

# ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, О.Л. Дугін*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» м. Київ, Україна*

**Вступ.** Висока ефективність та надійність отримуваних результатів вихрострумowego неруйнівного контролю (ВСНК) сприяє його широкому застосуванню у різних галузях науки і техніки для розв'язання задач дефектоскопії, контролю якості матеріалів і виробів, моніторингу характеристик об'єктів контролю (ОК) різного призначення. На сьогодні до актуальних задач ВСНК відносять вдосконалення вихрострумowych перетворювачів (ВСП) [1], способів збудження вихрових струмів в ОК, розроблення нових методів опрацювання інформаційних сигналів ВСП [2].

Найчастіше вихрострумова дефектоскопія (ВСД) реалізується за рахунок збудження вихрових струмів гармонічними сигналами однієї частоти. В цьому випадку електрофізичні характеристики матеріалів і геометричні параметри ОК визначаються через їх вплив на амплітуду і фазовий зсув сигналу ВСП по відношенню до сигналів збудження вихрових струмів [3]. Аналіз інформаційних сигналів ВСП та інтерпретація результатів контролю ускладнюється внаслідок дії ряду перешкоджаючих факторів, серед яких найбільш небезпечними є проміжок між ВСП і ОК, варіація електромагнітних властивостей металу, кривизна і шорсткість поверхні ОК, зовнішні і апаратурні шуми та перешкоди різної природи [2].

Для розширення функціональних можливостей ВСНК застосовують інші режими збудження вихрових струмів в ОК. Один з таких напрямів дослідження пов'язаний з використанням імпульсного режиму роботи ВСП і збудженням в ОК імпульсних вихрових струмів [4, 5, 6]. На сьогодні імпульсний метод ВСНК ґрунтується на вимірюванні амплітуди чи тривалості сигналу ВСП імпульсної форми, який виникає під час взаємодії нестационарного електромагнітного поля з ОК. Удосконалення імпульсного ВСНК відбувається в напрямках пошук нових інформативних параметрів (ІП) сигналів ВСП та більш ефективних способів зменшення впливу різного роду завад, що діють в системі ВСП - ОК, реалізації багатопараметрового контролю, розширення функціональних можливостей ВСД та підвищення вірогідності контролю.

В ряді випадків реалізація ВСД супроводжується виникненням труднощів технологічного характеру, що пов'язані з великими габаритами ОК і обмеженістю доступу до його окремих ділянок. За таких умов забезпечення можливості проведення ВСНК у важкодоступних місцях ОК стає особливо актуальним. Таке завдання можна вирішити шляхом застосування бездротових технологій передачі сигналів ВСНК від первинних перетворювачів до блоків оброблення даних [7]. Це дозволяє розділити просторово перетворювальний блок і блок оброблення сигналів, що значно спрощує практичну реалізацію процесу сканування ВСП поверхонь великогабаритних ОК у важкодоступних місцях.

**Завдання дослідження.** На основі аналізу результатів відомих публікацій та проведених теоретичних досліджень розробити та виконати аналіз експериментального макету бездротової системи ВСД, що реалізує імпульсний режим збудження ВСП, а також запропонувати методику оброблення і відображення інформації, яка може бути придатна для застосування в системах імпульсного ВСНК технічного стану великогабаритних об'єктів.

**Структура експериментального макету.** На рис. 1 наведена структура розробленої системи ВСД, до складу якої входять блоки перетворення та оброблення.

Перетворювальний блок складається з ВСП накладного типу, на обмотку збудження якого надходить імпульсний сигнал від джерела струму (ДС). Сигнал ВСП, що містить інформацію про параметри ОК, з вимірювальної обмотки надходить через підсилювач на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Отримані цифрові дані записуються в буфер пам'яті для подальшої їх передачі в блок оброблення даних, який включає приймач (Пр) та персональний комп'ютер (ПК) з оригінальним програмним забезпеченням (ПЗ). Ця передача здійснюється через мікроконтролер (МК) і бездротовий модуль зв'язку. Бездротовий режим реалізовано на базі Bluetooth модуля третього класу потужності із зовнішньою антеною, який забезпечує зв'язок між блоками на відстань до 300 метрів [8]. Синхронізацію роботи основних елементів системи забезпечує пристрій управління (ПУ).

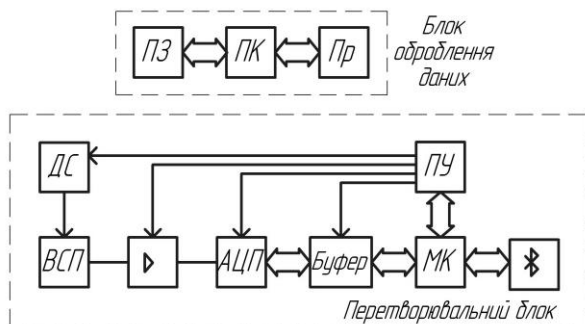


Рис.1. Розроблена система ВСД



Рис. 2. Об'єкт дослідження

Для перевірки працездатності системи була використана алюмінієва пластина з тріщинами різної глибини (від 0.1 мм до 3 мм) і шириною розкриття 1мм (рис. 2). В процесі перевірки здійснювалось сканування пластини з кроком 1 мм.

**Аналіз системи «ВСП - ОК».** В задачах імпульсного ВСНК важливо враховувати повний комплексний опір ВСП. Попередній аналіз засвідчив, що в такому режимі роботи виникають власні загасаючі коливання, які обумовлені утворенням коливального контура індуктивністю електричної котушки та її паразитною міжвитковою ємністю [9]. З урахуванням цього факту, система «параметричний ВСП – ОК» представляється еквівалентною схемою на рис. 3. Виходячи із загальних правил та методик розрахунку лінійних електричних кіл, розрахунок еквівалентної схеми трансформаторного ВСП зводиться до розрахунку еквівалентної схеми параметричного ВСП.

У схемі на рис. 3 ОК представлено еквівалентним контуром  $L_2(\bar{p})$   $R_2(\bar{p})$ , в якому індуктивність  $L_2(\bar{p})$ , зв'язана через взаємну індуктивність  $M_{12}(\bar{p})$  з елементом  $L_1$ , а  $\bar{p}$  – вектор параметрів ОК. Опір та індуктивність котушки 1-го контуру позначені відповідно  $R_1$ ,  $L_1$ ;  $R$  – активний опір схеми;  $\dot{U}$  – напруга збудження перетворювача;  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  – струми в контурах. Використовуючи закони Кірхгофа для електричних ланцюгів змінного струму, для цих контурів отримаємо систему рівнянь в комплексній формі:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 R + \dot{I}_1 \frac{R_1 + j\omega L_1}{1 + j\omega C_1 R_1 - \omega^2 L_1 C_1} + \dot{I}_2 j\omega M_{12}(\bar{p}) = \dot{U}, \\ \dot{I}_1 j\omega M_{12}(\bar{p}) + \dot{I}_2 R_2(\bar{p}) + \dot{I}_2 j\omega L_2(\bar{p}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

У випадку роботи ВСП в імпульсному режимі необхідно враховувати перехідні процеси в ланцюгах перетворювача. Як відомо, аналіз перехідних процесів базується на розв'язку характеристичного рівняння, який для схеми на рис. 3 має вигляд [10]:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC_1} \pm \sqrt{\frac{1}{4R^2 C_1^2} - \frac{1}{Z_L C_1}}, \quad (2)$$

де  $Z_L$  залежить від індуктивностей котушок ВСП і параметрів ОК. З аналізу коренів характеристичного рівняння, частота власних коливань  $\omega_0$  та загасання  $\alpha$  сигналу ВСП визначаються як:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{Z_L C_1} - \frac{1}{4R^2 C_1^2}}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC_1}. \quad (4)$$

**Проведення дослідження та обговорення отриманих результатів.** На обмотку збудження трансформаторного ВСП надходив імпульсний струм з періодом  $T_n = 50$  мкс та тривалістю  $\tau = 175$  нс. Отриманий сигнал з вторинної обмотки ВСП мав вигляд загасаючих гармонічних коливань (рис. 4). Аналіз отриманих сигналів ВСП проводився за допомогою розробленого ПЗ, в основу якого покладено алгоритм оброблення внесених сигналів ВСП в часовій області з використанням перетворення Гільберта та отриманням і подальшим аналізом амплітудних та фазових характеристик сигналів [11].

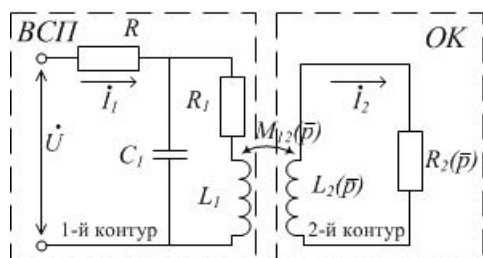


Рис.3. Еквівалентна схема системи «ВСП – ОК»

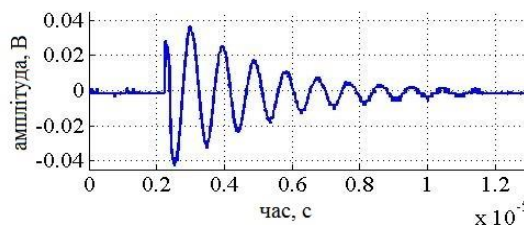


Рис.4. Графік ділянки вихідного сигналу ВСП

За результатами сканування ОК (рис. 5а), виконаного з кроком 1 мм, отримано набір сигналів ВТП, з яких були виділені максимальні пікові значення амплітуди. Розподіл пікових значень напруги у прив'язці до координат на поверхні ОК представлено на рис. 5б. З аналізу цього розподілу видно, що наявність тріщини в ОК призводить до істотного збільшення амплітуди напруги в її околі, але зменшення над самою тріщиною. На рис. 6 подано розподіл пікових значень амплітуди сигналів ВСП по поверхні ОК в координатах (7; 166) з метою уникнення впливу крайових ефектів на границях об'єкту.

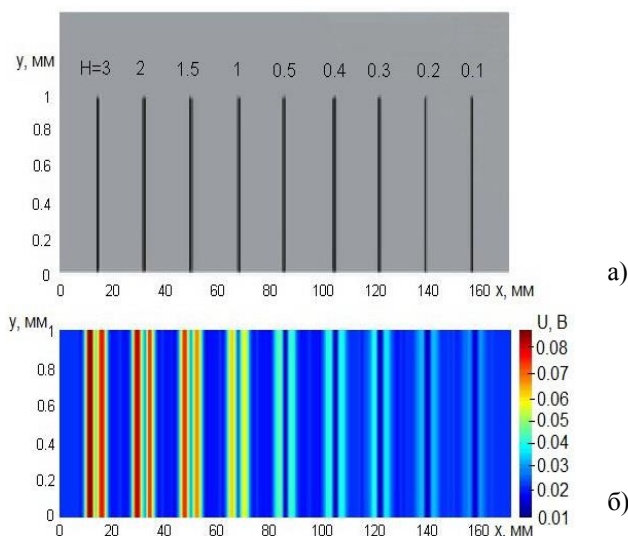


Рис. 5. ОК (а) та розподіл на його поверхні пікових значень напруги ВСП (б)

На рис. 7 наведено залежність максимального значення амплітуди сигналу мультидиференціального ВСП від глибини тріщини ОК. Дана залежність може бути

описана поліномом 3-го ступеня. Отримані в такий спосіб залежності можуть бути використані для кількісного оцінювання параметрів тріщин.

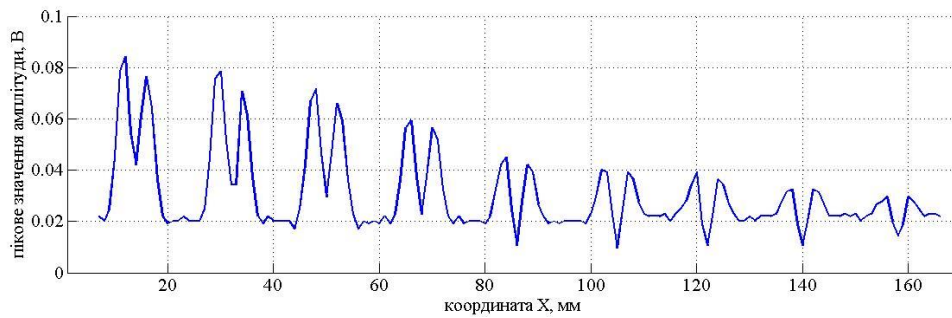


Рис. 6. Розподіл пікових значень напруги ВСП вздовж ОК

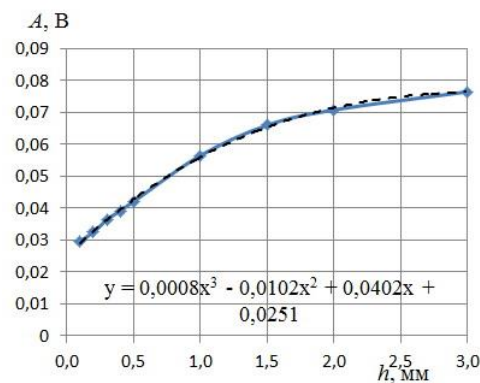


Рис. 7. Залежність пікових значень напруги сигналів ВСП від глибини тріщини

Розподіл пікових значень амплітуди та частоти власних коливань сигналу ВСП в околі координат тріщини глибиною  $h = 3$  мм ( $x = 14$  мм) проілюстровано на рис. 8а та 8б. З графіків видно, що в місцях розташування тріщин спостерігається зміна розподілу параметрів сигналу: зменшення значень миттєвої частоти коливань сигналів в околі тріщини та збільшення безпосередньо над нею.

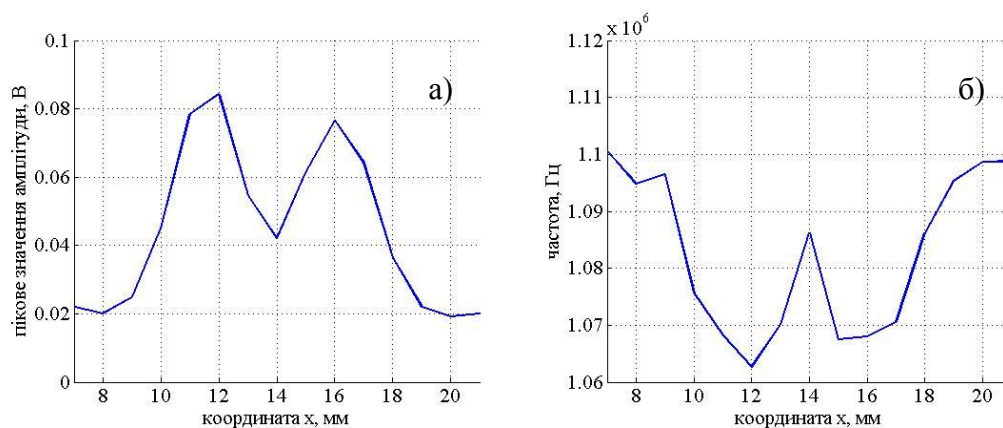


Рис. 8. Залежність амплітуди (а) та частоти (б) сигналів ВСП від координати для  $h = 3$  мм

**Висновок.** ВСНК з імпульсним збудженням в поєднанні з цифровою обробкою інформаційних сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта може істотно доповнити відомі методи за рахунок можливості аналізу таких параметрів сигналів як частота власних коливань, пікове значення амплітуди, декремент сигналу і тимчасове положення характерних точок сигналу.

Використовуючи залежність амплітуди сигналів ВСП від глибини тріщини можна в деяких випадках розширити функціональні можливості дефектоскопії за рахунок оцінювання глибини тріщин.

Запропонована методика опрацювання сигналів імпульсного ВСНК перевірена на прикладі оброблення сигналів імпульсної ВСД в задачах контролю алюмінієвої пластини з тріщинами різної глибини.

**Подяка.** Авторський колектив висловлює щирю подяку к.т.н. Учаніну В.М. за надання можливості проведення експериментальних досліджень з використанням оригінального мультидиференційного вихрострумowego перетворювача, консультації з питань методики проведення досліджень та сподівається на подальшу творчу співпрацю.

[1] Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.М. Учанін; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львів: СПОЛОМ, 2013. - 268.

[2] Тетерко А.Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А.Я. Тетерко, З.Т. Назарчук; НАН України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В.Карпенка. - Л., 2004. - 247 с.

[3] Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2 т. / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2: Вихретоковый контроль. – 688с.

[4] Cadeau T. Pulsed eddy current probe desing based on transient circuit analysis / T.J. Cadeau, T.W. Krause // Review of Quantitative NDE. – 2009. – vol. 28. – pp. 327-334.

[5] Yang G. Pulsed Eddy-Current Based Giant Magnetoresistive System for the Inspection of Aircraft Structures / G. Yang, A. Tamburrino, L. Udpa, S. Udpa // IEEE Trans. Magn. – 2010. – vol. 46, no. 3. – pp. 910-917.

[6] Лисенко Ю. Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. – 2016. – Вип. 51. – С. 58–63.

[7] Дугін О.Л. Мобільний вихрострумовий дефектоскоп / Дугін О.Л., Кустовський О.Л., Петрик В.Ф. // Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики: XX-та Міжнар. конф. та вист., 01 - 05 жовтн. 2012 р. – 2012. – с. 239.

[8] Petrik V. Telemetric Eddy Current Deectoscope / Petrik V., Protasov A., Dugin A. // Ж-л «Научни Известия НТСМ»: материалы междуун. конф. «Дни НК 2014», 17-21 червня, 2014р, – Созополь, 2014. – № 150 – С. 34 – 36.

[9] Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net>.

[10] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А.Бессонов. – М.: Высшая школа, 1966. – 776с.

[11] Методика обработки сигналов в системах импульсной вихретоковой дефектоскопии: материалы VIII Международ. научн.-техн. конф. «Приборостроение - 2015», 25 - 27 ноября 2015 г., Минск, Республика Беларусь / БНТУ ПБФ — Минск, 2015. — Т. 1, 322 с.