапов, Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия, *Машиностроение, Москва*, **1980**.
3. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практ. пос. Под ред. В.В. Сухорукова, *Высшая школа, Москва*, **1992**.
4. Тетерко, А.Я.; Назарчук, З.Т. Селективна вихрострумовеї дефектоскопія, *НАН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка, Львів*, **2004**.
5. Uchanin, V.; Ostash, O.; Bychkov, S.; Semenets, O.; and Derecha, V. Eddy current monitoring of aluminum alloy degradation during long-term operation of aircraft, *The Paton welding Journal*, **2021**, 8, 45–51. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.08.09>
6. Vasic, D.; Bilas, V.; and Ambrus, D. Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **2004**, 53 (4), 1289–1294. <https://doi.org/10.1109/TIM.2004.830594>
7. Thyagarajan, K.; Maxfield, B.; Balasubramaniam, K.; and Krishnamurthy, C.V. Pulsed Eddy Current Imaging of Corrosion Pits, *J. Nondestructive Testing & Evaluation*, **2008**, 7(2), 32–36.
8. Cadeau, T.; Krause, T. Pulsed eddy current probe desing based on transient circuit analysis, *Review of Progress in Quantitative NDE*, **2009**, 28, 327–334. <https://doi.org/10.1063/1.3114222>
9. Bieber, J. A.; Tai, Cheng-Chi; and Moulder, J. C. Quantitative Assentment of Corrosion in Aircraft Structures Using Scanning Pulsed Eddy Current, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **1998**, 17. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5339-7_40
10. Plotnikov, Y.; Bantz W. Subsurface defect detection in metals with pulsed eddy current, *Review of Progress in Quantitative NDE*, **2005**, 24, 447–454. <https://doi.org/10.1063/1.1916710>
11. Angani, C.S.; Ramos, H.G.; Ribeiro, A.L.; Rocha, T.J.; and Baskaran, P. Transient eddy current oscillations method for the inspection of thickness change in stainless steel, *Sensors and Actuators A: Physical*, **2015**, 233, 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.003>
12. Angani, C.S.; Ramos, H.G.; Ribeiro, A.L.; Rocha, T.J.; and Baskaran, P. Lift-Off Point of Intersection Feature in Transient Eddy-Current Oscillations Method to Detect Thickness Variation in Stainless Stee, *IEEE Transactions on Magnetics*, **2016**, 52(6), 1–8. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2531024>
13. Бучма, І.М.; Репетило, Т.М.; Ферчук, К.В. Засоби вихрострумовеї діагностики корозійного стану сталевих листових конструкцій: монографія, *Вид-во Львівської політехніки, Львів*, **2015**.
14. Корн, Г.; Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров, *Наука, Москва*, **1977**.
15. Bendat, J.S.; Piersol, A.G. Random Data. Analysis and Measurement Procedures (4th ed), *John Wiley & Sons, INC, Hoboken, New Jersey*, **2010**. <https://doi.org/10.1002/9781118032428>
16. Lysenko, Iu.; Eremenko, V.; Kuts, Yu.; Protasov, A.; Uchanin, V. Advanced Signal Processing Methods for Inspection of Aircraft Construction Materials, *Transactions on Aerospace Research*, **2020**, 2(259), 27–35. <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>
17. Kuts, Yu.; Lysenko, Iu.; Protasov, A.; Uchanin, V.; and Redka, V. Enhanced Feature Extraction Algorithms Using Oscillatory-Mode Pulsed Eddy Current Techniques for Aircraft Structure Inspection, *Transactions on Aerospace Research*, **2021**, 3(264), 1–16. <https://doi.org/10.2478/tar-2021-0013>

Одержано 27.09.2021