

6. Пат. на изобретение 2373638 Российская федерация, МПК (2006) H03K4/92. ЭМА преобразователь/ Подолян А.А.; 2008121010/09; заявл.28.05.2008; опубл.20.11.2009, бюл. № 32.
7. Пат. на изобретение 2327152, МПК (2006) G01N29/04 Российская федерация, Формирования колокообразных импульсов зондирования ЭМА преобразователя и устройство для его осуществления / А.А. Подолян, А.Г. Протасов, С.Н. Лигомина; 2006116939/28; заявл.18.05.2006; опубл.20.06.2008, бюл. № 17.
8. Пат. на винахід № 83295 Україна, МПК (2006) G01N 29/04. Спосіб формування акустичної хвилі / Подолян О.О.; а200611064; заявл. 20.10.2006; опубл. 25.06.2008, бюл. № 12.

*Надійшла до редакції  
09 квітня 2013 року*

© Тымчик Г. С., Подолян А. А., 2013

УДК 620.179.14

## ІМПУЛЬСНИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ОБ'ЄКТІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

*Куц Ю.В., Лисенко Ю.Ю.*

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

*Більшість методів вихрострумowego неруйнівного контролю базується на використанні гармонічних сигналів і аналізі їх параметрів та характеристик (амплітуди та фази) після взаємодії з об'єктом контролю. Імпульсний метод може суттєво доповнити можливості традиційних методів вихрострумowego контролю аналізом інших параметрів сигналів - частоти, дисперсії фази та декременту сигналу. Внесений сигнал прохідного вихрострумowego перетворювача формувався як реакція системи «Вихрострумовой перетворювач – об'єкт контролю» на фронт збуджуючого сигналу.*

*У статті розглядаються особливості імпульсного режиму вихрострумowego контролю об'єктів циліндричної форми. Наведені результати експериментальних досліджень наборів циліндричних зразків різного діаметру з алюмінію та бронзи. Приведено отримані залежності інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача від діаметру об'єкта контролю та електропровідності його матеріалу. Напрямо подальших досліджень пов'язаний із підвищенням точності оцінки параметрів інформативних сигналів при імпульсному режимі роботи накладних перетворювачів.*

***Ключові слова:** вихрострумовой контроль, імпульсний режим збудження, перетворення Гільберта, ампліудна характеристика сигналу, фазова характеристика сигналу.*

### **Вступ**

Традиційні методи вихрострумowego неруйнівного контролю (ВСНК) виробів з електропровідних матеріалів орієнтовані на використання неперервних гармонічних сигналів для збудження вихрових струмів у досліджуваних зразках [1, 2]. Водночас, електрофізичні, геометричні параметри та характеристики останніх визначаються через амплітуду і початкову фазу інформаційних сигналів (або через ортогональні складові сигналів у разі їх представлення на комплексній площині).

Імпульсний режим у ВСНК зазвичай застосовують для контролю багатошарових матеріалів та об'єктів зі складною поверхнею. Внаслідок збудження ви-

хрострумівих перетворювачів (ВСП) періодичними імпульсними струмами інформаційний сигнал містить ряд частотних компонент, використання яких дозволяє підвищити інформативність та швидкість контролю, забезпечує виявлення дефектів у багатошарових матеріалах на більшій глибині. Такі сигнали зазвичай аналізуються в частотній області за допомогою перетворення Фур'є.

Дослідниками ВСНК було розроблено чимало способів використання імпульсного режиму для різних практичних застосувань [1]. Наприклад, в задачі імпульсного ВСНК багатошарових структур відстань між ВСП та об'єктом контролю (ОК) досить складно підтримувати незмінною в процесі контролю. Для зменшення впливу варіації цієї відстані на результати вимірювання в роботі [3] було запропоновано двоступеневі диференціальні перетворювачі, проте такі датчики мають складну структуру та чутливі до побічних шумів. Вплив останніх можна зменшити в процесі обробки сигналу, але це створює передумови для виникнення інших похибок. У роботі [4] розглянуто імпульсний ВСНК для оцінки степені корозійного ураження металу. Запропонований метод контролю ґрунтувався на оцінці часового положення точки перетину нуля внесеним сигналом ВСП.

Інша можливість реалізації ВСНК у імпульсному режимі пов'язана з оцінкою параметрів сигналів ВСП в перехідному режимі у часовій області. Попередні дослідження такого режиму роботи засвідчили, що варіація параметрів ОК в системі «ВСП-ОК» призводить до зміни декременту та частоти внесених сигналів ВСП.

У такому режимі інформаційними параметрами можуть бути частота, дисперсія фази та декремент сигналу, тобто параметри, які раніше не використовувались у ВСНК. Зокрема встановлено, що при дослідженні циліндричних ОК з електропровідних немагнітних матеріалів імпульсним ВСНК, декремент  $\alpha$  та частота  $f$  коливань залежать відповідно від електропровідності  $\gamma$  матеріалу та діаметру  $D$  цих ОК, тобто  $\alpha = F(\gamma)$  та  $f = F(D)$  [5]. Проте вид залежності параметрів сигналів від параметрів ОК ще не достатньо вивчений, крім того, задача оцінки числових значень цих параметрів ускладнюється наявністю шумів та завад, що спрощують процес контролю.

Метою роботи є експериментальні дослідження імпульсного режиму збудження ВСП в задачі контролю циліндричних ОК з електропровідних немагнітних матеріалів та підвищення точності оцінки параметрів ОК внаслідок підвищення точності оцінки параметрів інформативних сигналів при такому режимі роботи ВСП.

### **Постановка задачі**

Виконується контроль циліндричних заготовок із неферромагнітних електропровідних матеріалів у прохідному ВСП трансформаторного типу в імпульсному режимі. Контролюються два набори зразків, виготовлених з алюмінію та бронзи (питома електропровідність  $\gamma_{ал} = 4,87 \cdot 10^7$  См/м,  $\gamma_{бр} = 2,75 \cdot 10^7$  См/м), в

кожному з яких зразки відрізняються між собою за діаметром, в діапазоні 34 ÷ 35 мм. Необхідно визначити залежності  $f = F(D)$  та  $\alpha = F(\gamma)$ , а також оцінити точність визначення параметрів ОК.

### Проведення експерименту

Установка для проведення експерименту (рис. 1) містить: генератор, ВСП, цифровий осцилограф, цифровий інтерфейс, персональний комп'ютер з необхідним програмним забезпеченням (Matlab), яке реалізує алгоритми аналізу внесених сигналів ВСП у часовій області на основі використання перетворення Гільберта.

На збуджуючу котушку з кількістю витків  $W_1 = 176$  трансформаторного прохідного ВСП подавався імпульсний сигнал з генератора, амплітудою 15В, періодом повторення  $T = 10^{-2}$  с, тривалістю  $\tau = 10^{-3}$  с:

$$u(t) = \begin{cases} 15 \text{ В}, & t_1 + kT_n < t < t_1 + \tau + kT_n \\ 0 \text{ В}, & t_1 + \tau + kT_n < t < t_1 + T_n(k + 1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Вихідний інформативний сигнал, отриманий з вимірювальної (вихідної) котушки ВСП ( $W_2 = 873$ ), надходив на цифровий осцилограф для аналого-цифрового перетворення і отримання вибірки  $u[j]$ ,  $j = \overline{1, \dots, 2400}$ . Дискретизація виконувалась з періодом  $T_d = 0,5 \cdot 10^{-6}$  с. З цифрового осцилографа значення  $u[j]$  передавались в персональний комп'ютер для подальшої обробки.

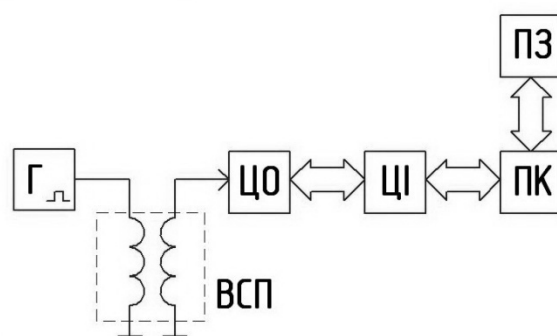


Рис. 1. Структура експериментальної установки

### Результати та їх обговорення

Осцилограму ділянки внесеного сигналу від переднього фронту сигналу збудження (для  $k = 0$ ) представлено на рис. 2. Як видно з графіку, сигнал, отриманий як реакція системи «ВСП-ОК» на передній фронт імпульсного збуджуючого сигналу, загасає впродовж 4-5 періодів  $T$ . Отже, у випадку імпульсного збудження прохідного ВСП та  $\tau = 5T$  модель внесеного сигналу можна представити у вигляді загасаючих гармонічних коливань:

$$u_{\text{всп}}(t, D, \gamma) = U_m e^{-\alpha(D, \gamma)t} \cdot \cos 2\pi f(D, \gamma) \cdot t + U_{\text{ш}}(t), \quad t \in (t_1, t_2),$$

де  $U_m$  – амплітудне значення інформаційної складової сигналу ВСП,  $\alpha(D, \gamma)$  – декремент сигналу,  $f(D, \gamma)$  – частота коливань сигналу,  $t$  – поточний час,  $(t_1, t_2)$  – інтервал часу аналізу сигналу ВСП (реакції на стрибок амплітуди збуджуючого сигналу),  $U_{ш}(t)$  – шумова складова сигналу. Залежно від геометричних розмірів, матеріалу ОК (та дефектів) змінюється частота і загасання цих коливань.

У процесі обробки та аналізу характеристик внесених сигналів ВСП для кожного зі зразків (як алюмінієвих, так і бронзових) було визначено гільберт – образи цих сигналів

$$u_H[j, D, \gamma] = H[u_{\text{всп}}[j, D, \gamma]],$$

де  $H$  – оператор дискретного перетворення Гільберта. Після цього визначались фазова та амплітудна характеристики внесених сигналів [6]:

$$\hat{\Phi}[j, D, \gamma] = \arctg \frac{u_H}{u_{\text{всп}}} + L(u_H[j, D, \gamma], u_{\text{всп}}[j, D, \gamma]),$$

$$\hat{U}[j, D, \gamma] = \sqrt{u_{\text{всп}}^2[j, D, \gamma] + u_H^2[j, D, \gamma]}$$

де  $L$  – оператор розгортання ФХС за межами інтервалу однозначності функції  $\arctg$ .

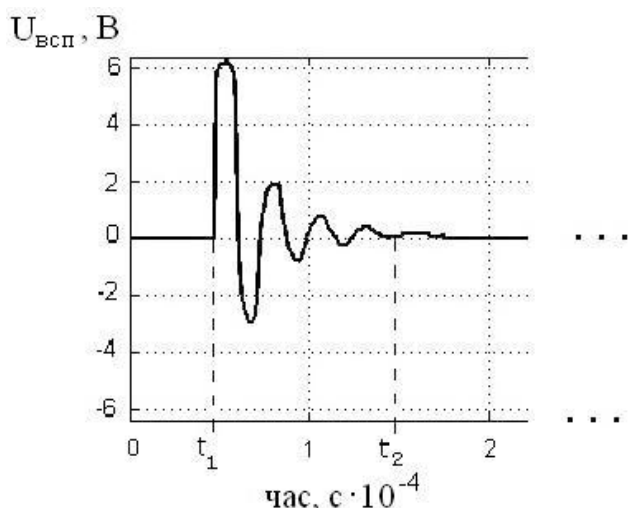


Рис. 2. Графік ділянки внесеного сигналу ВСП

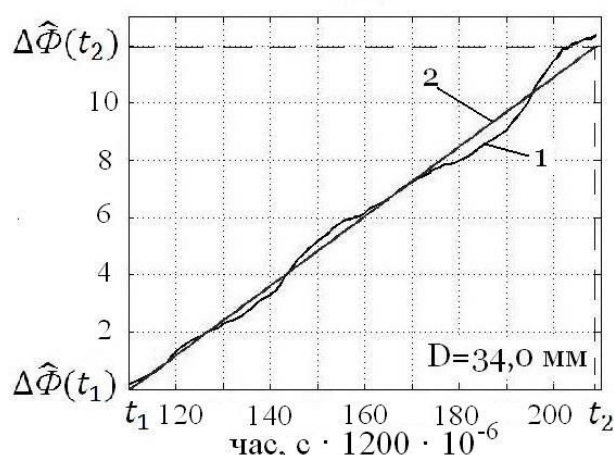


Рис. 3. Вид ФХ сигналу ВСП

Отримано фазову характеристику сигналу (ФХС) (крива 1 рис. 3) на прикладі алюмінієвого зразка із діаметром  $D = 34$  мм, із якого видно, що ФХС  $\hat{\Phi}(t)$  наближена до лінійної функції часу.

Використовуючи ФХС, визначити середню частоту внесених сигналів можна за наступною формулою:

$$f(D, \gamma) = \frac{\Delta\hat{\Phi}[D, \gamma]}{2\pi\Delta T},$$

де  $\Delta\hat{\Phi}[D, \gamma]$  – накопичена за час  $\Delta T$  фаза внесеного сигналу (наприклад, за час

$(t_2 - t_1)$ ).

Прийняття гіпотези про лінійний характер функції  $\hat{\Phi}[j, D, \gamma]$  від часу дозволяє застосувати для її згладжування один з методів визначення лінійної регресії, наприклад, метод Бартлетта-Кенуя. Даний метод відноситься до простих і може застосовуватись для аналізу невеликих за обсягом вибірок.

Суть методу полягає в упорядкуванні експериментальних даних за часом  $t$  і розбитті змістовної частини вибірки  $\hat{\Phi}[j, D, \gamma]$ ,  $j = 110 \dots 209$ , на 3 рівні групи обсягом  $M = 33$ . У кожній групі знаходяться суми виду  $\sum \hat{\Phi}[j, D, \gamma]$  і  $\sum t_j$ . Позначимо їх відповідно  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  і  $t_1, t_2, t_3$ . Тоді коефіцієнти регресії оцінюються співвідношеннями:

$$k = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{t_3 - t_1}, \quad b = \bar{\Phi} - k\bar{t} \quad \text{або} \quad b = \frac{\Phi_2}{M} - k \cdot \frac{t_2}{M},$$

$$\text{де } \bar{\Phi} = \frac{\sum \hat{\Phi}[j, D, \gamma]}{3M} \quad \text{та} \quad \bar{t} = \frac{\sum t_j}{3M}.$$

На рис. 3 кривою 2 представлено графік отриманого за викладеною методикою лінійного тренду  $\hat{\Phi}_L[j, D, \gamma]$  на прикладі алюмінієвого зразка з діаметром  $D = 34$  мм.

Визначення значення частоти проводиться за функцією  $\hat{\Phi}_L[j, D, \gamma]$ :

$$f_L(D, \gamma) = \frac{\Delta \hat{\Phi}_L[D, \gamma]}{2\pi \Delta T},$$

де  $\Delta \hat{\Phi}_L[D, \gamma]$  - накопичена фаза внесеного сигналу за час  $\Delta T = t_2 - t_1$ , визначена за лінійною регресією:  $\Delta \hat{\Phi}_L(D, \gamma) = \hat{\Phi}[j = 99, D, \gamma] - \hat{\Phi}[j = 1, D, \gamma]$ .

Визначення частоти  $f(D, \gamma)$  проводилось для всіх зразків з обраної серії. На рис. 4а, 4б представлено графік функції  $f = F(D)$  (криві 1 - для алюмінієвих та бронзових зразків на відповідних графіках 4а, 4б та криві 2 - лінійний тренд цих функцій). Зі співставного аналізу цих кривих можна зробити висновок щодо слабкої залежності частоти від електропровідності матеріалу  $\gamma$ . Для зразків із діаметрами 34,8 та 34,9 мм значне відхилення результату від кінцевої функції може бути наслідком наявних скритих дефектів чи зміною електропровідності зразків. При визначенні діаметру таким способом абсолютна похибка рівна 0,1 мм, а відносна - 0,3%.

Декремент внесеного сигналу ВСП визначався за формулою:

$$\alpha(D, \gamma) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1, D, \gamma)}{\hat{U}(t_2, D, \gamma)}.$$

де  $\hat{U}(t_1, D, \gamma)$ ,  $\hat{U}(t_2, D, \gamma)$  - значення амплітудної характеристики внесеного сигналу (АХС) відповідно в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ .

Підвищення точності визначення декременту сигналу досягалося внаслідок експоненційної апроксимації АХС ВСП  $\hat{U}(t, D, \gamma)$ . У результаті виконаних досліджень встановлено, що для підвищення точності оцінки коефіцієнтів експоненційної апроксимації особливо важливо врахувати ділянку АХС, яка відповідає першим періодам внесеного сигналу ВСП, тобто періодам із найбільшими значеннями АХС.

На рис. 5 представлено залежність декременту  $\alpha$  внесеного сигналу ВСП від діаметра  $D$  ОК, отриманого для ОК з бронзи (крива 1) та алюмінію (крива 2). Як видно з наведених залежностей, зміна електропровідності матеріалу ОК призводить до зміни декременту внесеного сигналу ВСП. Крім того, криві 1 та 2 не перетинаються, що дозволяє виконувати сортування заготовок по електропровідність через визначення декременту сигналу ВСП.

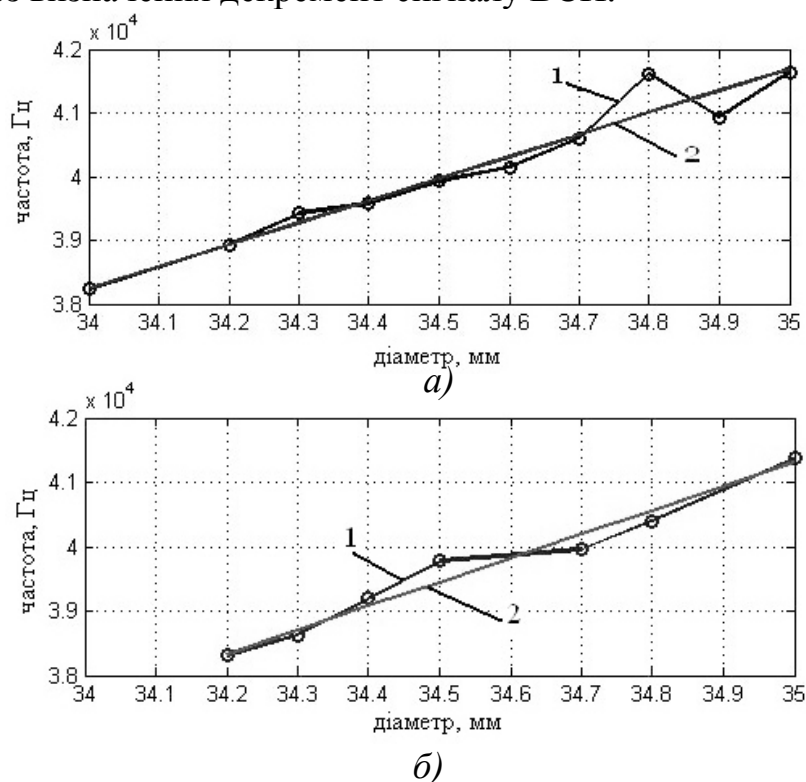


Рис. 4. Залежність частоти вихідного сигналу від діаметру ОК: алюмінієвих (а) та бронзових (б) зразків

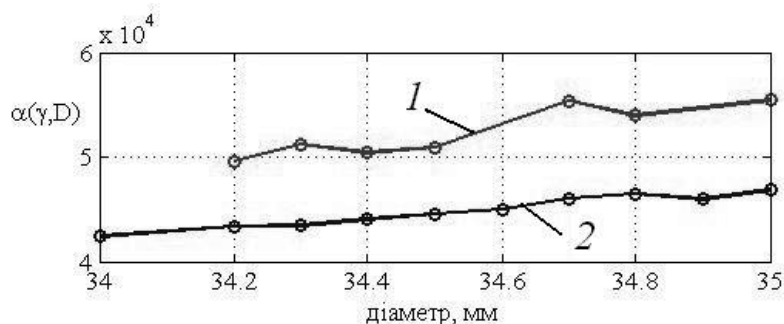


Рис. 5. Залежність декременту вихідного сигналу від діаметру ОК

## **Висновки**

Встановлено, що під час контролю циліндричних зразків з електропровідного матеріалу в імпульсному режимі, частота внесеного сигналу залежить лінійно від діаметру ОК і практично не залежить від електропровідності матеріалу ОК. Спотворення сигналу шумами і завадами та швидке загасання внесеного сигналу ускладнює визначення його частоти. За таких умов підвищити точність визначення частоти, а отже і діаметру ОК, вдалося внаслідок визначення частоти внесеного сигналу за лінійною регресією ФХС. Абсолютна похибка визначення діаметру ОК запропонованим способом не перевищувала 0,1 мм, що відповідає відносній похибці – 0,3%.

Під час оцінки декременту внесеного сигналу ВСП виявлено, що існує суттєва різниця його значень для різних матеріалів ОК, що свідчить про залежність декременту від електропровідності матеріалу ОК. Це дозволяє застосовувати декремент як інформативний параметр для сортування зразків з різними електропровідностями.

Інформативні параметри частота та декремент вихідного сигналу ВСП не залежать від амплітуди вхідного імпульсу. Імпульсний режим роботи ВСП може бути застосований для двопараметрового контролю прутків, а саме оцінки діаметру та електропровідності.

Подальші дослідження імпульсного ВСНК будуть пов'язані з підвищенням точності оцінки параметрів інформативних сигналів при імпульсному режимі роботи накладних вихрострумівих перетворювачів.

## **Література**

1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: в 3 кн. / В.В. Сухоруков – М.: Высшая школа, 1991. Т. 3: Электромагнитный НК. – 1992. – 320 с.
2. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2 т. / В.В. Ключев. – М.: Машиностроение, 2003. Т. 2: Вихретоковый контроль. – 2003. – 688 с.
3. Уменьшение чувствительности к влиянию зазора при контроле импульсным вихретоковым методом с использованием двухступенчатых дифференциальных датчиков / Шу Л., Сон-Линь Х., Вей Ж., Ю. Пенг. [и др.] // Дефектоскопия. – 2008. - № 2. – С. 84 – 93.
4. R. A. Morris, Quantitative Pulsed Eddy Current Analysis // Proc. of the 10th Symposium on NDE, 1975. – 1975. - pp. 90 – 97.
5. Лисенко Ю.Ю. Дослідження імпульсного режиму збудження вихрострумівих перетворювачів / Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В. // НК та технічна діагностика - UkrNDT-2012: VII Нац. наук.–техн. конф., 20 - 23 лист. 2012 р. – 2012. – с. 439.
6. Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя, 2009. – 383 с.

*Надійшла до редакції  
04 квітня 2013 року*

© Куц Ю.В., Лисенко Ю.Ю., 2013