

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ДИАГНОСТИКИ

PACS numbers: 07.05.Kf, 42.25.Gy, 42.30.Va, 81.70.Eh, 81.70.Jb, 84.40.Xb

### Дистанційна вихорострумова аналіза складу металевих об'єктів

А. О. Абрамович, І. С. Каширський, В. О. Піддубний

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

Для дистанційного визначення складу металевих об'єктів використовується вихорострумова метода зондування, яка ґрунтується на взаємодії електромагнетного випромінення з металевими об'єктами, що містяться в діелектричному середовищі та за своїми електричними чи то магнетними властивостями відрізняються від властивостей цього середовища. Традиційні вихорострумові методи уможливають, як правило, знайти металевий об'єкт і провести його дихотомічну (чорний/кольоровий метал) ідентифікацію, але не уможливають розрізнити тип металу в підгрупах кольорових або чорних металів. Тип металу можна визначити лише в лабораторних умовах на спеціальних металоаналізаторах. В даній роботі пропонується використовувати спеціально розроблений цифровий пристрій локації близьких об'єктів (аналізатор металу), побудований на вихорострумовій методі виявлення металевих об'єктів, разом з оригінальною методикою оброблення відбитого від об'єкту сигналу. Оброблення сигналу може проводитися двома способами — амплітудним і методом графічних образів, які засновані на порівнянні сигналу, одержаного від об'єкту, що досліджується, з еталонними. Запропонована метода уможливає дистанційно визначити тип металу в підгрупах кольорових або

---

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

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

Please cite this article as: A. O. Abramovych, I. S. Kashirsky, and V. O. Piddubniy, The Remote Eddy-Current Analysis of a Composition of Metal Objects, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 8: 1035–1049 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.08.1035.

чорних металів.

**Ключові слова:** електромагнетні властивості металів, вихорострумний перетворювач, пристрої локації, дистанційна хемічна аналіза.

For the remote determination of a metal-object composition, the eddy-current method of sensing is used. It is based on the interaction of electromagnetic radiation with metal objects contained in a dielectric medium where their electrical or magnetic properties differ from the properties of this medium. Traditional eddy-current methods usually allow the identification of a metal object and its dichotomous (black/non-ferrous) metal, but do not allow distinguishing the type of metal in the subgroups of ferrous and non-ferrous metals. The type of metal can be determined only in laboratory conditions on special metal detectors. In this paper, it is suggested to use a specially designed digital device for objects' near-locating (metal analyser), built on the eddy-current method of detecting the metal objects, coupled with the original method of processing the signal reflected from object. Processing of the signal can be done in two ways—amplitude one and graphic-images' method, which are based on comparison of the signal obtained from the investigated object with etalon ones. The proposed method allows determining remotely the type of metal in the subgroups of ferrous and non-ferrous metals.

**Key words:** electromagnetic properties of metals, eddy-current converter, location devices, remote chemical analysis.

Для дистанционного определения состава металлического объекта используется вихретоковый метод зондирования, основанный на взаимодействии электромагнитного излучения с металлическими объектами, которые находятся в диэлектрической среде и по своим электрическим или магнитным свойствам отличаются от свойств этой среды. Традиционные вихретоковые методы позволяют, как правило, найти металлический объект и провести дихотомическую (чёрный/цветной металл) идентификацию, но не позволяют различить тип металла в подгруппах цветных и чёрных металлов. Тип металла можно определить только в лабораторных условиях на специальных металлоанализаторах. В данной работе предлагается использовать специально разработанное цифровое устройство ближней локации (анализатор металла), построенное на вихретоковом методе обнаружения металлических объектов, вместе с оригинальной методикой обработки отражённого от объекта сигнала. Обработка сигнала может проводиться двумя способами — амплитудным и методом графических образов, основанными на сравнении сигнала, полученного от исследуемого объекта, с эталонными. Предложенный метод позволяет дистанционно определить тип металла в подгруппах цветных и чёрных металлов.

**Ключевые слова:** электромагнитные свойства металлов, вихретоковый преобразователь, устройства локации, дистанционный химический анализ.

*(Отримано 7 червня 2017 р.)*

## 1. ВСТУП

Задача дистанційного визначення хемічного складу металевих об'єктів завжди цікавила науковців і практиків. Для вирішення задачі ідентифікації складу металевих об'єктів найчастіше використовується хемічна метода аналізу, яка є найбільш інформативною і точною, але для її використання необхідно мати металевий зразок для проведення лабораторних досліджень, хемічні реактиви та відповідне обладнання [1]. Таким способом неможливо дистанційно визначити метал, з якого виготовлений об'єкт.

Останнім часом хемічна метода замінюється іншими методами, такими як рентгенофлуоресцентна, атомно-абсорбційна та ін. Однак вони також потребують контакту з досліджуваним об'єктом і унеможливають проводити аналіз його складу без лабораторних досліджень.

Проте є метода, що побудована на взаємодії електромагнетного випромінення антени з металевим об'єктом (вихорострумова), яка уможливає дистанційно визначити метал, з якого виготовлений об'єкт.

В основі методи лежить явище збудження на поверхні досліджуваного металу вихрових струмів, які наводяться в металевих об'єктах електромагнетним полем випромінювальної котушки передавальної антени [2, 3]. Ці струми створюють вторинне електромагнетне поле, яке реєструється приймальною антенною, обробляється електронним блоком і передається на індикаторний пристрій [4]. Корисна інформація про досліджуваний об'єкт міститься в амплітуді, фазі та частоті сигналу, прийнятого антенною. Задачею аналізу є виділення з цього сигналу найбільш інформативної частини. В більшості таких приладів ідентифікація досліджуваного об'єкту здійснюється амплітудним методом (за пороговим рівнем прийнятого сигналу [5]), що визначає чутливість пристрою. Зазвичай пристрої, побудовані на вихорострумовій методі, уможливають проводити дихотомічну класифікацію металів (чорний/кольоровий).

В даній роботі пропонується нова метода оброблення відбитого від металу інформативного сигналу, одержаного при взаємодії випромінюваного електромагнетного сигналу низької частоти з металевими об'єктами, що уможливає провести аналіз складу досліджуваного матеріялу та визначити конкретний метал у підгрупах чорних або кольорових металів.

Запропоновану методу побудовано на перетворенні часового сигналу в цифрові коди та графічні образи, що уможливає їхнє легке порівняння та створення бази еталонних сигналів від різних металів, що радикально змінює підхід до ідентифікації матеріялу об'єктів, у тому числі прихованих у різних діелектричних середовищах.

## 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Принципи роботи традиційних вихорострумів пристроїв (ВСП) ближньої локації детально викладено в роботах [6–9]. На відміну від традиційних вихорострумів метод з дихотомічною класифікацією металів (чорний/кольоровий), нами пропонується метода оброблення сигналу та структурна схема ВСП, які уможливають дистанційно аналізувати склад металевому об'єкту з визначенням типу металу в підгрупах кольорових або чорних металів.

Структурну схему запропонованого ВСП зображено на рис. 1. Він складається з антенної системи (передавальна (1) та приймальна (4) антени), імпульсного генератора низькочастотного сигналу (2), який генерує імпульси, що з частотою 6,6 кГц поступають на передавальну антену (шпаруватість імпульсів — 10), блоку підсилення та обробки сигналу (5), генератора тактових імпульсів (7), мікроконтролерного блоку оброблення (3) та індикаторного пристрою (6) [10].

Генератор низькочастотного сигналу (2) формує імпульси потужністю у 1 Вт, що поступають на передавальну антену (1), яка випромінює електромагнетне поле в досліджуване середовище. За рахунок електромагнетної індукції в металевому об'єкті виникають струми Фуко, що спотворюють первинне електромагнетне поле.

Зміни в полі реєструються приймальною антеною (4), підсилюються та проходять первинне оброблення в блоці (5). Для синхронізації роботи вузлів ВСП використовується генератор тактових імпульсів (7). Після оброблення сигнал поступає до мікроконтролерного блоку (3), на якому одержані від об'єктів, що ідентифікуються, сигнали нормуються за амплітудою та тривалістю і подаються на персональний комп'ютер (ПК) (6). Інформація про тип металу, з якого виготовлено об'єкт, міститься в формі сигналу, що подається на ПК, де він за спеціально розробленою програмою перетворюється в цифрові коди та графічні образи, які порівнюються з раніше сформованими еталонними сигналами від металів, інформація про котрі зберігається в запам'ятовувальному пристрої ПК.

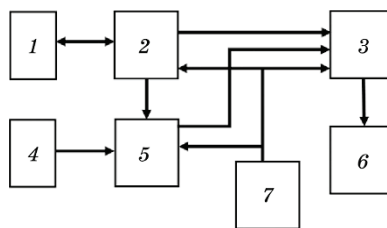


Рис. 1. Структурна схема вихорострумів пристрою.

Fig. 1. Structural scheme of eddy-current device.

Відбитий від об'єкту, у тому числі прихованого, та нормований в мікроконтролерному блоці сигнал фіксується ПК в дискретні моменти часу. Однак оброблення та дослідження дискретних значень часового сигналу є незручними, тому необхідним є його перетворення в більш зручну форму, яку можна одержати за допомогою математичних методів апроксимації.

Складність часових сигналів, що розглядаються, не уможливорює використовувати для їхньої повної апроксимації одну групу функцій і потребує апроксимації окремих частин сигналу (кускової апроксимації). Використання стандартних методів кусково-лінійної, кусково-квадратичної, кусково-кубічної апроксимації не є доцільним через великі масиви оброблюваної інформації. Тому було обрано кусково-поліноміальну апроксимацію [11].

Степінь полінома апроксимації  $n$  та кількість ділянок апроксимації  $N$  змінюються, залежно від складності сигналів і точності апроксимації. На кожній  $i$ -й ділянці задаємо  $m$  дискретних точок  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}$ , одержаних в експерименті, і записуємо поліном апроксимації  $i$ -ї ділянки

$$P(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n-1}x^n. \quad (1)$$

Розрахунки полінома (1) у  $m$  дискретних точках  $i$ -ї ділянки представимо за допомогою прямокутньої матриці

$$A = \begin{pmatrix} 1 & x_{i,1} & x_{i,1}^2 & \dots & x_{i,1}^n \\ 1 & x_{i,2} & x_{i,2}^2 & \dots & x_{i,2}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{i,m} & x_{i,m}^2 & \dots & x_{i,m}^n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В роботі розглядається обчислювальна задача кусково-поліноміальної апроксимації заданого сигналу при мінімальній кількості ділянок апроксимації або максимальному значенні  $m$  на кожній ділянці. Найбільш простою є реалізація для випадку  $n = m - 1$ , при якій для розрахунку коефіцієнтів полінома (1) розв'язується система лінійних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} 1 & x_{i,1} & x_{i,1}^2 & \dots & x_{i,1}^{m-1} \\ 1 & x_{i,2} & x_{i,2}^2 & \dots & x_{i,2}^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{i,m} & x_{i,m}^2 & \dots & x_{i,m}^{m-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(x_{i,1}) \\ P(x_{i,2}) \\ \vdots \\ P(x_{i,m}) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Однак для великої кількості дискретних точок ( $m \geq 25$ ) система лінійних рівнянь (3) є погано обумовленою (некоректною) і не може

бути розв'язана стандартними методами [12, 13]. Застосування спеціальних методів розв'язання подібних систем у зв'язку зі складністю їхньої апаратно-програмної реалізації визнано недоцільним.

В роботі застосовано інший спосіб вирішення поставленої задачі, який полягає в зменшенні степеня апроксимувального полінома, внаслідок чого система лінійних рівнянь виявляється несумісною і в матриці (2) кількість рядків значно перевищує кількість стовпців ( $m > n$ ). Введемо вектор  $F_0$  чисельних значень полінома (1) в дискретних точках і вектор  $Z$  невідомих коефіцієнтів полінома (1) для  $i$ -ї ділянки:

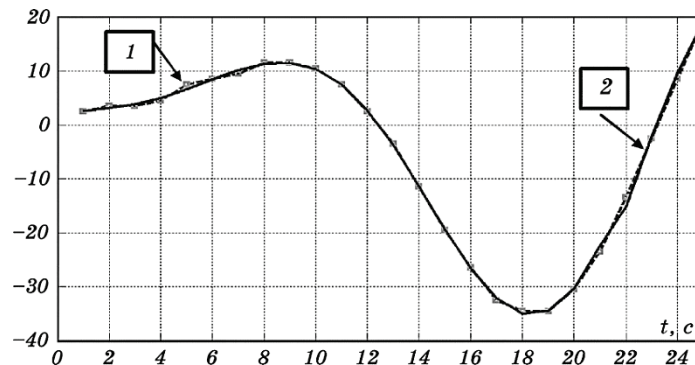
$$F_0 = \begin{pmatrix} P(x_{i,1}) \\ P(x_{i,2}) \\ \vdots \\ P(x_{i,m}) \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Тоді з виразів (1) і (2) маємо систему лінійних рівнянь у матричній формі:

$$AZ = F_0. \quad (5)$$

Система рівнянь (5) теж є несумісною; тому для її розв'язання застосовуємо алгоритм псевдорозв'язку для несумісних систем [10]:

$$A^T AZ = A^T F_0, \quad (6)$$



**Рис. 2.** Результати апроксимації сигналу (відн. од.): 1 — апроксимувальна крива (пунктирна лінія), 2 — експериментальні дискретні значення часового сигналу (суцільна лінія).

**Fig. 2.** Results of signal approximation (relative units): 1—approximating curve (dotted line), 2—experimental discrete value of the temporal signal (dotted line).

де  $\mathbf{A}^T$  — транспонована матриця (2). Матричне рівняння (6) має розв'язок

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}_0. \quad (7)$$

На рисунку 2 (крива 1) представлено результати розв'язання задачі апроксимації сигналу на першій ділянці для  $m = 25$ ,  $n = 6$ , які показують гарний збіг заданих і обчислених дискретних значень сигналу. Задані дискретні значення часового сигналу, яких було знято експериментально, з'єднані між собою суцільною кривою 2, а апроксимовані — пунктирною кривою 1.

Після розрахунку на всіх  $N$  ділянках ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) одержуємо вектори розв'язків:

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \vdots \\ a_{n_1-1}^1 \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ \vdots \\ a_{n_2-1}^2 \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{Z}_N = \begin{bmatrix} a_1^N \\ a_2^N \\ \vdots \\ a_{n_2-1}^N \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Розрахунок за всіма векторами  $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_N$  забезпечує збіг повної апроксимувальної кривої з заданою кривою часового сигналу.

На рисунку 3 показано апроксимовані часові сигнали від двох різних металевих об'єктів з міді та сталі однакових розмірів і однакової геометричної форми.

Як видно з рисунку 3, часові сигнали, відбиті від металів, мають вигляд осцилюючих кривих з різною періодичністю та з різною кіль-

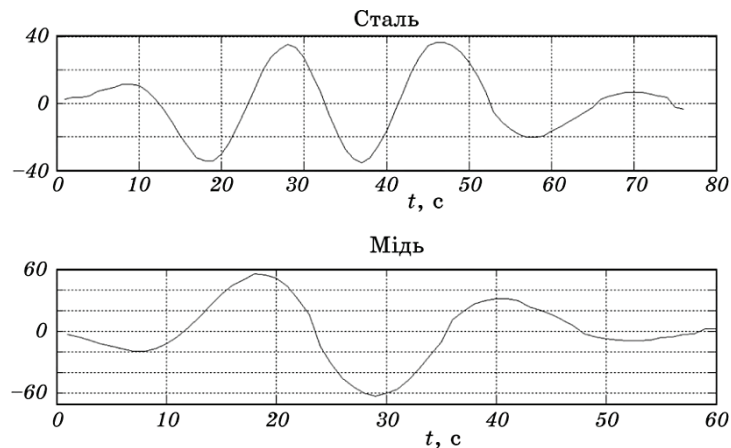


Рис. 3. Апроксимовані часові сигнали (у відн. од.) для сталі та міді.

Fig. 3. Approximated temporal signals (in relative units) for steel and copper.

кістю максимумів і мінімумів, які й можуть бути критеріями для їх порівняння. Нами пропонується дві методи порівняння: амплітудна та метода графічних образів.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1. Амплітудний метод дослідження

В цій методі для часового сигналу, одержаного від різних об'єктів, фіксуються найбільші значення амплітуди відбитих сигналів. Зважаючи на те, що матеріали, з яких виготовлено об'єкти, мають різну питому вагу, при дослідженні використовувалися амплітуди, приведені до маси об'єкту (відносні амплітуди). Результати вимірювання приведених амплітуд для різних металів [14] наведено в табл. 1.

На основі таблиці 1 проведено порівняння відносної амплітуди з властивостями металів за таблицею Менделєєва, а саме, електронегативністю за Л. Полінгом, яка відображає властивості атомів, зв'язаних між собою хемічними зв'язками. Як показала аналіза, властивості металів, оцінені за відбитими сигналами, не відповідають класичній таблиці Менделєєва, але добре співпадають з новою таблицею, яку введено у використання міжнародною комісією в 1989 році [15].

Так, для ряду металів, — титан, залізо, мідь, алюміній, — амплітуда сигналів зростає з номером групи у новій таблиці Менделєєва.

**ТАБЛИЦЯ 1.** Відносні амплітуди сигналів, одержаних від різних металів [14].

**TABLE 1.** Relative amplitudes of signals obtained for different metals [14].

Метал	Відносна амплітуда	Електронегативність за Полінгом	Відстань від об'єкту до антени, мм
Залізо	2,318	1,83	70
Мідь електротехн.	7,41	1,90	70
Срібло 868 проби	3,05	1,93	70
Алюміній	39,74	1,61	70
Титан	1,761	1,54	40
Вісмут	0,198	1,9	40
Свинець	2,523	1,8	40
Сурма	0	2,05	40
Нікель	10,49	1,91	40



Для металів однієї групи — мідь, срібло, золото — амплітуда зменшується у вертикальному напрямі зверху вниз. Метали — алюміній, свинець, вісмут, належать до одного сімейства постперехідних металів, але вони стоять в різних рядках таблиці тому їх амплітуди істотно відрізняються. Вісмут випадає з наведених у табл. 1 закономірностей — він стоїть в одному горизонтальному рядку праворуч свинцю, але всупереч його положенню в таблиці Менделєєва амплітуда відбитого від нього сигналу є на порядок меншою порівняно із амплітудою сигналу, одержаного від зразка виготовленого із свинцю. Для сурми відсутність відбитого сигналу можна пояснити приналежністю її до іншого сімейства таблиці Менделєєва — металоїдів.

Як видно, питома амплітуда зростає зліва направо по групах таблиці Менделєєва, це ж відбувається і з параметром електронегативності, що характеризує внутрішній стан речовини (відносне зміщення ковалентного зв'язку в бік іонного). В межах однієї групи параметри електронегативності та відносна амплітуда зменшуються зверху вниз, що видно із результатів вимірювання цих параметрів для міді та срібла. Це співпадає зі зміною значень електронегативності для цих перехідних металів. Алюміній, як постперехідний метал, має значно більше значення електронегативності та, відповідно, питомої амплітуди.

Вплив товщини  $d$  металевого зразка на амплітуду відбитого сигналу вивчався на зразках мідних пластин з розмірами, наведеними в табл. 2.

Як видно, амплітуди сигналу, відбитого від досліджуваних зразків, що мають однакову площу, але різні товщини (пластини виготовлені з електротехнічної міді товщиною 2 мм та 1 мм та з електротехнічної мідної фольги товщиною 40 мкм) зменшуються зі зменшенням товщини зразка, а від зразка, виготовленого з фольги, сигнал взагалі зникає. Це в першу чергу можна пояснити глибиною проникнення електромагнетної хвилі в товщу металу  $\delta \sim (\mu\sigma\omega)^{-1/2}$ , яка залежить від відносної магнетної проникності  $\mu$ , електропровідності  $\sigma$  та робочої частоти  $\omega$ . Для міді це значення на робочій час-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Геометричні розміри пластин з електротехнічної міді.

**TABLE 2.** Geometric sizes of electrotechnical copper plates.

Метал (мідь)	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина	Амплітуда сигналу, відн. од.
Пластина 1	60	20	2 мм	70
Пластина 2	60	20	1 мм	25
Пластина 3	60	20	40 мкм	0

тоті ВСП (6,6 кГц) складає 0,83 мм, тому для тонкої пластини ( $d = 40$  мкм) сигнал практично відсутній. Густина струму, що наводиться електромагнетним полем в металевому зразку, змінюється за експоненційним законом  $j(y) = j_0 \exp(-y/\delta)$ , де  $y$  — координата перпендикулярна до поверхні зразка. Тому глибина проникнення є значенням координати  $y$ , при якій густина струму спадає в  $e$  раз. Тобто у зразках з  $d \geq \delta$  не весь наведений струм, який формує відбитий сигнал, протікає в межах приповерхневого шару товщиною  $\delta$ , і, відповідно, зі збільшенням товщини зразка збільшується і значення відбитого сигналу.

Аналізуючи наведені вище дані, можна зробити висновок, що електромагнетний сигнал, випромінюваний антеною ВСП, відбивається не від поверхні металу, а проникає в середину металевого об'єкту і взаємодіє практично з усім об'ємом зразка.

### 3.2. Метод графічних образів

Суть методу графічних образів полягає в тому, що для апроксимованого сигналу визначаються екстремальні значення сигналу та точки переходу його через нуль, які потім перетворюються в характерні лінії, що відрізняються одна від одної координатами, висотою та полярністю.

Для цього апроксимовані часові сигнали нормуються за амплітудою так, щоб значення найбільшого екстремуму сигналу дорівнювало одиниці, а потім аналізуються апроксимувальні поліноми  $N$  ділянок

$$\begin{aligned} P_1(x) &= a_1^1 + a_2^1 x^1 + a_3^1 x^2 + \dots + a_{n_1-1}^1 x^{n_1}, \\ P_2(x) &= a_1^2 + a_2^2 x^1 + a_3^2 x^2 + \dots + a_{n_2-1}^2 x^{n_2}, \\ &\vdots \\ P_N(x) &= a_1^N + a_2^N x^1 + a_3^N x^2 + \dots + a_{n_N-1}^N x^{n_N}. \end{aligned} \quad (9)$$

Кожен поліном перетинає вісь абсцис у декількох точках (має корені, нулі) і має декілька екстремумів (мінімумів, максимумів). Для пошуку коренів поліномів (9) існують стандартні програми, наприклад, програми пакету Matlab [16]. Однак їх аналіза показала, що поліноми на окремих ділянках виявляються занадто складними для таких програм.

Тому для визначення координат екстремумів окремих ділянок нами розглядаються похідні від поліномів (9)

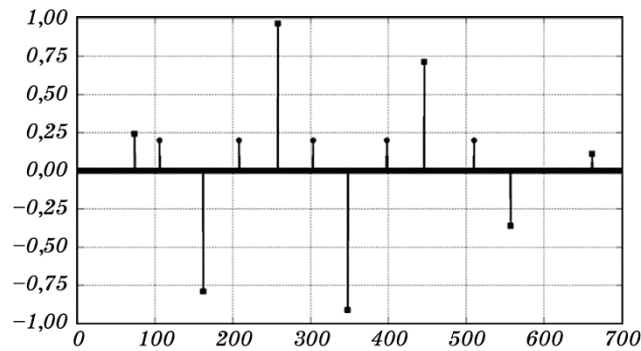
$$\frac{dP_1(x)}{dx} = a_2^1 + 2a_3^1 x + \dots + n_1 a_{n_1-1}^1 x^{n_1-1}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_2(x)}{dx} &= a_2^2 + 2a_3^2x + \dots + n_2a_{n_2-1}^2x^{n_2-1}, \\ &\vdots \\ \frac{dP_N(x)}{dx} &= a_2^N + 2a_3^Nx + \dots + n_Na_{n_N-1}^Nx^{n_N-1}. \end{aligned}$$

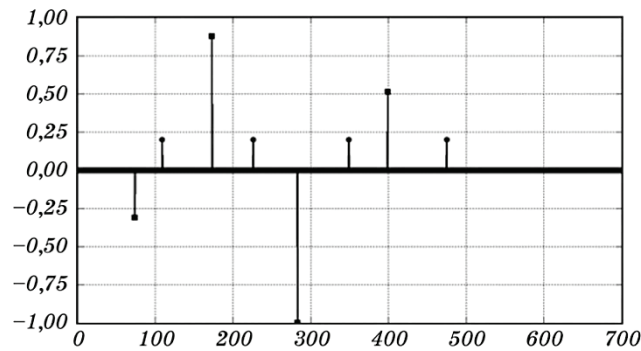
Для кожної ділянки знову розв'язується задача визначення коренів багаточленів

$$\frac{dP_1(x)}{dx} = 0, \frac{dP_2(x)}{dx} = 0, \dots, \frac{dP_N(x)}{dx} = 0. \quad (11)$$

Корені рівнянь (11) визначають розташування екстремумів на певній ділянці, а амплітуда нормованого часового сигналу (9) у віднайдених точках екстремумів — їх висоту.



*a*



*б*

**Рис. 4.** Графічні образи сигналів, одержаних від сталі (*a*) та міді (*б*).

**Fig. 4.** Graphic images of signals obtained from steel (*a*) and copper (*б*).

Часовий сигнал, одержаний системою локації ВСП, перетворюється програмою в графічний образ, в якому неперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями, що відповідають екстремумам сигналу. Графічні образи мають більшу інформаційну насиченість.

**ТАБЛИЦЯ 3.** Коефіцієнти графічних образів для різних металів.

**TABLE 3.** The coefficients of graphic images for different metals.

№ екстремуму Назва зразка	1	2	3	4	5	6	7
Сталь, знач. в екстр.	0,3055	-0,9471	0,9461	-0,9007	0,9826	-0,5326	0,1844
Координати екстремумів	8	18	28	36	46	57	69
Координати нулів	12	23	32	41	52	65	
Мідь, знач. в екстр.	-0,2551	0,8720	-0,9963	0,4949	-0,1403		
Координати екстремумів	7	18	29	41	52		
Координати нулів	11	23	36	49	56		
Срібло 868 проба, знач. е.	-0,2462	0,8406	-0,9917	0,5086	-0,1494		
Координати екстремумів	7	17	28	40	50		
Координати нулів	10	22	35	47	57		
Титан, знач. в екстр.	0,5026	-0,9139	1,0000	-0,5525			
Координати екстремумів	5	14	26	35			
Координати нулів	8	20	31	41			
Золото 900 проба, знач. е.	-0,2354	0,8405	-0,9624	0,5098	-0,1512	0,0540	0,0350
Координати екстремумів	9	20	30	42	54	63	65
Координати нулів	13	25	37	50	61		
Свинець, знач. в екстр.	-0,3122	0,9769	-0,9954	0,4797	-0,1736		
Координати екстремумів	6	15	25	36	47		
Координати нулів	1	9	20	31	43		
Вісмут, знач. в екстр.	0,2011	0,2887	-0,9310	1,0000	-0,4570	0,2582	
Координати екстремумів	3	7	16	25	36	45	
Координати нулів	10	20	32	42			
Алюміній, знач. в екстр.	-0,3073	0,8535	-1,0000	0,4309	-0,1411	0,0240	-0,042
Координати екстремумів	7	18	27	38	50	57	60
Координати нулів	11	22	34	46	56	58	
Нікель, знач. в екстр.	0,1878	-0,7182	1,0000	-0,8456	0,4705	-0,1459	0,0512
Координати екстремумів	6	13	22	30	40	52	62
Координати нулів	9	17	26	36	47	59	

ченість, ніж часовий сигнал, оскільки їхні характерні лінії чітко розрізняються за координатами, висотою та полярністю. Крім того, графічний образ доповнюється точками переходу сигналу через нульовий рівень. Графічні образи, що відповідають часовим сигналам на рис. 3, представлено на рис. 4.

Можна сказати, що часові сигнали на рисунку 3 є різними, проте їх відмінність складно зафіксувати візуально, тоді як відмінність їх графічних образів (рис. 4) є очевидною.

В таблиці 3 наведено характеристики графічних образів різних металів, що досліджувалися в даній роботі (база даних образів). Для кожного зразка в стовпцях 1, 2, ... наведено значення сигналу у відповідних точках екстремумів, координати послідовностей екстремумів, а також координати точок проходження сигналу через нульовий рівень. Як видно з таблиці 2, кожен метал має різне розташування екстремумів і нульових точок, тому за їх значеннями можна ідентифікувати тип металу, з якого виготовлено об'єкт. Для цього потрібно створити образ для об'єкту з невідомого металу, розрахувати його коефіцієнти, порівняти їх з тими, що вже є в базі даних, та знайти відповідний образ, тим самим визначивши тип металу.

#### 4. ВИСНОВКИ

Показана можливість застосування методу локації ближніх об'єктів для ідентифікації металу, з якого виготовлений металевий об'єкт, у тому числі прихований в діелектричному середовищі.

Запропонована метода (метода графічних образів) оброблення відбитих від металевих об'єктів інформативних сигналів, в основі котрої лежить взаємодія випромінюваного електромагнетного сигналу низької частоти з металом об'єкту, уможливорює дистанційно проводити аналізу складу металевого предмету та визначити конкретний метал в підгрупах чорних і кольорових металів, з якого складається досліджуваний об'єкт.

Експериментально підтверджено, що амплітуда відбитого від металевого об'єкту сигналу пов'язана з глибиною проникнення електромагнетної хвилі в глиб об'єкту і залежить від його геометричних розмірів та фізичних властивостей металу.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Промышленная группа «Лаборант». Анализаторы металлов и руд* (<http://www.laborant.net/catalog>).
2. Г. Н. Щербаков, *Радиотехника*, № 12: 42 (2005).
3. Г. Н. Щербаков, *Радиотехника*, № 3: 77 (2005).
4. M. H. Jol, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* (Oxford:

- Elsevier: 2009).
5. В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович, *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія Радіоелектроніка та телекомунікації*, № 818: 49 (2015).
  6. В. Б. Хабаров, *Радиотехника*, № 3: 80 (2005).
  7. Г. М. Махонин, *Радиотехника*, № 2: 90 (2006).
  8. А. О. Абрамович, *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 57: 77 (2014).
  9. А. М. О. Obiazi, F. I. Anyasi, O. Jacdonmi, P. A. Otubu, and I. Abhulimen, *J. Eng. Appl. Sci.*, 5, Iss. 2: 56 (2010).
  10. D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar* (London: Institution of Electrical Engineers: 2004).
  11. И. С. Березин, Н. П. Жидков, *Методы вычислений* (Москва: Наука: 1966).
  12. К. С. Кунц, *Численный анализ* (Киев: Техника: 1964).
  13. Ф. Р. Гантмахер, *Теория матриц* (Москва: Наука: 1967).
  14. D. R. Lide, *CRS Handbook of Chemistry and Physics* (Boca Raton, Florida: CRC Press: 2007).
  15. Р. С. Сайфуллин, А. Р. Сайфуллин, *Химия и жизнь*, № 12: 14 (2003).
  16. Э. Айфичер, Б. Джервис, *Цифровая обработка сигналов. Практический подход* (Москва: Вильямс: 2004) (пер. с англ.).

## REFERENCES

1. *Promyshlennaya Gruppy 'Laborant'. Analizatory Metallov i Rud* [Industrial Group 'Laborant'. Analyzers of Metals and Ores] (<http://www.laborant.net/catalog>) (in Russian).
2. G. N. Shcherbakov, *Radiotekhnika*, No. 12: 42 (2005) (in Russian).
3. G. N. Shcherbakov, *Radiotekhnika*, No. 3: 77 (2005) (in Russian).
4. M. H. Jol, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* (Oxford: Elsevier: 2009).
5. V. I. Pravda, O. D. Mrachkovskiy, and A. O. Abramovych, *Visnyk Natsionalnogo Universytetu 'Lvivska Politekhnikha'. Seriya Radioelektronika ta Telekomunikatsiyi*, No. 818: 49 (2015) (in Ukrainian).
6. V. B. Khabarov, *Radiotekhnika*, No. 3: 80 (2005) (in Russian).
7. G. M. Makhonin, *Radiotekhnika*, No. 2: 90 (2006) (in Russian).
8. A. O. Abramovych, *Visnyk Natsionalnokho Tekhnichnokho Universytetu Ukrainy 'Kyivskyy Politekhnichnyy Instytut'. Seriya Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannya*, No. 57: 77 (2014) (in Ukrainian).
9. A. M. O. Obiazi, F. I. Anyasi, O. Jacdonmi, P. A. Otubu, and I. Abhulimen, *J. Eng. Appl. Sci.*, 5, Iss. 2: 56 (2010).
10. D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar* (London: Institution of Electrical Engineers: 2004).
11. I. S. Berezin and N. P. Zhidkov, *Metody Vychisleniy* [Computational Methods] (Moscow: Nauka: 1966) (in Russian).
12. K. S. Kunts, *Chislennyy Analiz* [Numerical Analysis] (Kiev: Tekhnika: 1964) (in Russian).
13. F. R. Gantmakher, *Teoriya Matrits* [Matrix Theory] (Moscow: Nauka: 1967) (in Russian).

14. D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Boca Raton, Florida: CRC Press: 2007).
15. R. S. Sayfullin and A. R. Sayfullin, *Khimiya i Zhizn'*, No. 12: 14 (2003) (in Russian).
16. E. C. Ifeakor and B. W. Jervis, *Tsifrovaya Obrabotka Signalov. Prakticheskiy Podkhod* [Digital Signal Processing: A Practical Approach] (Moscow: Williams Publishing House: 2004) (Russian translation).