

2. Корогод А. С. Пирометр с FRAM- памятью / А. С. Корогод, А. Г. Протасов // Сб. докладов 6-й международной н-т конф. «Приборостроение 2013», Минск. – 2013. – С. 68 – 70.
3. <http://www.maximintegrated.com/>
4. <http://pdfserv.maxim-ic.com/arpdf/DS18S20.pdf>.
5. <http://www.maximintegrated.com/en/products/ibutton/software/1wire/wirekit.cfm/>

*Надійшла до редакції  
15 лютого 2015 року*

© Протасов А. Г., 2015

УДК 620.179.14

## ІМПУЛЬСНИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ПОКРИТТЯ НА МАГНІТНІЙ ОСНОВІ

*Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю.*

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

*В статті розглядається проста і ефективна альтернатива традиційному вихрострумівому методу неруйнівного контролю з гармонічним збудженням – імпульсний вихрострумівий метод контролю. Можливості застосування цього методу показані на прикладі контролю товщини діелектричного покриття на електропровідній основі. Метою роботи є аналіз системи контролю товщини покриття перетворювачем в режимі імпульсного збудження. Наведено методіку оброблення інформаційного сигналу - відгуку системи «ВСП-ОК» на збуджуючий імпульсний сигнал, яка ґрунтується на використанні перетворення Гільберта. Наведено експериментальні результати оцінки товщини покриття. В якості інформативних параметрів сигналу перетворювача, розглянуто використання частоти та загасання коливань інформаційного сигналу. Встановлено загальний характер залежності цих параметрів від товщини діелектричного покриття.*

***Ключові слова:** імпульсний вихрострумівий неруйнівний контроль, перетворення Гільберта, амплітудна та фазова характеристики, декремент, частота сигналу.*

### **Вступ**

Застосування в засобах неруйнівного контролю сучасних цифрових методів оброблення інформативних параметрів сигналів дозволяє підвищити їх ефективність і розширити функціональні можливості. Традиційні методи вихрострумівого неруйнівного контролю (ВСНК) з використанням гармонічного сигналу збудження при оцінці різних характеристик об'єкта контролю (ОК) зазвичай полягає в аналізі таких інформативних параметрів, як амплітуда і початкова фаза прийнятих сигналів (або ортогональні складові сигналів у разі їх представлення на комплексній площині) [1]. Проте в практиці ВСНК все частіше застосовують й інші методи ВСНК, наприклад методи, які ґрунтуються на імпульсному збудженні вихрових струмів. Наприклад в роботі [2] розглянуто спільне використання гармонічного і імпульсного режимів збудження електромагнітного поля при контролі стінок труби з метою збільшення числа контрольованих характеристик ОК. Позитивний ефект досягається за рахунок використання під час оброблення інформаційного сигналу вихрострумівого перетворювача (ВСП) додатко-

вих інформативних параметрів, таких як загасання сигналу ВСП і зміна часового положення точки перетину нульового рівня цим сигналом. В роботі [3] описаний імпульсний режим ВСНК, який застосовували для оцінки ступеня корозійного ураження металу. Його суть також полягає в оцінці часового положення точки перетину нульового рівня сигналом ВСП.

Можливості цих методів обмежені тим, що значна частина інформації, що міститься в аналізованому сигналі, не використовується. Натомість застосування методу оброблення сигналів ВСНК на основі перетворення Гільберта дозволяє отримувати амплітудні і фазові характеристики сигналу (АХС і ФХС) ВСП, за якими можна оцінити додаткові інформативні параметри, в тому числі загасання і частоту цього сигналу [4, 5].

Імпульсний режим у ВСНК також застосовують для контролю багатошарових матеріалів та об'єктів [6]. За рахунок збудження вихрострумів перетворювачів (ВСП) періодичними імпульсними струмами інформаційний сигнал містить ряд частотних компонент, використання яких дозволяє підвищити інформативність та швидкість контролю, забезпечує виявлення дефектів в багатошарових провідних середовищах на більшій глибині.

Таким чином, ВСНК з імпульсним збудженням може істотно доповнити відомі методи за рахунок можливості аналізу таких параметрів сигналів як частота, дисперсія фази, декремент сигналу і часове положення характерних точок сигналу.

## **1. Мета та задачі дослідження**

Метою даної роботи є розробка і аналіз системи ВСНК товщини діелектричного покриття на провідній основі з імпульсним збудженням ВСП, а також виявлення та аналіз інформативних параметрів сигналів та їх залежностей.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- 1) дослідити використання імпульсного режиму збудження накладного ВСП з подальшим аналізом сигналу у часовій області;
- 2) виявити і проаналізувати інформативні параметри сигналів накладного ВСП з імпульсним збудженням;
- 3) визначити залежності параметрів інформаційного сигналу від товщини покриття зразків з різними електропровідністю і магнітною проникністю.

## **2. Проведення дослідження**

### **2.1. Опис лабораторного стенду**

На рис.1 приведено структуру системи ВСНК, яка складається з накладного трансформаторного ВСП, генератора струму (ГС), аналого-цифрового перетворювача (АЦП), буферного регістра пам'яті (БРП), цифрового інтерфейса (ЦІ), персонального комп'ютера (ПК) з необхідним програмним забезпеченням (ПЗ), та блока управління (БУ). Розроблене ПЗ передбачало реалізацію алгоритму аналізу внесених сигналів ВСП в часовій області на основі перетворення Гільберта для отримання АХС та ФХС.

На первинну котушку ( $W_1 = 80$ ) накладного ВСП надходив збуджуючий імпульсний сигнал від генератора струму (сила струму  $I = 5 \text{ мА}$ , період повторювання  $T_n = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , тривалість  $\tau = 62.4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ :

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

Сигнал вимірювальної котушки ( $W_2 = 420$ ) ВСП посилювався та оцифровувався АЦП, в результаті чого було отримано вибірки  $u[j]$ ,  $j = \overline{1, \dots, 10000}$ . Дискретизація сигналу виконувалася з періодом  $T_D = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Отримані дані записувалися до БРП і через ЦІ передавалися у ПК для подальшого оброблення та аналізу. Синхронізація роботи основних елементів даної системи забезпечувалася БУ.

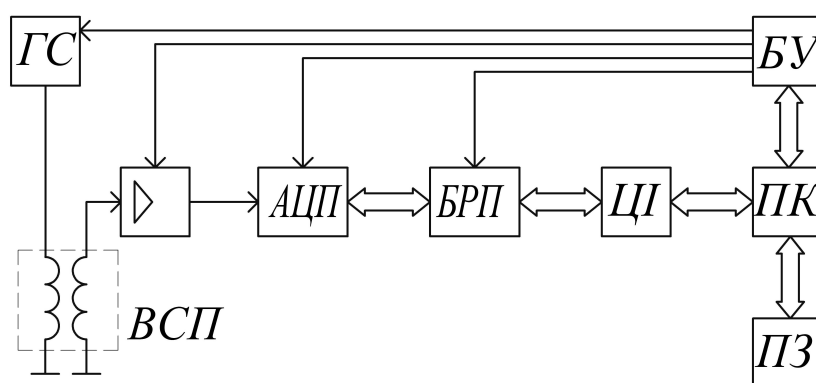


Рис. 1. Структура вихрострумової системи контролю товщини діелектричних покриттів на магнітній основі

## 2.2. Методика проведення дослідження

На першому етапі проведення експерименту було проаналізовано вплив характеристик матеріалу ОК без покриття на параметри інформаційного сигналу накладного трансформаторного ВТП, працюючого в імпульсному режимі. В якості ОК використовувались заготовки з алюмінію, бронзи і сталі (питома електропровідність  $\gamma_{\text{ал}} = 4,87 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ,  $\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ,  $\gamma_{\text{ст}} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ ) з товщиною, що перевищувала глибину проникнення вихрових струмів. На другому етапі аналізувався вплив різної товщини діелектричного покриття ОК із зазначених вище матеріалів на інформативні параметри інформаційного сигналу ВТП. Для аналізу впливу характеристик ОК на сигнал ВТП, як інформативні параметри були обрані частота і декремент цих сигналів.

## 2.3. Алгоритм опрацювання інформативних параметрів сигналів ВСП

Модель інформативного сигналу ВТП представляється у вигляді загасаючих гармонічних коливань виду:

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

де  $U_m$  – амплітудне значення інформаційної складової сигналу ВСП,  $\alpha(h, \gamma)$  – де

кремент сигналу,  $f(h, \gamma)$  – частота коливань сигналу,  $t$  – поточний час,  $(t_1, t_2)$  інтервал часу аналізу сигналу ВСП (реакції на стрибок амплітуди збуджуючого сигналу),  $u_{\text{ш}}(t)$  – шумова складова сигналу. В залежності від матеріалу основи і товщини діелектричного покриття змінюється частота і загасання цих коливань.

Обробка та аналіз характеристик інформаційних сигналів накладного ВСП для кожного з матеріалів заготовок (алюмінієвого, бронзового та сталюого) полягали у [7]:

- 1) визначення гільберт – образів сигналів ВСП:

$$u_H[j, h, \gamma] = \mathbf{H}[u_{\text{всп}}[j, h, \gamma]], \quad (3)$$

де  $\mathbf{H}$  – оператор дискретного перетворення Гільберта;

- 2) визначення фазових та амплітудних характеристик інформаційних сигналів (ФХС та АХС):

$$\Phi[j, h, \gamma] = \arctg \frac{u_H}{u_{\text{всп}}} + \mathbf{L}(u_H[j, h, \gamma], u_{\text{всп}}[j, h, \gamma]), \quad (4)$$

$$U[j, h, \gamma] = \sqrt{u_{\text{всп}}^2[j, h, \gamma] + u_H^2[j, h, \gamma]} \quad (5)$$

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

- 3) прийняття гіпотези про лінійну зміну в часі функції  $\Phi[j, h, \gamma]$ , що дозволяє застосувати для її згладжування один з методів визначення лінійної регресії, наприклад, метод Бартлетта-Кенуя. Даний метод відносно простий і може використовуватися для аналізу невеликих за обсягом вибірок. В основі методу лежить упорядкування експериментальних даних за часом  $t$  і поділ корисної частини вибірки  $\Phi[j, h, \gamma]$  (для заготовок з алюмінію та бронзи об'ємом  $j_{\text{ал}} = j_{\text{бр}} = 1500 \dots 6000$ , для заготовок із сталі  $j_{\text{ст}} = 1500 \dots 3501$ ) на три приблизно рівні за обсягом групи  $M = M_{\text{ал}} = M_{\text{бр}} = 1500$ ,  $M_{\text{ст}} = 667$ . У кожній групі знаходяться суми виду  $\sum \Phi[j, h, \gamma]$  та  $\sum t_j$ . Позначимо їх відповідно  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  і  $t_1, t_2, t_3$ . Тоді коефіцієнти лінійної регресії оцінюються співвідношеннями:

$$k = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{t_3 - t_1}, \quad b = \bar{\Phi} - k\bar{t} \quad \text{або} \quad b = \frac{\Phi_2}{M} - k \cdot \frac{t_2}{M}, \quad (6)$$

де  $\bar{\Phi} = \frac{\sum \Phi[j, h, \gamma]}{3M}$  та  $\bar{t} = \frac{\sum t_j}{3M}$ ;

- 4) визначення частоти сигналів ВСП з лінійного тренда функції  $\Phi[j, h, \gamma]$ :

$$f_{\text{л}}(h, \gamma) = \frac{\Delta \hat{\Phi}_{\text{л}}[h, \gamma]}{2\pi \Delta T}, \quad (7)$$

де  $\Delta \hat{\Phi}_{\text{л}}[h, \gamma]$  – накопичена за час  $\Delta T$  фаза сигналу ВСП, отримана за функцією лінійної регресії:

- для заготовок з алюмінію та бронзи:

$$\Delta \hat{\Phi}_{\text{л}}(h, \gamma) = \hat{\Phi}[j = 4500, h, \gamma] - \hat{\Phi}[j = 1, h, \gamma],$$

- зі сталі:

$$\Delta\widehat{\Phi}_\Pi(h, \gamma) = \widehat{\Phi}[j = 2001, h, \gamma] - \widehat{\Phi}[j = 1, h, \gamma].$$

5) застосування експоненціальної апроксимації АХС ВСП  $U(t, h, \gamma)$  з метою підвищення точності при визначенні декременту інформаційного сигналу. Встановлено, що для підвищення точності оцінки коефіцієнтів експоненціальної апроксимації особливо важливо врахувати ділянку АХС, яка відповідає першим періодам інформаційного сигналу ВСП, тобто періодам з найбільшими значеннями і крутістю АХС.

6) знаходження декрементів інформаційних сигналів ВСП за формулою:

$$\alpha(h, \gamma) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\widehat{U}(t_1', h, \gamma)}{\widehat{U}(t_2', h, \gamma)}. \quad (8)$$

де  $\widehat{U}(t_1', h, \gamma)$ ,  $\widehat{U}(t_2', h, \gamma)$  – значення апроксимаційних кривих відповідно в моменти часу  $t_1'$  и  $t_2'$ .

### 3. Результати та їх обговорення

Отримані на першому етапі експерименту сигнали ВСП при імпульсному електромагнітному контролі заготовок з алюмінію, бронзи і сталі без покриттів, наведені на рис. 2. Різні значення електропровідності і магнітної проникності матеріалів заготовок привели до зміни частоти і швидкості загасання сигналу ВСП.

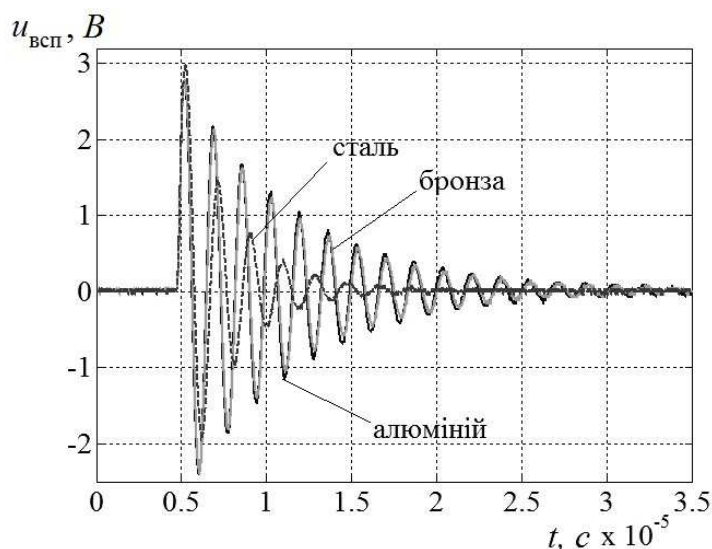


Рис. 2. Графік ділянки сигналів ВСП

На рис. 3 зображено графік сигналів при контролі заготовки зі сталі з різною товщиною діелектричного покриття. Крива 1 відповідає фрагменту сигналу ВСП при контролі заготовки без покриття, крива 2 – покриттю 1.62 мм, крива 3 – 4.90 мм. Як видно, із збільшенням товщини покриття вплив вихрових струмів ОК на інформаційний сигнал ВСП зменшується. При цьому амплітудне значення сигналу збільшується, а їх частота залишається постійною.

На рис. 4 наведено графік отриманої залежності, який вказує на збільшення значення декременту сигналу ВСП при зменшенні товщини діелектричного по-

криття в межах одного матеріалу. З порівняльного аналізу цих кривих можна зробити висновок про те, що загальний вигляд кривої зміни декремента сигналів ВСП по відношенню до товщини покриття на будь-якій основі є експоненціальним.

Також можна зробити висновок, що характеристики матеріалу основи заготовок впливають на значення нахилу одержаних кривих. Для заготовки зі сталі з покриттям незначне відхилення результату від загального вигляду функціональної залежності може бути наслідком наявних прихованих дефектів, зміною характеристик заготовок або похибкою визначення реального значення товщини покриття.

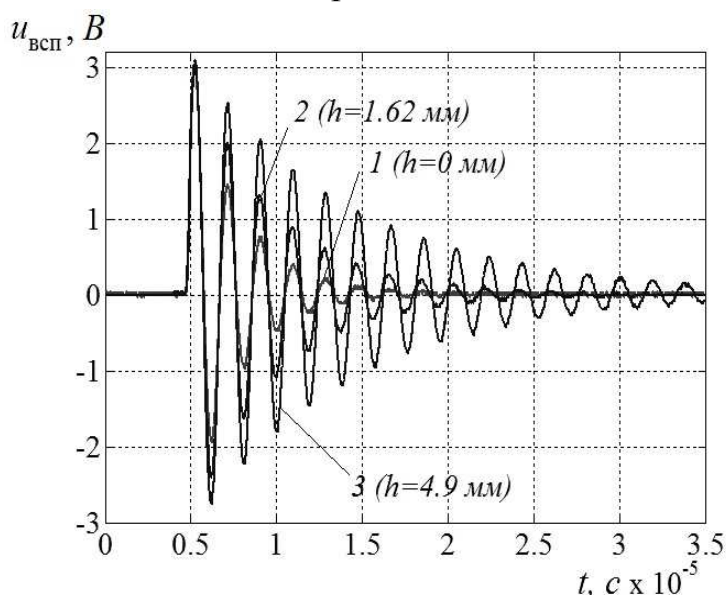


Рис. 3. Залежність амплітуди сигналів ВСП від товщини покриття

Результати визначення частоти сигналів ВСП як функції від товщини діелектричного покриття приведені на рис. 5.

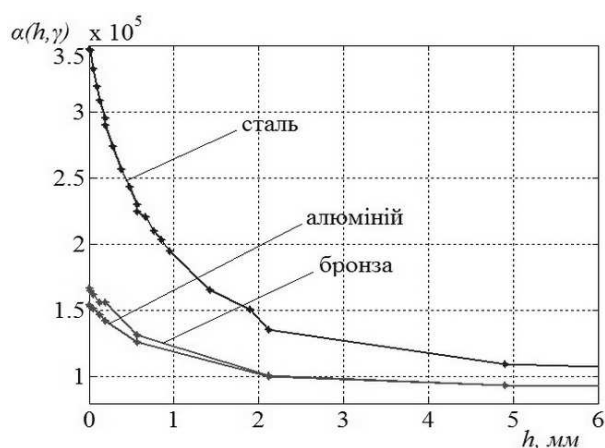


Рис. 4. Залежність декремента сигналів ВСП від товщини покриття

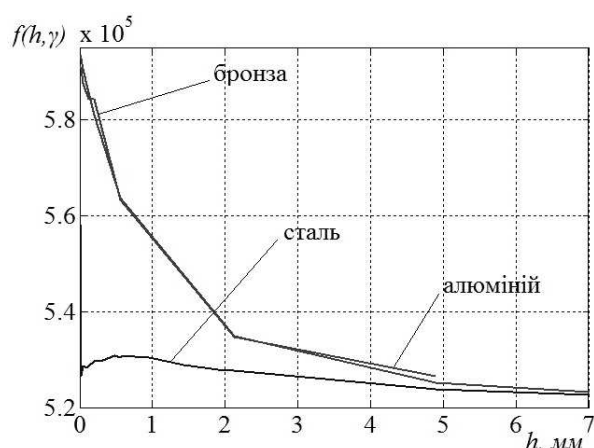


Рис. 5. Залежність частоти сигналів ВСП від товщини покриття

Залежність  $f(h)$  дає однозначний результат тільки для немагнітних матеріалів. Крім того спостерігається істотний вплив магнітної проникності матеріа-

лів заготовок на значення частоти сигналу ВСП, при чому цей вплив посилюється із зменшенням товщини покриття. Цей факт також необхідно враховувати при розробці імпульсних вихрострумових товщиномірів.

### **Висновки**

В даній статті показано особливості застосування методу ВСНК з імпульсним збудженням при контролі товщини діелектричних покриттів, що полягають у використанні при обробленні сигналу ВСП таких інформативних параметрів, як частота та загасання коливань інформаційного сигналу. ВСНК з імпульсним збудженням може істотно доповнити відомі методи ВСНК за рахунок можливості аналізу таких параметрів сигналів як частота, дисперсія фази, декремент сигналу і часове положення характерних точок сигналу.

Експериментально встановлено, що при контролі товщини діелектричного покриття заготовок з різних матеріалів в імпульсному режимі, декремент інформаційного сигналу перетворювача залежить від товщини покриття і магнітної проникності матеріалу заготовок. Ця залежність має експоненціальний характер. Також встановлено загальний характер залежності частоти коливань інформаційного сигналу від товщини покриття заготовок.

Імпульсний режим роботи ВСП може бути застосований для контролю товщини діелектричного покриття на електропровідній основі та розшарування покриття. Проте питання характеру впливу матеріалу основи на інформативні параметри сигналу ВСП все ще залишається до кінці не з'ясованим і потребує подальших досліджень.

### **Література**

1. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2 т. / В. В. Ключев. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2: Вихретоковый контроль. – 688 с.
2. Vasic D. Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes / D. Vasic, V. Bilas, D. Ambrus // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2004. – vol. 53, no. 4. – pp. 1289 - 1294.
3. Morris R. A. Quantitative Pulsed Eddy Current Analysis / R. A. Morris // Proc. of the 10th Symposium on NDE – 1975. – pp. 90 - 97.
4. Куц Ю. В. Імпульсний вихрострумовий контроль об'єктів циліндричної форми / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 69 – 75.
5. Лисенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, О. Л. Дугин // Ж-л «Научни Известия НТСМ»: материалы междунар. конф. «Дни НК 2014», 09-18 червня, 2014р., – Созополь, 2014. – № 150 – С. 28 – 30.
6. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный НК / Под ред. В. В. Сухорукова – М.: Высш. школа, 1992. – 320 с.
7. Kuts I. V. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness / Kuts Iu.V., Protasov A.G., Lysenko Iu.Iu., Dugin O.L // The e-Journal of Nondestructive Testing: XI European Conference on Non-Destructive Testing 2014, Prague, 06-10 October 2014. – 2014. – vol. 19, no.12.

*Надійшла до редакції  
29 січня 2015 року*

© Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю., 2015