

PHYSICAL AND TECHNICAL BASIS OF EXPERIMENT AND DIAGNOSTICS

PACS numbers: 07.05.Kf, 42.25.Gy, 75.20.En, 75.50.Bb, 81.70.Ex, 81.70.Jb, 84.40.Xb

Вихорострумний амплітудно-фазовий метод ідентифікації провідних (металевих) об'єктів

А. О. Абрамович, В. О. Піддубний

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37,
03056 Київ, Україна

У роботі розглянуто результати ідентифікації провідних (металевих) об'єктів за допомогою вихорострумної радіотехнічної системи (РС), робота якої ґрунтується на амплітудно-фазовому методі реєстрації відгуку від об'єкта, що досліджується. Проаналізовано існуючі математичні моделі, які описують зміни у сигналі відгуку залежно від параметрів досліджуваних об'єктів. Показано, що вимірювання лише фазового зсуву сигналу, наведеного у приймальній антені РС, відносно фази зондувального сигналу, розглянутого у відомих моделях, дозволяє розподіляти метали лише за ознакою магнетний/немагнетний. Для ідентифікації металів всередині підгруп запропоновано проводити аналіз форми сигналу та оцінювати амплітудно-фазові характеристики відгуку. За запропонованим методом проведено моделювання сигналу відгуків для декількох металів та їх порівняння із одержаними експериментальними результатами. Інформація про експериментальні сигнали відгуків, як узагальнені образи, записували у запам'ятовувальний пристрій і використовували для подальшої ідентифікації невідомих провідних (металевих) об'єктів. Ідентифікація полягає у відсотковому порівнянні параметрів відгуку невідомого об'єкта з відгуком, записаним у базу образів.

Corresponding author: Anton Oleksiyovych Abramovych
E-mail: osslo@ukr.net

National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute'
37 Peremohy Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine

Citation: A. O. Abramovych and V. O. Piddubnyi, Eddy-Current Amplitude-Phase Based Method for Identifying Conductive (Metal) Objects, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 8: 1169–1185 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.08.1169](https://doi.org/10.15407/mfint.42.08.1169).

Ключові слова: електромагнетні властивості металів, вихорострумний перетворювач, дистанційна ідентифікація металів, математичне моделювання, амплітудно-фазовий метод реєстрації сигналів.

The paper deals with the results of identification of conductor (metal) objects by means of an eddy-current radio engineering system, which works on the basis of the amplitude-phase method of recording the response received from the object being investigated. Existing mathematical models that describe changes in feedback are considered. It is shown that measuring only the phase shift of the signal given in the receiving antenna of the system relative to the probe, which is considered in the known models, allows distributing metals only on the basis of magnetic/non-magnetic. In order to identify metals within subgroups, it is proposed to analyze the signal shape and evaluate the amplitude-phase response characteristics. The simulation of the signal for several metals is carried out. Information about them is stored on a storage device and is used to further identify metals, which is a percentage comparison of response parameters from an unknown object with a response recorded in the image database.

Key words: electromagnetic properties of metals, eddy-current converter, location devices, remote identification of metals, mathematical modeling.

(Отримано 18 січня 2019 р.; остаточн. варіант — 29 липня 2020 р.)

1. ВСТУП

Задача дистанційної ідентифікації провідних (металевих) об'єктів є актуальною для низки практичних застосувань [1]. Для її вирішення використовують різні методи, зокрема, рентгенівський, оптоемісійний, вихорострумний [1].

Достатньо ефективним є використання запропонованої в [2] радіотехнічної системи (РС), в основі якої лежить вихорострумний метод виявлення металевих об'єктів [3].

Процесам формування сигналів вихорострумних пристроїв присвячено низку робіт [3–5], але вони у повній мірі не пояснюють особливості виникнення сигналу відгуку та його форму.

У даній публікації наведено результати ідентифікації провідних (металевих) об'єктів, які проведено за допомогою розробленої авторами РС [2], та запропоновано математичну модель, що дозволяє за магнетною проникністю та електропровідністю ідентифікувати тип металу. РС побудовано на основі схемотехнічних рішень вхідних каскадів, які використовують у металопукачах (генератор сигналу, вихідний підсилювач, малошумний вхідний підсилювач та фазовий детектор) [3], та мікроконтролера.

Ідентифікацію металів проведено за допомогою програмного забезпечення, побудованого на основі методики обробки сигналів, запропонованої в [2].

2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ВІДГУКУ У ВИХОРОСТРУМОВУ МЕТОДІ

2.1. Аналіз математичних моделей формування сигналу відгуку

Існує ряд математичних моделей, що пояснюють роботу вихорострумового методу виявлення металевих об'єктів. Зокрема, це модель К. Брушіні [3], модель А. Ю. Гриньова [4] та модель теорії неруйнівного контролю [5].

У моделі К. Брушіні [3] аналізується електричне коло, яке складається з індуктивно зв'язаних між собою елементів (металевого об'єкта, що досліджується, приймальної та передавальної антен). Основні складові моделі показано на рис. 1, де V_2^p — напруга, що наводиться у приймальній антені безпосередньо через зв'язок приймальної та передавальної антен, V_2^s — напруга, що наводиться у приймальній антені завдяки впливу металевого об'єкта, M_{01} , M_{02} , M_{03} — взаємодія між передавальною антеною та об'єктом, приймальною антеною та об'єктом, безпосередньо між антенами, L та R — індуктивність та активний опір, що вносяться у систему взаємно зв'язаних між собою передавальної та приймальної антен завдяки наявності металевих об'єкта, I_0 — струм, що протікає в передавальній антені, I_1 — струм у металевому зразку, що визначає рівень сигналу на вході приймального пристрою. Зв'язок між параметрами електричного кола задається формулами:

$$V_2^p(\omega) = -i\omega M_{02} I_0 e^{i\omega t}, \quad V_2^s(\omega) = -i\omega M_{12} I_1 e^{i\omega t}, \quad (1)$$

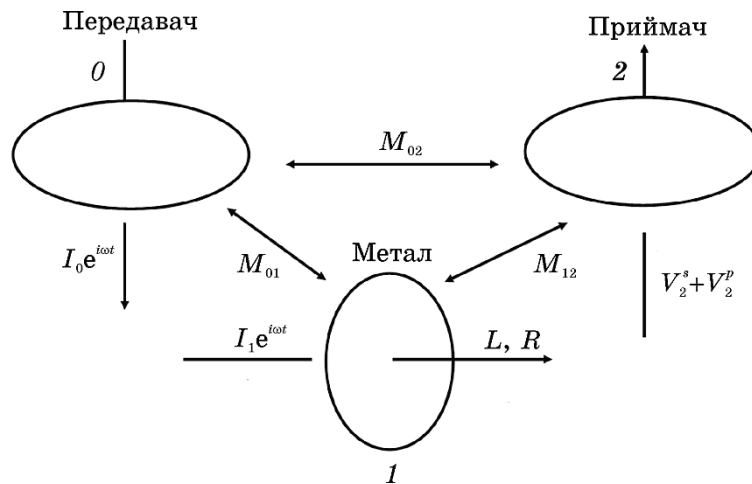


Рис. 1. Основні складові моделі Брушіні [3].

Fig. 1. The main components of the Brushini model [3].

$$I_1 e^{i\omega t} = -\frac{M_{01}}{L} \frac{i\omega L(R - i\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2} I_0 e^{i\omega t}.$$

У моделі розглянуто вплив індуктивності L та активного опору R на сигнал у приймальній антені, який є сумою V_2^p та V_2^s .

Формули (1) дозволяють розрахувати коефіцієнт передачі сигналу між антенами, що виникає завдяки взаємозв'язку антен (взаємодія) та оцінити напругу у приймальній антені при введенні металевих зразків у систему.

Автор пропонує використовувати фазовий зсув між сигналами в приймальній та передавальній антенах як інформативний параметр. Брушіні показав, що аналізуючи фазу отриманого сигналу, можна визначити з якого металу (магнетного чи немагнетного) виготовлено об'єкт, що досліджується. Тобто, було вирішено задачу дихотомічного розрізнення металів. Однак, ідентифікувати об'єкт всередині підгруп модель не дозволяє.

Іншу математичну модель виникнення сигналу в приймальній антені при взаємодії електромагнетного низькочастотного сигналу з металевим об'єктом запропоновано А. Ю. Гриньовим [4]. У цій моделі розглянуто шарувате середовище, через яке проходить сигнал, і одержано вираз для розрахунку цього сигналу:

$$S^*(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(\sum_{j=1}^{\infty} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau, f) d\tau} \right) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt \right] e^{i\omega t} df, \quad (2)$$

де $S^*(t)$ — сигнал, що проходить через шарувате середовище, $\omega = 2\pi f$, $r_{j,j+1}$ — парціальний коефіцієнт відбиття, z_j — границя середовища, $n(\tau, f)$ — коефіцієнт проходження через шари середовища.

Однак, модель, запропонована в [4], коректна лише для радіотехнічної системи, що працює з імпульсними зондувальними сигналами, тому її не можна використовувати для пояснення особливостей формування сигналу у РС, запропонованих в [2].

У моделі, запропонованій в [5], напруга на виході приймальної антени вихорострумівого перетворювача $\dot{U}_{\text{ВД}}$ визначається електромагнетними властивостями об'єкта контролю (ОК) та параметрами антенної системи:

$$\dot{U}_{\text{ВД}}(x, t) = j\omega\mu_0\pi N_{\text{Д}}N_{\text{З}}R_{\text{Д}}I_m \cos(\omega t) \int_0^{\infty} \varphi_1(x, \beta) J_1(xR_{\text{З}^*}) J_1(x) e^{-xh_*} dx, \quad (3)$$

де $N_{\text{Д}}$, $N_{\text{З}}$ — кількість витків у приймальній та передавальній антенах рамочного типу, J_1 — функція Бесселя першого роду першого порядку, λ — параметр інтегрального перетворення, $R_{\text{Д}}$ — радіус приймальної антени, $R_{\text{З}}$ — радіус передавальної антени:

$$h_* = \frac{h_3 + h_{\text{Д}}}{R_3}, \quad R_{3*} = \frac{R_{\text{Д}}}{R_3}.$$

де h_3 — висота передавальної антени, $h_{\text{Д}}$ — висота приймальної антени. У РС використовували антену з наступними геометричними розмірами: $R_3 = 80$ мм, $R_{\text{Д}} = 40$ мм, $h_3 = 5$ мм, $h_{\text{Д}} = 5$ мм та $N_3 = 85$, $N_{\text{Д}} = 280$, $x = \lambda R_3$. За формулою (3) розраховано сигнали для ОК, які виготовлені зі сталі ($\mu_r = 100$, провідність — $7,69 \cdot 10^6$ См/м) та міді ($\mu_r = 1$, провідність — $58,1 \cdot 10^6$ См/м) (рис. 2 і рис. 3).

На рисунках 2 і 3 по горизонтальній осі відкладено дискретні відліки часу t у мілісекундах, а по вертикальній осі — амплітуда сигналу $\dot{U}_{\text{ВД}}$ у мілівольтах. Форма сигналу на рисунках 2 і 3 однакова, параметри сигналу ідентичні і збігаються, що суперечить результа-

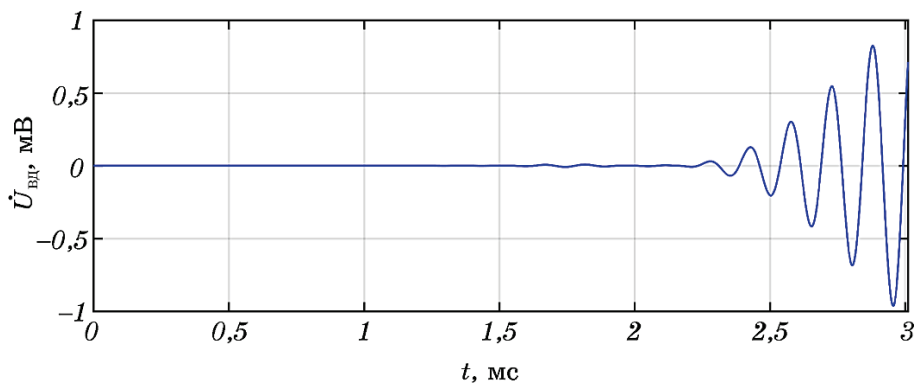


Рис. 2. Сигнал $\dot{U}_{\text{ВД}}$ для об'єкта контролю, виготовленого зі сталі.

Fig. 2. The signal $\dot{U}_{\text{ВД}}$ for object of control is made of steel.

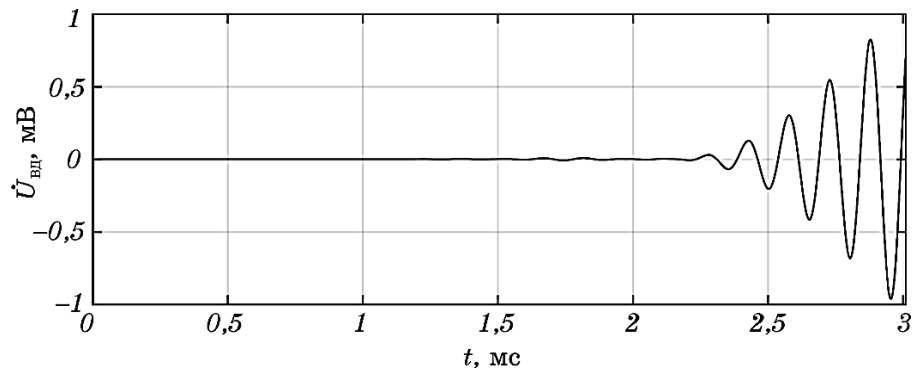


Рис. 3. Сигнал $\dot{U}_{\text{ВД}}$ для об'єкта контролю, виготовленого із міді.

Fig. 3. The signal $\dot{U}_{\text{ВД}}$ for object of control is made of copper.

там, одержаним за моделлю Брушіні [3], та експериментальним дослідженням, проведеним нами в [2].

Таким чином, запропонована в [5] модель, не дозволяє пояснити експериментальні результати, одержані в [2]. Проте, введена у даній моделі функція впливу $\varphi_1(x, \beta)$ [5–7], що враховує електричні та магнетні властивості металів, може бути вихідним параметром для оцінки відмінностей у сигналах для різних металів:

$$\varphi_1(x, \beta) = \frac{\mu_r - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{\mu_r + \sqrt{x^2 + j\beta^2}}, \quad (4)$$

де μ_r — відносна магнетна проникність, $x = \lambda R_3$, λ — параметр інтегрування,

$$\beta = R_3 \sqrt{\omega \mu_a \sigma},$$

σ — електропровідність металу, μ_a — абсолютна магнетна проникність.

Для прикладу покажемо різницю в значеннях функції $\varphi_1(x, \beta)$ для сталі 20, нікелю, свинцю та електротехнічної міді. Як відомо, відносна магнетна проникність сталі $\mu_r = 100$, міді $\mu_r = 1$, нікелю $\mu_r = 100$ –600 (візьмемо 100), свинцю $\mu_r = 1$, провідність сталі становить $7,69 \cdot 10^6$ См/м, міді — відповідно $58,1 \cdot 10^6$ См/м, нікелю — $11,5 \cdot 10^6$ См/м, а свинцю — $4,81 \cdot 10^6$ См/м. Розраховані значення функції впливу φ_1 (4) для різних металів наведено нижче:

$$\begin{aligned} |\varphi_{1\text{сталі}}(x, \beta)| &= 0,802, & |\varphi_{1\text{нікель}}(x, \beta)| &= 0,833, \\ |\varphi_{1\text{мідь}}(x, \beta)| &= 0,992, & |\varphi_{1\text{свинець}}(x, \beta)| &= 0,972. \end{aligned}$$

Різниця між функціями впливу для металів мідь/сталь більша за 19,0%, а мідь/нікель більша за 16,0%. Як показано у роботах [8, 9], це пов'язано зі спектрами сигналів, що одержані від ОК, виготовлених з різних металів, а це дозволяє ідентифікувати метал за спектральними характеристиками. Крім того, порівнювати сигнали можна за допомогою графічно-цифрових образів [2, 10], що також дозволяє досягти поставленої мети. Однак, використання спектрального аналізу та графічно-цифрових образів не пояснюють виникнення сигналу та не відображають у сигналі інформативних ознак, закладених в формі сигналів, одержаних від різних металів.

2.2. Амплітудно-фазова модель формування сигналу відгуку

Розглянемо процеси, які відбуваються у вхідних каскадах використаної нами РС вихорострумового аналізу металів при скануванні ОК. Сигнал на вході фазового детектора РС можна представити як

$$U_3 = f[U_{\text{вд}}(x, \mu_r, \sigma)].$$

У разі відсутності ОК у зоні дії антенної системи на приймальну антену від передавальної антени наводиться сигнал частотою ω . Миттєве значення напруги у приймальній антені буде

$$U_{03} = U_{03\text{max}} \cos(\omega t),$$

де $U_{03\text{max}}$ — амплітуда сигналу, що наводиться в антені.

Якщо металевий ОК рухається паралельно антенній системі та перетинає її вздовж осі, що проходить через центр системи, то на виході приймальної антени змінюється фаза та амплітуда наведеного сигналу.

Рух ОК відносно антени відбувається з постійною швидкістю, що закладено в конструкції РС. Будемо вважати, що в першому наближенні закон зміни фази та амплітуди лінійний, тому що рух ОК рівномірний і є функцією часу. При проходженні ОК над антеною відбувається зміна амплітуди сигналу внаслідок руху та фазової модуляції сигналу (зміни фази наведеного сигналу).

Зміна амплітуди сигналу пропорційна лінійній швидкості проходження ОК між витками приймальної та передавальної антен. Миттєве значення коливання, що наводиться у приймальній антені, матиме вигляд:

$$U_{13} = U_{130} \cos(Vt/L) \cos(\omega t), \quad (5)$$

де U_{13} — напруга у приймальній антені із урахуванням руху металевих ОК, U_{130} — базове значення напруги на антені, V — лінійна швидкість руху металевих ОК вздовж витків антени, L — відстань між приймальною та передавальною антенами.

Крім амплітудної відбувається і фазова модуляція сигналу, яка виникає завдяки затримці між вхідним зондувальним сигналом та сигналом у приймальній антені.

Фаза змінюється від мінімального до максимального значення, які визначаються властивостями ОК.

Тому, із урахуванням руху антени над металевим ОК, миттєве значення сигналу на приймальній антені може бути записано як:

$$U_3 = U_{130} \cos(Vt/L) \cos(\omega t + \varphi(t)), \quad (6)$$

де

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{поч}} + \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{\text{макс}}} t,$$

$\varphi_{\text{поч}}$ — початкове значення зсуву фази, $\varphi_{\text{макс}}$ — максимальне значен-

ня зсуву початкової фази, $\Delta\varphi$ — крок зміни початкової фази.

Сигнал U_3 подається на вхід синхронного детектора (рис. 4) [11], який виділяє сигнал, пропорційний фазовим зсувам в антенній системі, що виникає через вплив ОК на взаємозв'язок між антенами. На вхід синхронного фазового детектора від генератора поступає опорний сигнал $U_{\text{опор}}$ та сигнал від приймальної антени U_3 . Сигнал на виході синхронного фазового детектора U_a , пропорційний характеру зміни фази:

$$\dot{U}_a = \begin{cases} 0, & f_3 \neq f_{\text{опор}}, \\ \frac{1}{2} \dot{U}_3 \cos \varphi, & f_3 = f_{\text{опор}}, \end{cases}$$

де U_a — напруга на виході синхронного фазового детектора, U_3 — напруга на вході фазового детектора, f_3 — частота сигналу на вході фазового детектора, $f_{\text{опор}}$ — частота опорного сигналу (частота, яка випромінюється антенною системою РС), φ — фазовий зсув між сигналами, $U_{\text{опор}}$ — напруга опорного сигналу.

Сигнал U_a оцифровується та обробляється в електронному блоці РС методами, запропонованими авторами в [2], що дозволяє ідентифікувати метал, з якого виготовлено об'єкт контролю.

Моделювання сигналу за запропонованою методикою дозволило сформувати сигнали, близькі за формою до отриманих експериментально.

3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Першим етапом моделювання є визначення початкового зсуву фази

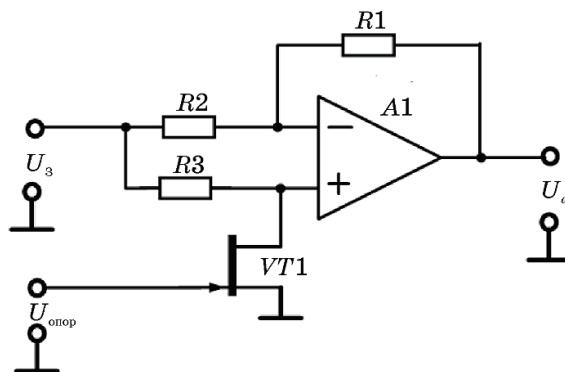


Рис. 4. Схема синхронного фазового детектора [11].

Fig. 4. Synchronous phase detector circuit [11].

$\varphi_{\text{поч}}$ та його максимального значення $\varphi_{\text{макс}}$, які залежать від магнетичних та електричних властивостей об'єкта контролю. Експериментально виміряні значення зсуву фази відносно опорного сигналу на виході синхронного фазового детектора вказано у табл. 1.

При проведенні експериментальних досліджень використовували зразки різних геометричних форм (пластини $20 \times 20 \times 2$, $20 \times 30 \times 2$, $20 \times 60 \times 2$, $160 \times 20 \times 2$ мм та циліндри діаметром 25 мм та товщиною 3 мм). Слід зазначити, що результати моделювання коректні лише для зразків, розміри яких менші діаметра приймальної антени.

Моделювання виконували за допомогою пакету прикладних програм MATLAB [12]. Результати моделювання сигналу на виході фазового детектора показано на рис. 5 (для ОК, виготовленого зі сталі) та рис. 6 (для ОК, виготовленого із міді).

З рисунка 5 видно, що в сигналі, одержаного від ОК із міді, перший максимум має негативну полярність та різна величина сигналу на максимумах. Сигнал, одержаний для ОК зі сталі (рис. 6), має пе-

ТАБЛИЦЯ 1. Експериментальні значення зсуву фази для сталі, міді, свинцю та титану.

TABLE 1. Experimentally measured phase values for steel, copper, lead and titanium.

Параметр	Сталь 10	Мідь електротехнічна	Свинець	Титан
Мінімальне значення фази	0°	0°	0°	0°
Максимальне значення фази	72°	-120°	-170°	37°

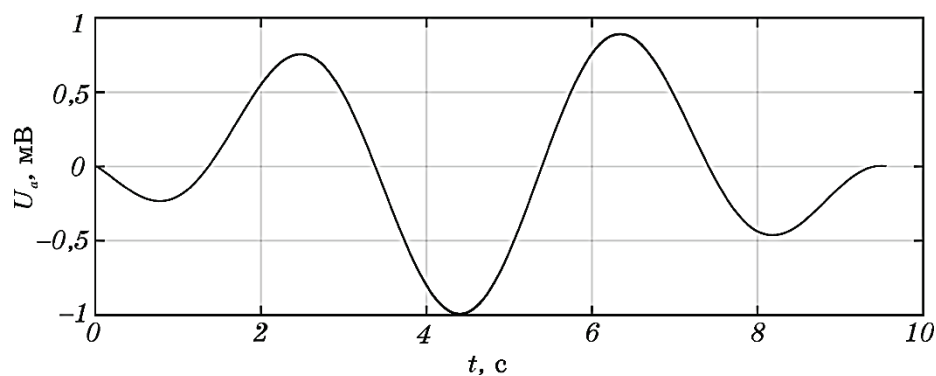


Рис. 5. Сигнал на виході фазового детектора для об'єкта контролю із міді.

Fig. 5. The signal at the output of the phase detector for object of control for copper.

рший максимум позитивної полярності та також різне співвідношення між екстремумами.

На рисунках 7 та 8 наведено осцилограми сигналів на виході фазового детектора для ОК, одержані за допомогою осцилографа SEA C8-62.

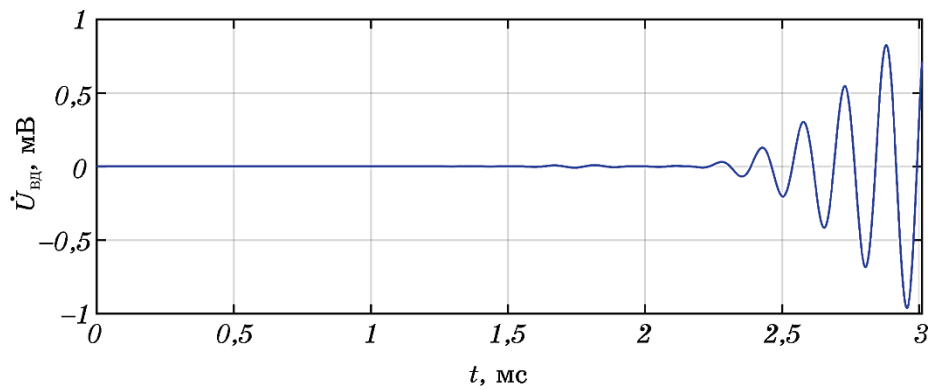


Рис. 6. Сигнал на виході фазового детектора для об'єкта контролю зі сталі.

Fig. 6. The signal at the output of the phase detector for object of control for steel.



Рис. 7. Осцилограми сигналів, одержаних від об'єкта контролю із міді.

Fig. 7. Oscillograms of signals received from object of control of copper.

Зразки мали однакові геометричні розміри та форму. Сканування проводили при лінійній швидкості руху ОК над антенами (2,2 м/с).

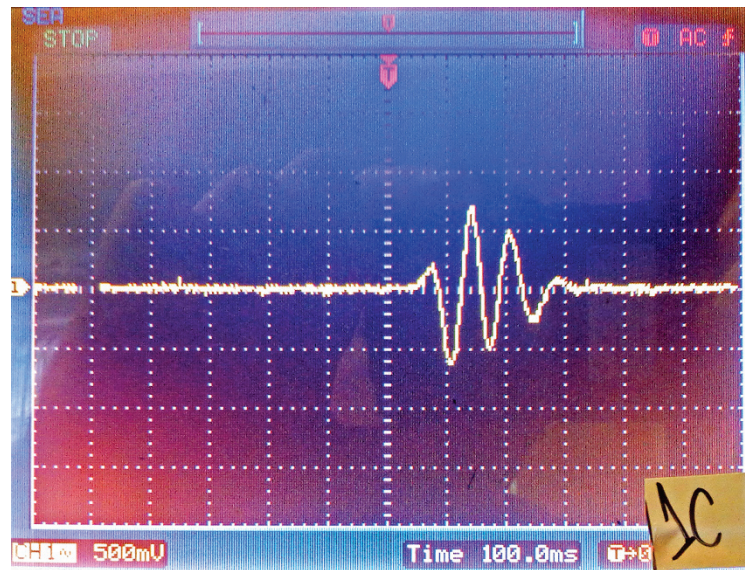


Рис. 8. Осцилограми сигналів, одержаних від об'єкта контролю зі сталі.

Fig. 8. Oscillograms of signals received from object of control of steel.

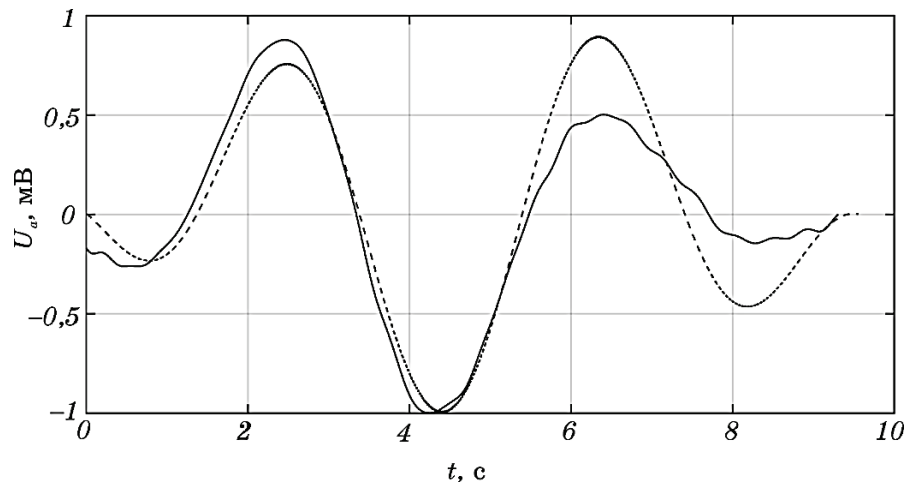


Рис. 9. Порівняння сигналів, розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для об'єкта контролю із міді.

Fig. 9. Comparison of the calculated signals (dashed lines) and experimental (solid line) for the object of control of copper.

На осцилограмах по осям абсцис відкладено часові відліки з кроком 100 мс/клітинка, а по осям ординат — напруга з кроком 500 мВ/клітинка.

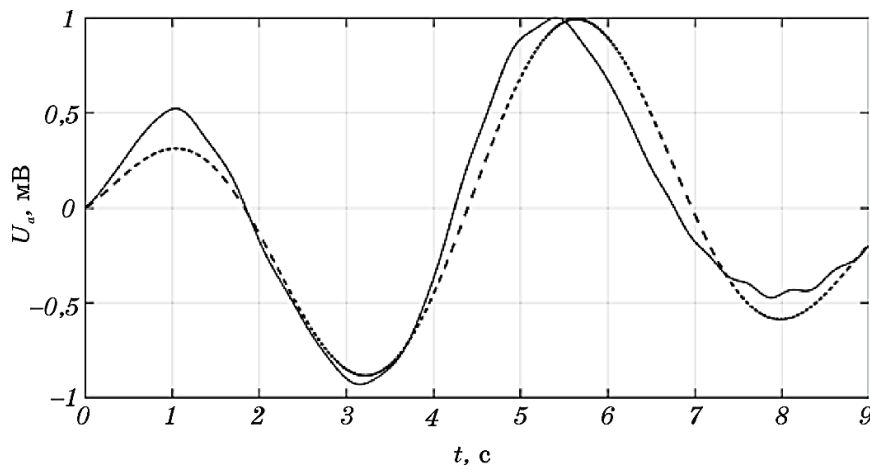


Рис. 10. Порівняння сигналів, розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для об'єкта контролю із титану.

Fig. 10. Comparison of the calculated signals (dashed lines) and experimental (solid line) for the object of control of titan.

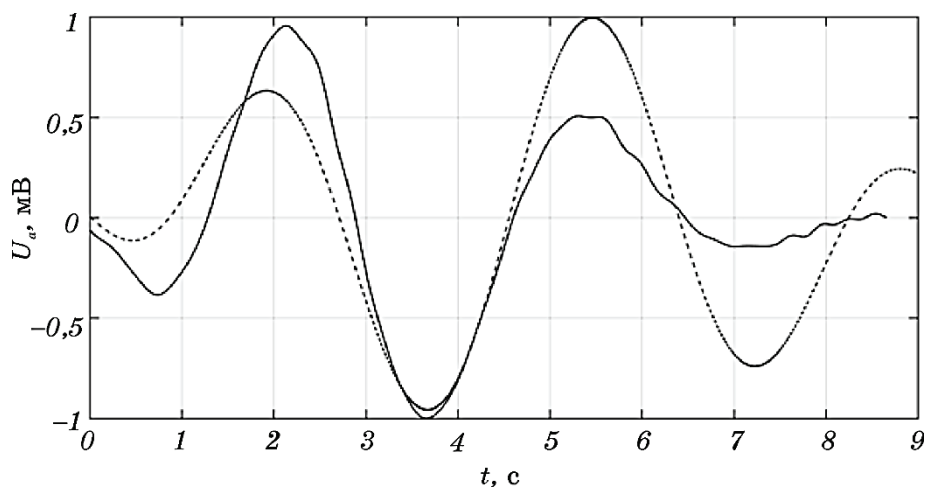


Рис. 11. Порівняння сигналів, розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для об'єкта контролю із міді.

Fig. 11. Comparison of the calculated signals (dashed lines) and experimental (solid line) for the object of control of copper.

Візуальний аналіз осцилограм показав, що для міді перший екстремум негативний, а для сталі — позитивний. Також видно, що сигнали мають різне співвідношення між екстремумами, яке буде в подальшому використане для комп'ютерної обробки сигналів.

На рисунках 9–14 представлено розраховані за запропонованою моделлю (штрихова лінія) та експериментальні (суцільна лінія) значення сигналів від ОК, виготовлених з різних металів.

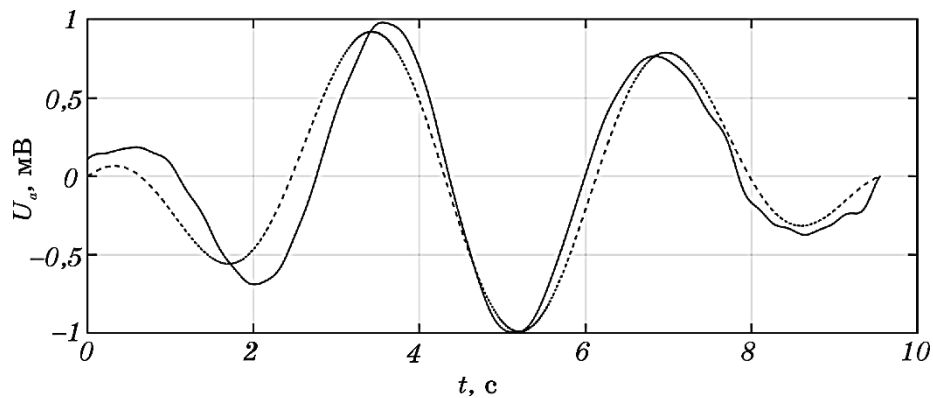


Рис. 12. Порівняння сигналів, розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для об'єкта контролю із титану.

Fig. 12. Comparison of the calculated signals (dashed lines) and experimental (solid line) for the object of control of titan.

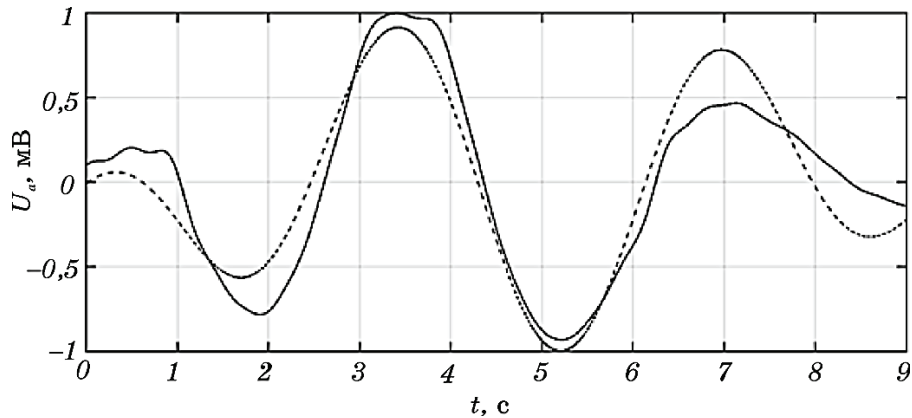


Рис. 13. Порівняння сигналів, розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для об'єкта контролю із нікелю.

Fig. 13. Comparison of the calculated signals (dashed lines) and experimental (solid line) for the object of control of nickel.

Сигнали, одержані експериментальним шляхом для різних ОК, оброблювали методом графічно-цифрових образів [2].

Результати порівняння між експериментально одержаними та розрахованими за моделлю [2] сигналами зведено до табл. 2. Критерієм ідентифікації є коефіцієнт $K\%$ [2] (співвідношення між двома максимумами графічно-цифрового образу ОК). Значення $K\%$ усе-реднювали за 100-ма вимірюваннями. У таблиці 2 перше число для експериментальних значень — математичне очікування, друге — середньоквадратичне відхилення (СКВ), «-» чи «+» — полярність першого екстремуму. Для змодельованих даних число показує розраховане значення, а знак «-» полярність першого екстремуму. Рі-

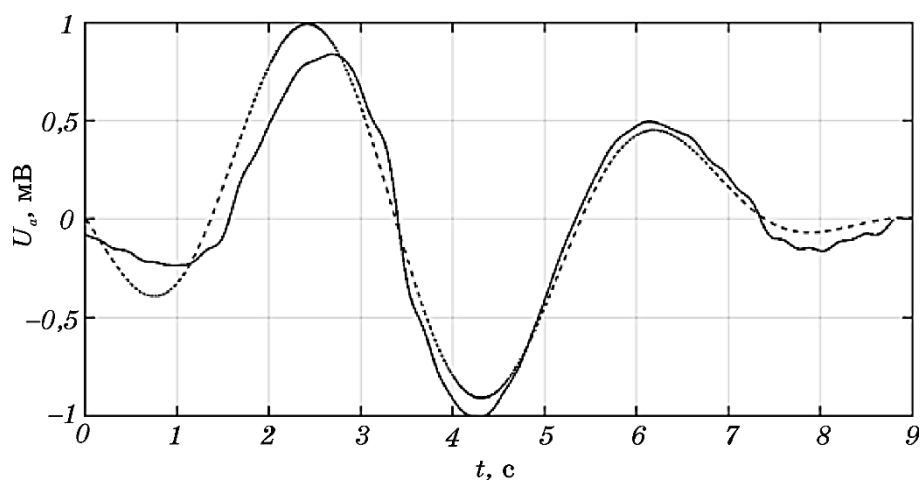


Рис. 14. Порівняння сигналів розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для об'єкта контролю зі срібла.

Fig. 14. Comparison of the calculated signals (dashed lines) and experimental (solid line) for the object of control of silver.

ТАБЛИЦЯ 2. Ідентифікація металів на основі експериментальних та змодельованих результатів.

TABLE 2. Identification of metals based on experimental and simulated results.

Метал	$K\%$, експериментальне	$K\%$, змодельоване
Мідь електротехнічна	$43,99 \pm 0,35$ «-»	45 «-»
Сталь 20	$13,88 \pm 0,95$ «+»	13 «+»
Свинець	$47,06 \pm 0,43$ «-»	41 «-»
Титан	$51,10 \pm 0,67$ «+»	55 «+»

ТАБЛИЦЯ 3. Експериментально одержане $K\%$ для різних металів.**TABLE 3.** Experimentally measured $K\%$ for different metals.

Метал	$K\%$	Полярність першого екстремуму
Срібло 999 проба	$41,79 \pm 0,44$	«-»
Срібло 900 проба, рубль 1896 р.	$44,66 \pm 0,37$	«-»
Срібло 900 проба, 50 коп. 1912 р.	$44,81 \pm 0,43$	«-»
Золото 900 проба	$43,22 \pm 0,32$	«-»
Вісмут	$46,26 \pm 0,28$	«+»
Нікель	$37,89 \pm 0,39$	«+»

зниця між змодельованими та експериментально одержаними результатами складає не більше 10%.

Збіг експериментальних та розрахованих сигналів у першому наближенні є достатнім, оскільки значення $K\%$ для конкретного металу близькі між собою. Також збігається кількість максимумів/мінімумів та їх полярність у сигналах. Експериментально одержані значення $K\%$ для деяких інших металів наведено у табл. 3.

Результати вимірювань параметрів $K\%$ та полярності першого екстремуму заносять у базу даних і порівнюють з одержаними раніше від відомих металевих ОК (база «узагальнених образів» металів). Подібність сигналу до існуючого в базі даних визначає тип металу. Оцінку проводять за відсотковим збігом основних інформативних параметрів між собою [2].

4. ВИСНОВКИ

Таким чином, показано що аналіз сигналів радіотехнічної системи, побудованої на основі вихорострумowego методу, дозволяє як теоретично (за значеннями параметрів вихорострумowego контролю), так і експериментально (за формою сигналу) ідентифікувати метали, що мають різні електричні та магнетні властивості. Запропонований амплітудно-фазовий метод ідентифікації металів дозволяє представляти сигнали від провідних об'єктів як «узагальнений образ». Ідентифікація невідомого металу відбувається шляхом відсоткового порівняння характеристик металу із характеристиками записаних образів. Подальші дослідження у цьому напрямку будуть напрямлені на створення бази «узагальнених образів» металевих виробів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Промышленная группа Лаборант. Анализаторы металлов и руд*, <http://www.laborant.net/catalog>.

2. А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський, *Металофіз. новітні технол.*, **39**, № 8 : 1035 (2017).
3. C. Bruschini, *A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining* (Thesis of Disser. for Dr. Appl. Sci.) (Brussels: 2002).
4. А. Ю. Гринев, *Вопросы подповерхностной радиолокации* (Москва: Радиотехника: 2005).
5. В. В. Сухоруков, *Неразрушающий контроль. Книга 3. Электромагнитный контроль* (Москва: Высшая школа: 1992).
6. *Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения* (ГОСТ 24289-80).
7. В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет, *Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов)* (Новосибирск: Наука: 1967).
8. А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **89**, № 5: 51 (2017).
9. А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. Ю. Фурманчук, *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія Технічні науки*, № 1 : 48 (2017).
10. А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський, *Науковий вісник Запорізького національного технічного університету. Радіоелектроніка, інформатика, управління*, №4: 7 (2017)
11. У. Титце, К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство* (Москва: Мир: 1982).
12. Э. Айфичер, Б. Джервис, *Цифровая обработка сигналов. Практический подход* (Москва: Вильямс : 2004).

REFERENCES

1. *Promyshlennaya Gruppy Laborant. Analizatory Metallov i Rud*, <http://www.laborant.net/catalog> (in Russian).
2. A. O. Abramovych, V. O. Poddubny, and I. S. Kashirsky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 8: 1035 (2017) (in Ukrainian).
3. C. Bruschini, *A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining* (Thesis of Disser. for Dr. Appl. Sci.) (Brussels: 2002).
4. A. Yu. Hrynev, *Voprosy Podpoverkhnostnoy Radiolokatsii* (Moscow: Radiotekhnika: 2005) (in Russian).
5. V. V. Sukhorukov, *Nerazrushayushchiy Kontrol. Kniga 3. Elektromagnitnyy Kontrol* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1992) (in Russian).
6. *Kontrol Nerazrushayushchiy Vikhretokovyy. Terminy i Opredeleniya* (GOST 24289-80) (in Russian).
7. V. S. Sobolev and Yu. M. Shkarlet, *Nakladnye i Ekrannye Datchiki (Dlya Kontrolya Metodom Vikhrevykh Tokov)* (Novosibirsk: Nauka: 1967) (in Russian).
8. A. O. Abramovych and V. O. Poddubny, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **89**, No. 5: 51 (2017) (in Ukrainian).
9. A. O. Abramovych, O. D. Mrachkovs'kyi, and V. Yu. Furmanchuk, *Visnyk Zhytomyrskoho Derzhavnoho Tekhnolohichnoho Universytetu. Seriya*

- Tekhnichni Nauky*, No. 1: 48 (2017) (in Ukrainian).
10. A. O. Abramovich, V. O. Poddubny, and I. S. Kashirsky, *Naukovyy Visnyk Zaporizkoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu. Radioelektronika, Informatyka, Upravlinnya*, No. 4: 7 (2017) (in Russian).
 11. U. Tittse and K. Shenk, *Poluprovodnikovaya Skhemotekhnika: Spravochnoe Rukovodstvo* (Moscow: Mir: 1982) (in Russian).
 12. E. Ayficher and B. Dzhervis, *Tsifrovaya Obrabotka Signalov. Prakticheskiy Podkhod* (Moscow: Vilyams: 2004) (in Russian).