

# РАДИОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

## RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.39

#### УДОСКОНАЛЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО ІДЕНТИФІКАТОРА МЕТАЛІВ НА ОСНОВІ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПІДХОДУ

**Абрамович А. О.** – канд. техн. наук, завлаб кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** В статті розглянуто задачу удосконалення вихрострумовею пристрою ідентифікації металів на основі кореляційного підходу. Такий підхід є зручним для накопичення бази даних відомих провідних матеріалів, а також для порівняння сигналу від невідомого металевею предмета з наявними в базі еталонами. Запропонований підхід дозволяє визначити тип металу, з якого виконаний зразок, без пошкодження його поверхні.

**Метою** роботи є ідентифікація металів за типом по сигналам-відгукам від вихрострумовею перетворювача, завдяки виявленню нових інформативних ознак та створенню бази образів металів.

**Метод.** В роботі наведено результати експериментального дослідження запропонованого підходу підвищення достовірності ідентифікації металевих предметів, які виявляються за допомогою вихрострумовею пристрою. Дані дослідження проведені на основі радіотехнічної системи, яка працює на вихрострумовею принципі та має низькочастотні магнітні рамочні антени. Вихрострумовею метод дозволяє проводити ідентифікацію металів за типом дистанційно та без пошкодження їхньої поверхні, на відміну від рентгено-флуоресцентного, оптико-емісійного чи хімічного методів. Запропоновано кореляційний підхід для обробки спектру сигналу-відгуку від прихованого металевею предмета. Кореляційний підхід дозволяє підвищити достовірність ідентифікації металів за типом при обробці сигналу в спектральній області на основі перетворення Фур'є. Проведені дослідження на прикладі металів, які мають близькі спектральні характеристики (срібло, золото, свинець). Запропонований підхід дозволив збільшити відсоткову різницю між інформаційними параметрами сигналів – відгуків з 1,87% до 5,02% для срібла і золота, з 2,24% до 4,34% для срібла і свинцю та з 0,36% до 0,7% для золота і свинцю.

**Результати.** Розроблена радіотехнічна система є лабораторним макетом, який складається з аналогової частини та цифрової. Аналогова частина – це блок антен, підсилювач сигналу та смуговий фільтр, цифрова частина – мікроконтролер із АЦП для оцифрування та передачі даних на ноутбук, що програмно реалізує запропоновані підходи з обробки сигналу. В роботі експериментально підтверджена можливість використання радіотехнічної системи для вирішення задачі ідентифікації металу в рамках підмножини немагнітних і магнітних матеріалів.

**Висновки.** Розвиток сучасних вихрострумовею пристроїв відбувається у напрямку підвищення достовірності ідентифікації прихованих металевих об'єктів, що є актуальним при проведенні геофізичної розвідки, в археології, а також в силових структурах під час пошуків прихованих металів.

Розроблення та вдосконалення таких систем включає в себе як розробку апаратної частини так і виявлення нових інформаційних параметрів в сигналах-відгуках від металів. Одним з таких напрямків може бути кореляційний підхід до обробки сигналів в спектральній області.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** вихрострумовею пристрої, ідентифікація металів, кореляція, метод електромагнітної індукції.

#### АБРЕВІАТУРИ

РС – радіотехнічна система;  
ВСП – вихрострумовею пристрій;  
ОК – об'єкт контролю;  
ФД – фазовий детектор.

#### НОМЕНКЛАТУРА

$\sigma$  – провідність, см/м;  
 $\mu_r$  – відносна магнітна проникність;  
 $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність;  
 $\lambda$  – параметр інтегрального перетворення;  
 $\varphi_1$  – функція впливу;

$y_i$  – множина інформаційних параметрів, що характеризують сигнал-відгук певного типу металу;

$h_k$  – відсоток подібності кожного з інформативних параметрів сигналу-відгуку;

$\beta$  – узагальнений параметр вихрострумowego контролю;

$\omega$  – кутова частота;

$R_z$  – радіус передавальної антени;

$a_i$  – коефіцієнти лінійного передбачення;

$p$  – порядок передбачення, кількість коефіцієнтів моделі лінійного передбачення;

$S_k$  –  $k$ -й відлік сигналу;

$q$  – дисперсія вхідного шуму збудження;

$v_k$  – некорельована послідовність гаусівських величин з нульовим математичним очікуванням;

$\hat{R}$  – кореляційна матриця;

$\hat{r}$  – кореляційний вектор;

$K^l$  – кількість зразків в межах одного класу металів;

$z$  – кількість різних типів металів;

$\delta$  – порогове значення;

$u$  – кількість дискретів оцифрованого сигналу;

$d_r$  – вибірка нульових значень;

$A_{f_0}$  – амплітуда спектру на центральній частоті у дБ;

$A_{f_{0+1}}$  – амплітуда спектру центральній частоті +1 Гц у дБ;

$A_{f_V}$  – амплітуда спектру на верхній межі у дБ;

$A_{f_N}$  – амплітуда спектру на нижній межі у дБ;

$K_r$  – кореляційне число між центральною гармонікою та кожною із бічних гармонік;

$W$  – кількість параметрів, що характеризують сигнал-відгук;

$m_i^l$  – середні значення оцінок параметрів авторегресивних моделей;

$D_i^l$  – дисперсії оцінок параметрів авторегресивних моделей;

$\gamma_i$  – порогове значення по критерію Фішера.

## ВСТУП

Для знаходження та ідентифікації прихованих металевих предметів в різних середовищах, що за своїми фізичними характеристиками відрізняються між собою, використовують електронні прилади – радіотехнічні системи (РС), які виявляють та ідентифікують ці металеві предмети. Вони використовують відмінності в електричних та магнітних властивостях самих металів та середовища, в якому вони знаходяться.

Найпоширенішими за конструкцією є радіотехнічні системи з магнітною рамочною антеною, що по суті є вихрострумowym пристроєм. Розрізнення металів в них здійснюється за пороговим рівнем прийня-

того сигналу. Однак, такий підхід не дозволяє визначити тип металу. Для подолання вище описаних обмежень пропонується спосіб розрізнення, який побудований на аналізі сигналу-відгуку в спектральній області, який виникає в приймальній антені вихрострумowego пристрою під дією струмів Фуко.

Ідентифікація прихованих металів за типом складається з двох етапів: виявлення металевого предмета та ідентифікація металу, з якого виготовлений цей предмет.

Виявлення здійснюється радіотехнічними системами [1, 2], що працюють на основі опромінення прихованого металевого об'єкту електромагнітним полем та подальшому аналізу сигналу, отриманого в результаті взаємодії поля з об'єктом. Недоліком таких приладів є неможливість визначення типу металу, з якого виготовлено об'єкт.

Технічні характеристики вихрострумowych пристроїв визначаються структурою приладу та методами обробки отриманого сигналу від металевого предмета. Інформація про метал лежить в амплітуді, фазі чи частоті сигналу, причому, як правило, тільки один з цих параметрів є інформативним, а інші параметри вважаються заважаючими. В існуючих пристроях інформаційним параметром, як правило, є амплітуда сигналу [1,3].

Фазовий та частотний методи роботи приладу, зазвичай, використовуються в неруйнівному контролі металевих об'єктів для виявлення їх механічних дефектів. Хоча, в ряді робіт [4, 5] була зроблена спроба використати фазовий метод для виявлення та ідентифікації металу, однак, авторам вдалося отримати ідентифікацію лише за дихотомічними ознаками (чорний / кольоровий).

Тип металу можна визначити лише візуально, але для цього об'єкт необхідно знайти та провести його аналіз в лабораторних умовах на спеціальних металоаналізаторах.

Існує декілька методів такого аналізу [6]. Найбільше розповсюджений хімічний метод, який побудований на розкладі досліджуваного матеріалу на атоми та молекули та подальшому дослідженню осаду чи кольору реагентів, що утворились як нові сполуки внаслідок хімічної реакції. Це найбільш точний метод аналізу, але він лабораторний та потребує багато часу.

Зараз хімічний метод замінюється оптико-емісійним, рентгено-флуоресцентним, атомно-абсорбційним, атомно-емісійним та іншими. Найбільш розповсюдженими з них є оптико-емісійний та рентгено-флуоресцентний аналізи. Ці методи аналізу потребують наявності зразка металу [7] і також не дозволяють визначити його склад дистанційно, без лабораторних досліджень.

Тому, задача виявлення та експрес-тесту складу металевих предметів без їх ушкодження, в тому числі і прихованих в іншому діелектричному середовищі, є актуальною.

**Об'єктом дослідження** є процес ідентифікації матеріалу металевих виробів за сигналами-відгуками від вихрострумової системи.

**Предметом дослідження** є нерівномірність сигналу вихрострумів пристроїв на виході фазового детектора РС, отриманого від об'єктів контролю з різних магнітних та немагнітних металів.

**Метою роботи** є розробка методу аналізу сигналів вихрострумів пристроїв, який зручний для накопичення бази даних відомих матеріалів, а також для порівняння сигналу-відгуку від невідомого металевго предмета з наявними в базі еталонними сигналами, що дозволяє розширити функціональні можливості вихрострумів пристроїв. Такий метод дозволяє визначити тип металу, з якого виконаний металевий предмет.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Промислові ВСП вирішують задачу виявлення та дихотомічної ідентифікації металевих предметів, котрі знаходяться в діелектричному середовищі та досліджуються. Вони дозволяють їх знайти та розбити виявлену множину об'єктів на дві підмножини (магнітні або чорні) та (немагнітні або кольорові). Ця задача вирішується шляхом аналізу сигналу на виході ВСП. Існуючі (амплітудний, фазовий та частотний) методи ідентифікації металів не дозволяють достовірно ідентифікувати їх в середині підмножин. Тому ця задача є актуальною. Вирішувати її можливо та необхідно шляхом пошуку нових ознак в нерівномірності вихідного сигналу ВСП, які дозволяють визначити з якого металу виготовлено предмет, наприклад, з міді чи золота, сталі чи нікеля. Серед множини параметрів  $y_i$ , що характеризують сигнал (амплітуда, зміна фази сигналу при скануванні, перехід сигналу через нуль, зміна полярності тощо) необхідно знайти ті, що максимально характеризують досліджуваний метал, виміряти їх значення та створити базу графічно-цифрових образів металів цього сигналу, який є масивом параметрів ідентифікації  $y = \{y_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, W$ , де  $W$  – кількість параметрів, що характеризують сигнал-відгук, та порівняти його з тими, які знаходяться в базі даних.

Відповідність характеристик зображення вимірюваного сигналу таким, що є в базі даних – це критерій ідентифікації  $P$ . Критерій ідентифікації відображає відсоткову подібність сигналу від нового металу до сигналу-відгуку конкретного металу з бази даних. Критерій  $P$  обчислюється усередненням максимальних значень масива  $h_k$ . Даний масив містить максимальні значення відсоткової подібності кожного з інформативних параметрів  $y_i$ . Для прийняття рішення про виявлений тип металу із бази даних вибирається лише той сигнал, в межах якого найбільша кількість максимумів кожного із інформативних параметрів  $y_i$ :

$$P = \frac{1}{W} \sum_{k=1}^W h_k.$$

Співпадіння характеристик образу вимірюваного сигналу з тим, що знаходиться в базі даних, і є критерієм ідентифікації. Задача побудови та розпізнавання графічно-цифрових образів вихідного сигналу РС розглядається в даній статті.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В основі сучасних вихрострумів пристроїв лежить аналіз взаємодії електромагнітного поля антени з металевим предметом на основі наведених електромагнітним полем вихрових струмів Фуко. Зараз існує велика кількість приладів [2], в основу яких покладено вихрострумівий метод [8, 9].

Зміна електромагнітних властивостей середовища або прихованого об'єкта, в якому відбувається розповсюдження збуджуючого електромагнітного поля, призводить до зміни параметрів вихрових струмів і створеного ними вторинного магнітного потоку. Як наслідок, змінюється сумарний магнітний потік системи «вихрострумівий перетворювач – прихований об'єкт», що, в свою чергу, призводить до зміни електричних величин (опір, струм, е.р.с.) в приймальній антені. Ці зміни відстежуються в приладах, що включені у вимірювальне коло. Передавальна антена вихрострумівого перетворювача є котушкою, що створює однорідне змінне магнітне поле. В процесі пошуку прихованого об'єкта вихрострумівий перетворювач переміщається над поверхнею об'єкта. При перетині поля та металевго предмета магнітний потік спотворюється і в чутливому елементі приладу (приймальній антені) виникає електричний сигнал, що несе інформацію про наявність металу в даному місці. Тому антенна система складається з передавальної та приймальної антен.

На даний час, автор розвиває [10, 11] напрям ідентифікації металів за типом, шляхом аналізу сигналів в часовій та частотній областях новими для даних завдань підходами [12, 13]. Для проведення цих досліджень було розроблено та виготовлено радіотехнічну систему, що дозволяє оцінювати вплив електромагнітного поля на металеві предмети та аналізувати характер зміни відбитого сигналу-відгуку [14–16].

В роботі пропонується аналізувати сигнал-відгук в частотній області та використовувати як інформативну ознаку нерівномірність (кривизну) обвідної спектра.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для вирішення поставленої задачі розроблено систему, структурна схема якої наведена на рис. 1. Як сигнал збудження запропоновано використовувати імпульсний сигнал прямокутної форми частотою 6600Гц. Приймальний тракт (приймальна антена та блок смугових фільтрів) налаштовано так, щоб можна було легко

зареєструвати перехідний процес в системі, що виникає після закінчення збуджуючого імпульсу.

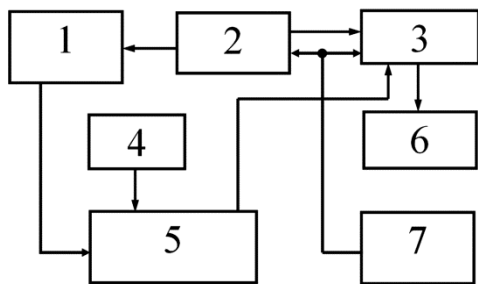


Рисунок 1 – Структурна схема розробленої системи

Система складається з передавальної магнітної антени 1, блоку фільтрів та фазового детектора 5, генератора тактових імпульсів 7, блоку обробки на мікроконтролері 3 та індикаторного пристрою 6. Блок 2 формує імпульсні сигнали, що поступають на передавальну магнітну антену 1. Блок 5 налаштований на прийом сигналів від приймальної магнітної антени 4 з частотою сигналу передавального блоку. Таке поєднання блоків є класичною радіотехнічною системою із рознесеними антенами. Для забезпечення синхронізації між вузлами при обробці даних використовується генератор тактових імпульсів. Після обробки сигналів блоком 5, дані поступають до запам'ятовувального пристрою мікроконтролера, де отримані сигнали від дослідних зразків порівнюються з еталонними, інформація про які зберігається в запам'ятовувальному пристрої. Результат порівняння надходить до індикаторного пристрою 6.

Сигнал-відгук залежить від електричних та магнітних властивостей металів. В теорії неруйнівного контролю [17] використовується функція впливу, яка комплексно показує взаємовплив цих характеристик на сигнал:

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

$$x = \lambda R_3, \quad \beta = R_3 \sqrt{\omega \mu_a \sigma}.$$

При дослідженнях використовувалися металеві предмети різних геометричних розмірів та різної товщини. Відомо, що вихрострумний відгук чутливий до форми досліджуваних предметів, наявності в них замкнутих контурів, щільових дефектів та просто якості обробки поверхні. У дослідженнях використано металеві предмети різної форми, які співрозмірні із антеною системи (мінімальний зразок 10x10x1 мм та максимальний 80x80x5 мм) і лише для такого діапазону розмірів сигнал-відгук зберігає свою форму в межах одного і того ж типів металів. Мінімальний розмір зразків обмежений чутливістю антенного блоку системи. При збільшенні розмірів зразків за розмір

антени сигнал-відгук розтягується, тому виникає потреба у зміні розміру антенного блоку, що потребує і формування нової бази даних під інший типорозмір антени.

Оцифровані сигнали – відгуки від різних типів металів оброблялись відомим методом лінійного передбачення, щоб розділити їх на групи та ідентифікувати. Метод лінійного передбачення в основному використовують для ідентифікації звукових повідомлень, коли визначаються сказані диктором літери [18]. Для вирішення завдання ідентифікації металів за допомогою метода лінійного передбачення застосовується підхід на основі подання сигналу від виявленого об'єкту у вигляді вектора ознак.

В якості ознак використовуються параметри авторегресивної моделі прийнятого сигналу. Параметри моделі визначаються на основі оцінки кореляційної функції прийнятого сигналу шляхом вирішення рівнянь Юла-Уокера. Метод лінійного передбачення знайшов широке застосування при вирішенні задач розпізнавання мови [19].

В якості ознак використовуються параметри  $a_i, i = \overline{1, p}$  авторегресивної моделі прийнятого сигналу, яка має вигляд:

$$S_k = \sum_{i=1}^p a_i s_{k-i} + v_k, \quad [18].$$

Формування еталонів образів, що розрізняються, виконується на етапі навчання за заданими зразками сигналів-відгуків від металів.

Для кожного зразка отримується реалізація прийнятого сигналу, яка оцифровується і представляється у вигляді  $S_k, k = \overline{1, N}$ . На її основі розраховуються максимально правдоподібні оцінки значень кореляційної функції отриманого сигналу по формулі [18]:

$$\hat{R}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k S_{k-i}, \quad i = \overline{0, p} \quad (1)$$

З використанням оцінок значень кореляційної функції  $\hat{R}_i, i = \overline{0, p}$  формуються кореляційна матриця  $\hat{R}$  і вектор  $\hat{r}$ , які мають вигляд:

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \hat{R}_0 & \dots & \hat{R}_{p-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{R}_{p-1} & \dots & \hat{R}_0 \end{bmatrix}; \quad \hat{r} = \begin{bmatrix} \hat{R}_1 & \dots & \hat{R}_p \end{bmatrix}^T.$$

Вектор оцінок параметрів авторегресійної моделі  $\hat{a}^T = [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_p]$  знаходиться по формулі [18, 19]:

$$\hat{a} = R^{-1} \hat{r}.$$

Після розрахунку векторів оцінок параметрів авторегресійних моделей за заданими зразками сигналів від металів знаходяться середні значення  $m_i^l$ ,  $i = \overline{1, p}$  і дисперсії  $D_i^l$  оцінок параметрів авторегресивних моделей  $\hat{a}_i^l$  для класів металів  $l = \overline{1, z}$ , що розглядаються, по формулам:

$$m_i^l = \frac{1}{K^l} \sum_{j=1}^{K^l} a_{ij}^l, \quad i = \overline{1, p}, \quad l = \overline{1, z};$$

$$D_i^l = \frac{1}{K^l - 1} \sum_{j=1}^{K^l} (a_{ij}^l - m_i^l)^2.$$

Еталони образів будуються на основі середніх значень  $m_i^l$  коефіцієнтів лінійного передбачення з використанням критерію Фішера, який дозволяє відібрати найбільш інформативні параметри [18]. Достатність  $i$ -ї ознаки на основі критерію Фішера визначається по формулі:

$$\gamma_i = \frac{(m_i^1 - m_i^2)^2}{D_i^1 - D_i^2}.$$

Доцільність використання  $i$ -ї ознаки для розрізнення класів визначається на основі вирішального правила:  $\gamma_i \geq \delta$ .

Таким чином, в результаті виконання процедури навчання отримуються  $q \leq p$  ознак класів різних типів металів  $m_i^l$ ,  $i = \overline{1, q}$ . На етапі розрізнення проводиться порівняльний аналіз відповідних ознак отриманого сигналу з ознаками класів з бази даних. Ухвалення рішення про належність металу до  $r$ -го класу виконується по мінімуму відстані між вектором ознак отриманого сигналу і векторами еталонних класів за вирішальним правилом [18, 19]:

$$\sum_{j=1}^q (\hat{a}_i - m_i^r)^2 \leq \sum_{j=1}^q (\hat{a}_i - m_i^l)^2, \quad r, l = \overline{1, 2}, \quad r \neq l.$$

Результати графічної ідентифікації металів на основі метода лінійного передбачення показано на рис. 2 – рис. 4, де наведено спектри сигналів від сталюого (а) та мідного (б) зразків, а також спектри моделі розпізнавання на основі метода лінійного передбачення для різних порядків моделі (10, 20, 80) відповідно.

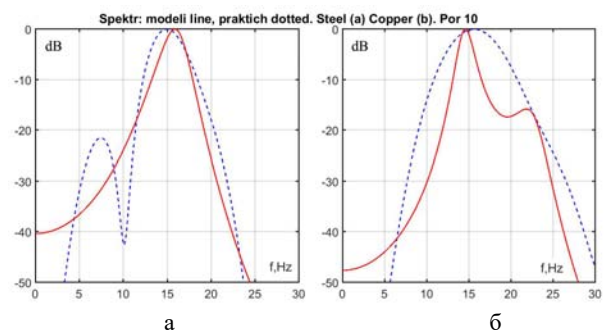


Рисунок 2 – Спектр практичного сигналу (штриховою) та моделі (суцільною) від мідного (а) та сталюого (б) зразків, порядок моделі 10

З рисунків видно, що теоретичний спектр на основі моделі лінійного передбачення не дозволяє вірно повторити форму спектра реального сигналу, навіть при збільшенні порядку інформативних коефіцієнтів більше 20, коли модель при звукотехнічній обробці сигналів визнається нестійкою.

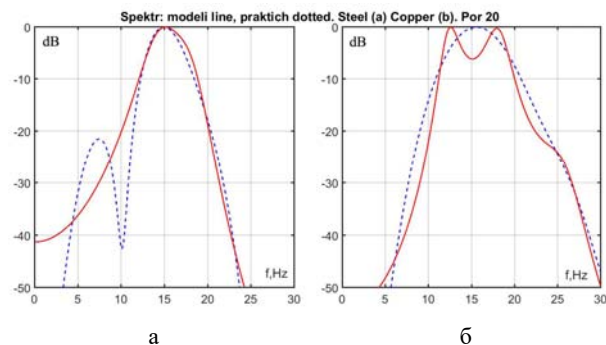


Рисунок 3 – Спектр практичного сигналу (штриховою) та моделі (суцільною) від мідного (а) та сталюого (б) зразків, порядок моделі 20

Метод лінійного передбачення має недоліки, адже при кожному перетворенні оцифрованої вибірки сигналу (відтворення сигналу по зворотніх коефіцієнтах (1), розрахунок швидкого перетворення Фур'є вибірки сигналу, графічне порівняння сигналів) вноситься помилка і рішення про співпадіння сигналу-відгуку до якогось зразка із бази даних покладається на візуальне порівняння, а не на результат комп'ютерного обчислення на основі визначених критеріїв.

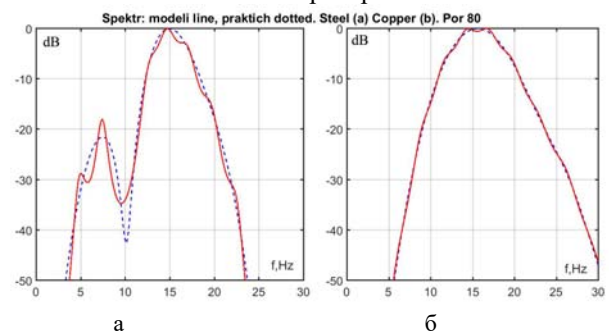


Рисунок 4 – Спектр практичного сигналу (штриховою) та моделі (суцільною) від мідного (а) та сталюого (б) зразків, порядок моделі 80

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Чисельне комп'ютерне порівняння форми спектрів сигналів-відгуків від різних металів є кращим рішенням для ідентифікації металів. Ідентифікація металів за типом в окремих випадках вірно проводилась шляхом порівняння лише площ під обвідними спектрів [11,12] – інтегральна оцінка спектру сигналу-вігучу. Спектри сигналів від срібла 868пр, золота 900пр та свинцю на основі швидкого перетворення Фур'є показано на рис. 6 – рис. 8. Дані метали мають подібні за нерівномірністю обвідні спектрів, а також, близькі за величиною площі. В такому випадку результат інтегрального порівняння сигналів-відгуків може бути хибним, табл. 1.

Тому, для кращої ідентифікації металів за типом запропоновано кореляційний підхід, який доповнює результати інтегральної ідентифікації металів в спектральній області.

Новий підхід полягає в взаємному аналізі амплітуд спектру на всій смузі частоти, рис. 5. Значення амплітуд отримується за один етап – перетворення Фур'є і при подальшому аналізі відсутні перетворення вибірки сигналу, чим суттєво мінімізовані помилки в порівнянні з попереднім методом – методом лінійного передбачення.

Таблиця 1 Спектральні характеристики сигналів-відгуків деяких металів [11, 12]

№	Метал	Ширина спектру по рівню -40дБ (Гц)	Площа під обвідною спектру (дБ·Гц)
1	Срібло 868пр	6,24±0,16...26,70±0,22	535,5 ±4,6
2	Золото 900пр	6,47±0,15...27,97±0,12	545,0± 3,3
3	Свинець	6,64±0,29...28,14±0,26	547,6±4,9
4	Метал	Відсоткова % різниця між площами	
5	Срібло і Золото	1,87%	
6	Срібло і Свинець	2,24%	
7	Золото і Свинець	0,36%	

Ідея запропонованого підходу зводиться до того, що розраховуються середньоквадратичні спектральні різниці між амплітудою на центральній частоті і амплітудами на всій смузі аналізу сигналу. Отриманий результат для машинного порівняння форми представляється у вигляді матриці середньоквадратичної різниці амплітуд, а також як сума цих різниць.

Такий підхід є значно точнішим, чим візуальне порівняння форми, він потребує малої кількості математичних операцій, що дуже доречно при побудові ідентифікатора металів на мікроконтролерах.

При проведенні експериментів по кожному із зразків металів отримано 100 сигналів-відгуків, що використовувались при розрахунку математичного очікування та середньо квадратичного відхилення кожного із інформаційних параметрів при ідентифікації металів.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для підвищення достовірності ідентифікації металів за типом в роботі пропонується використати кореляційний підхід [20], який полягає в отриманні додаткового інформаційного параметру  $K_r$ , та дозволяє провести аналіз форми обвідної спектру.

Для цього розглянемо оцифрований фрагмент сигналу-відгучу. Такий фрагмент, що складається з  $u$  дискретів (100–150 точок)  $x_n, n = 1, 2, \dots, u$  при перетворенні Фур'є немає плавної обвідної спектру:

$$X_k = \sum_{n=0}^{u-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{u} kn} [20].$$

Тому, вибірка  $x$  доповнюється нулями, що дозволяє отримати плавну обвідну спектру:

$$x_n + d_r, n = 1, 2, \dots, u; r = 1, 2, \dots, m; m \geq u.$$

Результат кореляційного аналізу форми спектру [21–23] – це взаємне співвідношення амплітуд із покрововим зміщенням від центральної частоти до нижньої та верхньої меж:

$$A_{f_0} \& A_{f_0+V} \quad A_{f_0} \& A_{f_0-N}$$

$$V = 1 \cdot f_V \quad N = 1 \cdot f_N$$

Особливість при здійсненні перетворення Фур'є [20] призводить до того, що для одного і того ж металу при різній величині вхідної вибірки буде різний крок дискрета спектральної функції. Щоб нівелювати вплив величини кроку дискретизації, результат кореляції ділиться на величину вхідної вибірки  $m+u$ . В цьому випадку, кореляційну залежність можна записати як:

$$K_r = \sqrt{\frac{1}{m+u}} \cdot \sqrt{(A_{f_0} - A_{f_0+1})^2 + (A_{f_0} - A_{f_0-1})^2 + (A_{f_0} - A_{f_0+2})^2 + (A_{f_0} - A_{f_0-2})^2 + \dots + (A_{f_0} - A_{f_V})^2 + (A_{f_0} - A_{f_N})^2}.$$



Рисунок 5 – Спектр сигналу-відгучу від сталюого зразка з позначеними амплітудними значеннями обвідної спектру



Для трьох вище вибраних металів, рис. 6 – рис. 8, що мають подібні інтегральні характеристики обвідної спектра [24, 25] було розраховано кореляційні числа  $K_r$ , табл. 2.

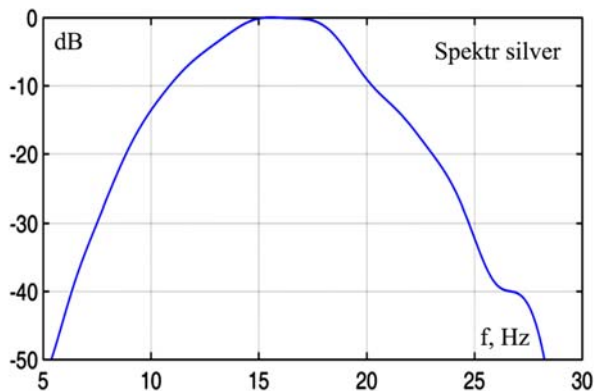


Рисунок 6 – Типовий спектр сигналу-відгуку (матеріал зразка – срібло 868 проби)

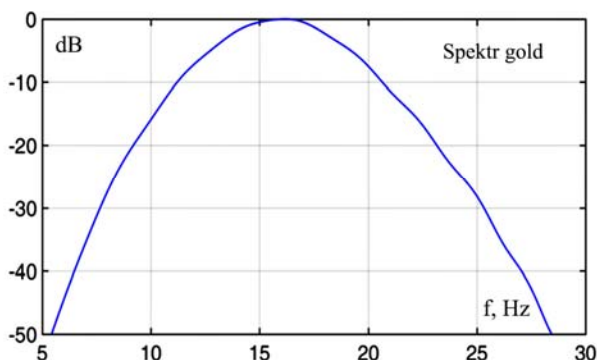


Рисунок 7 – Типовий спектр сигналу-відгуку (матеріал зразка – золото 900 проби)

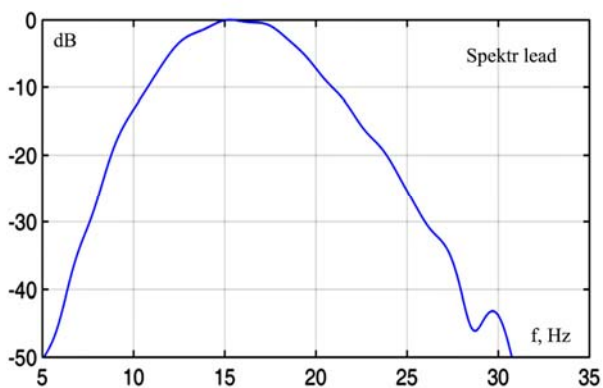


Рисунок 8 – Типовий спектр сигналу-відгуку (матеріал зразка – свинець)

Таблиця 2 – Порівняння металів по сигналам в спектральній області кореляційним аналізом [26, 27]

№	Метал	Кореляційне число $K_r$
1	Срібло 868пр	4.7169±0.1117
2	Золото 900пр	4.9663± 0.1736
3	Свинець	4.9314±0.2631
4	<b>Метал</b>	<b>Відсоткова % різниця, число <math>K_r</math></b>
5	Срібло і Золото	5,02%
6	Срібло і Свинець	4,34%
7	Золото і Свинець	0,7%

З табл. 2 видно, що кореляційний підхід дозволив збільшити відсоткову різницю між інформаційними параметрами сигналів – відгуків з 1,87% до 5,02% для срібла і золота, з 2,24% до 4,34% для срібла і свинцю та з 0,36% до 0,7% для золота і свинцю.

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз отриманих результатів показав, що за значенням кореляційного числа можна ідентифікувати метали у випадку, коли значення площ під обвідною спектрів близькі між собою. Це дозволяє підвищити достовірність ідентифікації металів.

Підвищення достовірності розрізнення металів дозволить зменшити кількість хибних спрацювань та браку на виробництві та оглядовому контролі, де важливо знати точний склад металевого зразка [28–30].

Запропонований кореляційний підхід є зручним і простим в прикладному плані реалізації, адже такі обчислення [31, 32] можна легко проводити на сучасних 32 бітних мікроконтролерах, при виготовленні переносних та автоматизованих ідентифікаторів, що виявляють металеві предмети у діелектричних середовищах [33, 34].

Вище вказано, що при збільшенні розмірів зразків за розмір антени потрібно формування нової бази даних під інший типорозмір антени. Тобто, для нинішньої антени потрібна база даних «точкових» зразків, а для великої антени база даних «протяжних» зразків. Встановлено, що отримані інформативні ознаки в межах одних і тих же типів металів зберігаються [24, 25]. Сигнал-відгук від зразків, що приховані у діелектричному середовищі (дерево, одяг, пісок) зберігається за формою, але зменшується амплітуда та з'являються шуми. Кілька разове вимірювання сигналу-відгуку та використання смугового фільтра із підсиленням в 30дБ [35, 36] дозволило вірно ідентифікувати заховані у піску металеві предмети на глибинах до 10 см.

В цілому, поєднання наявних інформативних ознак про сигнал-відгук (площа спектра під обвідною, нижня та верхні межі спектра, кореляційне число) дозволяють представити конкретний тип металу як образ. Ідентифікація нового зразка може бути здійс-

нена шляхом порівняння з образами із бази даних завдяки алгоритмам машинного навчання, такими як: Метод опорних векторів (SVM), Бассова мережа, метод к-ближній сусідів (KNNC) та ін. [5, 37, 38], вказуючи відсоткову подібність до існуючих у базі зразків.

### ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто задачу удосконалення вихрострумowego ідентифікатора металів на основі кореляційного підходу. Аналізу піддається нерівномірність обвідної спектру сигналу-відгуку, це дозволяє покращити можливості інтегрального підходу по ідентифікації металів за типом в спектральній області.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у тому, що вперше запропоновано аналізувати нерівномірність обвідної спектрів не на основі апроксимації функції поліномом, а як суму середньоквадратичних різниць амплітуд на різних частотах.

**Практична цінність** кореляційного підходу в тому, що обчислення інформативних коефіцієнтів в сигналі-відгуку можна здійснювати швидко на сучасних 32 бітних мікроконтролерах. Це дозволяє будувати компактні переносні ідентифікатори металів, що можуть використовуватись для експрес-тесту металів за типом.

**Перспективи подальших досліджень** полягають у тому, що запропонований підхід дозволяє збільшити точність ідентифікації металів, які мають близькі інтегральні характеристики сигналів-відгуків в спектральній області.

Пошук нових інформаційних параметрів в сигналах-відгуках та збільшення чутливості приймального тракту дозволить в подальшому здійснювати ідентифікацію не тільки металів за типом, а і визначати сплави, працювати із складеними виробами. Доцільно використовувати машинне навчання, щоб здійснювати ідентифікацію нових типів зразків, які можуть відрізнятися від наявних у базі даних.

### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar (2nd Edition) / D. J. Daniels. – London, UK.: Institution of Electrical Engineers, 2004. – 761 p. – ISBN 0 86341 360. DOI: <https://doi.org/10.1049/pbra015e>
2. Pravda V. I. Georadars / V. I. Pravda, O. D. Mrachkovskij, A. O. Abramovych // Bulletin of the National University “Lviv Polytechnic”, series “Radio Electronics and Telecommunications”. – 2015. – № 818. – P. 49–54.
3. Embedding target discrimination capabilities into handheld detectors for humanitarian demining / [A. J. Peyton, W. van Verre, X. Gao et al.] // The 16th International Symposium Mine action 2019 8th – 11th April. – Slano, Croatia. – 2019. – P. 31–35 DOI: <https://doi.org/10.1109/piers-spring46901.2019.9017326>
4. Obiazi A. M. Implementing a robust metal detector utilizing the colpitts oscillator with toroidal coil / A. M. Obiazi, F. I. Anyasi, O. O. Jacdonmi // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – 5(2). – P.56 – 63. DOI: <https://doi.org/10.3923/jeasci.2010.56.63>
5. Svatoš Jakub. Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors : PhD Thesis: Svatoš Jakub. – Prague, 2015. – 121p.
6. Hans A. van Sprang Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy / A. van Sprang Hans // Advances in X-ray Analysis. – 2000. – Vol.42. – P. 1–10.
7. Abramovych A. O. Application of spectral analysis for distinguishing metals by signals from eddy current converters / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // The East European Journal of Advanced Technology. – 2017. – Vol. 89, №5. – P. 51–57 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177>
8. Jol M. H. Ground penetrating radar Theory and applications / M. H. Jol. – Oxford GB.: Elsevier B. V., 2009. – 574 p. – ISBN: 978-0-444-53348-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53348-7.00017-x>
9. Щербаков Г. Н. Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред / Г. Н. Щербаков // Радиотехника. – 2005. – № 3. – С. 77–79.
10. Abramovych A. O. The remote eddy-current analysis of a composition of metal objects / A. O. Abramovych, I. S. Kashirsky, V. O. Piddubny // Metallophysics and advanced technologies. – 2017.– Vol. 39, № 8. – P. 1035–1049. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.08.1035>
11. Abramovych A. O. Method of processing the reflected signals from pulsed eddy current converters / A. O. Abramovych, V. A. Poddubny, I. S. Kashirsky // Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management. – 2017. – № 4. – P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1>
12. Abramovych A. O. Radio engineering system identification of metals on the basis of eddy-current converters / A. O. Abramovych, Y. S. Agalidi, V. O. Piddubnyi // Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management. – 2020. – № 1. – P. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-1>
13. Abramovych A. O. Eddy-current amplitude-phase based method for identifying conductive (metal) objects / A. O. Abramovych, V. O. Piddubnyi // International scientific and technical journal “Metallophysics and the latest technologies”. – 2020. – Volume 42, № 8.– P. 1169–1185. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.08.1169>
14. Bruschini C. A Multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining: thesis dissertation of Doctor in Applied Sciences / Claudio Bruschini.– Brussels : Vrije Universiteit Brussel, 2002.– 242 p.
15. Abramovych A. O. Solenoid antenna of radio engineering system of metal identification / A. O. Abramovych, V. O. Piddubnyi // The Journal of Zhytomyr State Technological University” / Engineering. – 2019. – Vol. №1(83). – P. 188–196. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-188-196](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-188-196)
16. Щербаков Г. Н. Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих укрывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания / Г. Н. Щербаков // Радиотехника. – 2005. – № 12. – С. 42–45.
17. Неразрушающий контроль / [под ред. В. В. Сухорукова]. – М. : Высш. шк. – Т. 3. – 1992. – 312 с.



18. Gold B. Speech and audio signal processing: processing and perception of speech and music. / B. Gold, N. Morgan // New York, USA : Wiley, 1999. – 560 p.
19. Rabiner L. R. Fundamentals of speech recognition / L. R. Rabiner, B. H. Juang // New Jersey, USA : Prentice Hall, 1993. – 496 p.
20. Ifeachor E. Digital Signal Processing: A Practical Approach 2nd Edition / E. Ifeachor, B. Jervis. – Hoboken, USA : Prentice Hall, 2001. – 933 p. ISBN 978-0201596199
21. Килимник О. М. Підвищення точності радіолокаційного зондування підповерхневих об'єктів багаточастотними фазовими радіосистемами: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата тех. наук: 05.12.17 / Килимник Олександр Михайлович. – Хмельницький, 2015. – 164 с.
22. Mathews J. H. Numerical methods using MATLAB. / J. H. Mathews. – New Jersey, USA : Pearson, 2003. – 696 p. ISBN 978-0130652485
23. Moore P. O. Electromagnetic testing / P. O. Moore. – Columbus, USA : American society for nondestructive testing, 2004. – 529 p. ISBN 1-57117-046-4
24. Abramovych A. O. Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // Bulletin of the Ternopil National Technical University. Ser: Technical sciences. – 2017. – Volume 86 (№2). – P.76–83.
25. Abramovych A. O. Eddy current device with the database, which contains different samples of metals, to identify them in the hidden objects / A. O. Abramovych, V. O. Piddubniy, O. M. Guslyakov // Scientific journal “Weapons and military equipment”. – 2017. – №3 (15). – P. 51–56. DOI:10.34169/2414-0651.2017.3(15).51-56
26. Kunz K. S. Numerical Analysis / K. S. Kunz. – New York, USA.: McGraw-Hill, 1964. – 390p. ISBN 978-1456477370
27. Gantmacher F. R. The Theory of Matrices / F. R. Gantmacher. – Cleveland, USA.: Chelsea Pub Co, 1984. – 576 p. ISBN 978-0828401319
28. Qaten S. Assessment of defects in ferromagnetic metals with eddy currents: PhD Thesis / Susan Qaten. – Uxbridge, 1989. – 230 p.
29. Salih M. Fourier Transform – Signal Processing / M. Salih. – Rijeka, Croatia : InTech, 2012. – 366 p. ISBN 978-953-51-0453-7.
30. Identification of metallic mines using low frequency magnetic fields / [L. S. Riggs, J. M. Mooney, J. T. Broach, A. H. Trang] // Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III. – Orlando, FL, United States. – 1998. – P. 146–157 DOI: <https://doi.org/10.1117/12.324233>
31. Stroustrup B. Programming: principles and practice using C++ (2nd Edition) / Bjarne Stroustrup. – Boston, USA : Addison-Wesley, 2014. – 2339p.– ISBN 978-0321-992789.
32. Daniels D. J. EM detection of concealed targets / D. J. Daniels. – New Jersey, Canada : John Wiley & Sons, 2009. – 299 p. ISBN: 978-0-470-12169-6. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470539859>
33. Abdulbast Mohamed Elgwel. Aspect independent detection and discrimination of concealed metal objects by electromagnetic pulse induction: a modelling approach: PhD Thesis / Abdulbast Mohamed Elgwel. – Manchester, 2013. – 129p.
34. Haynes W. CRS handbook of chemistry and physics, 95<sup>th</sup> edition / William M. Haynes. – Boca Raton, USA: Taylor & Francis: crc press, 2007.– 2608 p.
35. Bristow C. S. Ground penetrating radar in sediments / C. S. Bristow, H. M. Jol. – Birkbeck, University of London, UK, 2003.– 339 p.
36. Carey S. C. Software defined radio for stepped-frequency, ground-penetrating radar / S. C. Carey, W. R. Scott // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2017.– P. 4825–4828, DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128082.
37. Realistic subsurface anomaly discrimination using electromagnetic induction and an SVM classifier / [J. P. Fernandez, F. Shubitidze, I. Shamatava et al.] // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2010. – Vol. 2010. – P. 117–127. DOI <https://doi.org/10.1155/2010/305890>
38. A comparative study of NN and SVM-based electromagnetic inverse scattering approaches to on-line detection of buried objects / [S. Caorsi, D. Anguita, E. Bermani et al.] // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. – 2003. – Vol 18(2). – P. 65–75.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2021.  
Після доробки 07.10.2022.

УДК 621.39

#### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ИДЕНТИФИКАТОРА МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПОДХОДА

**Абрамович А. А.** – канд. техн. наук, завлаб кафедры радиотехнических систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт Игоря Сикорского» Киев, Украина.

#### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В статье рассмотрена задача усовершенствования вихретокового устройства идентификации металлов на основе корреляционного подхода. Такой подход удобен для накопления базы данных известных проводных материалов, а также для сравнения сигнала от неизвестного металлического предмета с имеющимися в базе эталонами. Предлагаемый подход позволяет определить тип металла, из которого выполнен образец, без повреждения его поверхности.

**Целью** работы является идентификация металлов по типу по сигналам-откликам от вихретокового преобразователя, благодаря выявлению новых информативных признаков и созданию базы образов металлов.

**Метод.** В работе приведены результаты экспериментального исследования предложенного подхода повышения достоверности идентификации металлических предметов, выявляемых с помощью вихретокового устройства. Данные исследования проведены на основе радиотехнической системы, которая работает на вихретоковом принципе и имеет низкочастотные рамочные магнитные антенны. Вихретоковый метод позволяет проводить идентификацию металлов по типу дистанционно и без повреждения их поверхности, в отличие от рентгено-флуоресцентного, оптико-эмиссионного или химического методов. Предложен корреляционный подход для обработки спектра сигнала от скрытого металлического предмета. Корреляционный подход позволяет повысить достоверность идентификации металлов по типу при обработке сигнала в спектральной области на основе преобразования Фурье. Проведены исследования на примере металлов, обладающих близкими спектральными характеристиками (серебро, золото, свинец). Предложенный подход позволил увеличить процентную

разницу между информационными параметрами сигналов – отзвов с 1,87% до 5,02% для серебра и золота, с 2,24% до 4,34% для серебра и свинца и с 0,36% до 0,7% для золота и свинца.

**Результаты.** Разработанная радиотехническая система является лабораторным макетом, состоящим из аналоговой части и цифровой. Аналоговая часть – блок антенн, усилитель сигнала и полосовой фильтр, цифровая часть – микроконтроллер с АЦП для оцифровки и передачи данных на ноутбук, программно реализующий предложенные подходы по обработке сигнала. В работе экспериментально подтверждена возможность использования радиотехнической системы для решения задачи идентификации металла в рамках подмножества немагнитных и магнитных материалов.

**Выводы.** Развитие современных вихретоковых устройств происходит в направлении повышения достоверности идентификации скрытых металлических объектов, что актуально при проведении геофизической разведки, в археологии, а также в силовых структурах при поиске скрытых металлов. Разработка и усовершенствование таких систем включает в себя как разработку аппаратной части так и выявление новых информационных параметров в сигналах-отзввах от металлов. Одним из таких направлений может быть корреляционный подход к обработке сигналов в спектральной области.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вихретоковые устройства, идентификация металлов, корреляция, метод электромагнитной индукции.

UDC 621.39

## IMPROVING THE EDDY CURRENT IDENTIFIER OF METALS BASED ON THE CORRELATION APPROACH

**Abramovych A. O.** – PhD, Head of the Laboratory of the Department of Radio Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Kyiv, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The article considers the problem of improving the eddy current device for metal identification on the basis of the correlation approach. This approach is convenient for the accumulation of a database of known leading materials, as well as for the comparison of the signal from an unknown metal object with the available standards in the database. The proposed approach allows to determine the type of metal from which the sample is made, without damaging its surface.

**Objective.** The aim of the work is the identification of metals by type on the feedback signals from the eddy current converter, due to the identification of new informative features and the creation of a database of images of metals.

**Method.** The paper presents the results of an experimental study of the proposed approach to increase the reliability of identification of metal objects that are detected using an eddy current device. These studies are conducted on the basis of a radio system that operates on the eddy current principle and has low-frequency magnetic loop antennas. The eddy current method allows the identification of metals by type remotely and without damaging their surface, in contrast to X-ray fluorescence, optical emission or chemical methods. A correlation approach for processing the response signal spectrum from a hidden metal object is proposed. The correlation approach allows to increase the reliability of the identification of metals by type when processing the signal in the spectral region based on the Fourier transform. Studies have been conducted on the example of metals that have similar spectral characteristics (silver, gold, lead). The updated approach allowed to increase the percentage difference between the information parameters of signals – responses from 1.87% to 5.02% for silver and gold, from 2.24% to 4.34% for silver and lead and from 0.36% to 0.7% for gold and lead.

**Results.** The developed radio system is a laboratory model, which consists of an analog part and a digital one. The analog part is an antenna unit, a signal amplifier and a bandpass filter, a digital part – a microcontroller with an ADC for digitizing and transmitting data to a laptop, which software implements the proposed approaches to signal processing. The paper experimentally confirmed the possibility of using a radio engineering system to solve the problem of metal identification within a subset of nonmagnetic and magnetic materials.

**Conclusions.** The development of modern eddy current devices is aimed at increasing the reliability of the identification the hidden metal objects, which is relevant in geophysical exploration, archeology, and law enforcement agencies in the search for hidden non-ferrous metals. The development and improvement of such systems includes both the development the hardware and the discovery new information parameters in the feedback signals from metals. One such direction may be the correlation approach to signal processing in the spectral region.

**KEYWORDS:** eddy current devices, metal identification, correlation, electromagnetic induction method.

### REFERENCES

1. Daniels D. J. *Ground Penetrating Radar* (2nd Edition). London, UK, Institution of Electrical Engineers, 2004, 761 p. ISBN O 86341 360. DOI: <https://doi.org/10.1049/pbra015e>
2. Pravda V. I., Mrachkovskiy O. D., Abramovych A. O. *Georadars, Bulletin of the National University “Lviv Polytechnic”, series “Radio Electronics and Telecommunications”, 2015, № 818, pp. 49–54.*
3. Peyton A. J., Verre van W., Gao X., Marsh L. A., Podd F. J. W., Daniels D. J., Ambuš D., Vasić D., Bilas V. *Embedding target discrimination capabilities into handheld detectors for humanitarian demining, The 16th International Symposium Mine action 2019 8th–11th April. Slano. Croatia, 2019, pp. 31–35 DOI: <https://doi.org/10.1109/piers-spring46901.2019.9017326>*
4. Obiazi A. M., Anyasi F. I., Jacdonmi O. O. *Implementing a robust metal detector utilizing the colpitts oscillator with toroidal coil, Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, No.5(2), pp. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.3923/jeasci.2010.56.63>*
5. Svatoš Jakub. *Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors: PhD Thesis: Svatoš, Jakub. Prague, 2015, 121 p.*
6. Hans van A. *Sprang Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy, Advances in X-ray Analysis, 2000, Vol. 42, pp. 1–10.*
7. Abramovych A. O., Poddubny V. O. *Application of spectral analysis for distinguishing metals by signals from eddy*

- current converters, *The East European Journal of Advanced Technology*, 2017, Vol. 89 (№5), pp. 51–57 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177>
8. Jol M. H. Ground penetrating radar Theory and applications. Oxford GB., Elsevier B. V., 2009, 574 p. ISBN: 978-0-444-53348-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53348-7.00017-x>
  9. Shcherbakov H. N. Vybor elektromahnytnoho metoda zondyrovannya dlya poyska ob'ektov v tolsheche ukryvayushchykh sred, *Radyotekhnika*, 2005, No. 3, pp. 77–79.
  10. Abramovych A. O., Kashirsky I. S., Piddubnyi V. O. The remote eddy-current analysis of a composition of metal objects, *Metallophysics and advanced technologies*, 2017, Vol. 39, № 8, pp. 1035–1049. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.08.1035>
  11. Abramovych A. O., Poddubny V. A., Kashirsky I. S. Method of processing the reflected signals from pulsed eddy current converters, *Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management*, 2017, No. 4, pp. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1>
  12. Abramovych A. O., Agalidi Y. S., Piddubnyi V. O. Radio engineering system identification of metals on the basis of eddy-current converters, *Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management*, 2020, №1, pp. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-1>
  13. Abramovych A. O., Piddubnyi V. O. Eddy-current amplitude-phase based method for identifying conductive (metal) objects, *International scientific and technical journal "Metallophysics and the latest technologies"*, 2020. Volume 42, № 8, pp. 1169–1185. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.08.1169>
  14. Bruschini C. A Multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining: thesis dissertation of Doctor in Applied Sciences. Brussels, Vrije Universiteit Brussel, 2002, 242 p.
  15. Abramovych A. O., Piddubnyi V. O. Solenoid antenna of radio engineering system of metal identification, *The Journal of Zhytomyr State Technological University, Engineering*, 2019, Vol. №1(83), pp. 188–196. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-188-196](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-188-196)
  16. Shcherbakov H. N. Uvelychenye predel'noy hlubyny obnaruzhenyia lokal'nykh ferromahnytnykh ob'ektov v tolsheche provodyashchykh ukryvayushchykh sred metodom dystantsyonnoho parametrycheskoho podmahnychvannya, *Radyotekhnika*, 2005, № 12, pp. 42–45.
  17. Nerazrushayushchii kontrol' Pod red. Sukhorukova V. V. Moscow, Vyssh. shk., 1992, Vol. 3, 312 p.
  18. Gold B., Morgan N. Speech and audio signal processing: processing and perception of speech and music. New York, Wiley, 1999, 560 p.
  19. Rabiner L. R., Juang B. H. Fundamentals of speech recognition. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1993, 496 p.
  20. Ifeachor E., Jervis B. Digital Signal Processing: A Practical Approach 2nd Edition. Hoboken, USA, Prentice Hall, 2001, 933 p. ISBN 978-0201596199
  21. Kylymnyk O. M. Pidvyshchennya tochnosti radiolokatsiynoho zonduvannya pidpoverkhnevyykh ob'yektiv bahatochastotnymy fazovymy radiosystemamy: dys. na zdobuttya naukovooho stupenya kandydata tekhn. nauk: 05.12.17. Khmelnyskyi., 2015, 164 p.
  22. Mathews J.H. Numerical methods using MATLAB. New Jersey, USA, Pearson, 2003, 696 p. ISBN 978-0130652485
  23. Moore P. O. Electromagnetic testing. Columbus, USA, American society for nondestructive testing, 2004, 529 p. ISBN 1-57117-046-4
  24. Abramovych A. O., Poddubny V. O. Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them, *Bulletin of the Ternopil National Technical University. Ser: Technical sciences*, 2017, Volume 86 (№2), pp. 76–83.
  25. Abramovych A. O., Piddubnyi V. O., Guslyakov O. M. Eddy current device with the database, which contains different samples of metals, to identify them in the hidden objects, Scientific journal “Weapons and military equipment”, 2017, No. 3(15), pp. 51–56. DOI:10.34169/2414-0651.2017.3(15).51-56
  26. Kunz K. S. Numerical Analysis. New York, USA, McGraw-Hill, 1964, 390p. ISBN 978-1456477370
  27. Gantmacher F. R. The Theory of Matrices. Cleveland, USA, Chelsea Pub Co, 1984, 576 p. ISBN 978-0828401319
  28. Qaten S. Assessment of defects in ferromagnetic metals with eddy currents: PhD Thesis. Uxbridge, 1989, 230 p.
  29. Salih M. Fourier Transform – Signal Processing. Rijeka, Croatia, InTech, 2012, 366 p. ISBN 978-953-51-0453-7.
  30. Riggs L. S., Mooney J. M., Broach J. T., Trang A. H. Identification of metallic mines using low frequency magnetic fields, *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III*. Orlando, FL, United States, 1998, pp. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.324233>
  31. Stroustrup B. Programming: principles and practice using C++ (2nd Edition). Boston, USA, Addison-Wesley, 2014, 2339 p. ISBN 978-0321-992789.
  32. Daniels D. J. EM detection of concealed targets. New Jersey, Canada, John Wiley & Sons, 2009, 299 p. ISBN: 978-0-470-12169-6. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470539859>
  33. Abdulbast Mohamed Elgwel. Aspect independent detection and discrimination of concealed metal objects by electromagnetic pulse induction: a modelling approach, PhD Thesis: Abdulbast Mohamed Elgwel. Manchester, 2013, 129 p.
  34. Haynes W. CRS handbook of chemistry and physics, 95<sup>th</sup> edition. Boca Raton, USA, Taylor & Francis, crc press, 2007, 2608 p.
  35. Bristow C. S., Jol H. M. Ground penetrating radar in sediments. Birkbeck, University of London, UK, 2003, 339 p.
  36. Carey S. C., Scott W. R. Software defined radio for stepped-frequency, ground-penetrating radar, 2017 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2017, pp. 4825–4828. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128082.
  37. Fernandez J. P., Shubitidze F., Shamatava I., Barrowes B. E., O'Neill K. Realistic subsurface anomaly discrimination using electromagnetic induction and an SVM classifier, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, Vol. 2010, pp. 117–127. DOI <https://doi.org/10.1155/2010/305890>
  38. Caorsi S., Anguita D., Bermani E., Boni A., Donelli M., Massa A. A comparative study of NN and SVM-based electromagnetic inverse scattering approaches to on-line detection of buried objects, *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2003, Vol 18(2), pp. 65–75.