

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»**

**АБРАМОВИЧ АНТОН ОЛЕКСІЙОВИЧ**

УДК 621.39.

**УДОСКОНАЛЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ  
ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ**

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент,  
**Баженов Віктор Григорович**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри приладів і систем неруйнівного контролю

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Петрук Василь Григорович**  
Вінницький національний технічний університет, директор Інституту екологічної безпеки та моніторингу довкілля

кандидат технічних наук, доцент  
**Монченко Олена Володимирівна**  
Національний авіаційний університет, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини.

Захист відбудеться **«30» березня 2021 р. о 15.00** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою:  
03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1. ауд. 249.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:  
03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «23» лютого 2021 р.

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.18  
д.т.н., проф.*



Н.І. Бурау

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день в різних галузях науки, техніки, доглядовому контролю та військовій справі виникає потреба у виявленні та ідентифікації металевих об'єктів. Це пов'язано з пошуком вибухонебезпечних металевих предметів, комунікацій, визначення металу, з якого виготовлений невідомий об'єкт, ідентифікація знайдених самородків, в тому числі і прихованих. Для пошуку використовують електронні прилади (металошукачі), побудовані на реєстрації відмінності в електричних та магнітних властивостях прихованих предметів та середовища, в якому вони знаходяться. Такі прилади крім пошуку здійснюють попередню ідентифікацію металу. Вони визначають до якої підгрупи відноситься метал – до чорних металів чи кольорових. Металошукачі, які є вихрострумовою системою для виявлення металевих предметів, здійснюють дихотомічний аналіз металів, розділяють їх на дві великі підгрупи (чорних, кольорових) та не надають можливості визначити метал в межах підгруп, тобто не можуть відрізнити золото від алюмінію чи міді, нікель від сталі тощо.

Остаточна ідентифікація здійснюється лабораторним аналізом складу металевого об'єкту, для якого використовують хімічний, рентгено-флуоресцентний чи оптико-емісійний методи. Вони вимагають наявності зразка металу і не дають змоги ідентифікувати його дистанційно (безконтактно). Крім того, поверхня аналізованого об'єкту обов'язково має бути очищена від забруднень. З цих причин лабораторний аналіз не завжди є прийнятним. У випадках, коли не потрібно встановлювати хімічний склад металевого об'єкту, а достатньо лише ідентифікувати метал, з якого виготовлено об'єкт, можна використовувати інші методи. Одним з таких методів, після певного доопрацювання, може бути вихрострумний метод виявлення металевих об'єктів, який належить до електромагнітних методів виявлення металів в діелектричному середовищі.

Великий внесок в розвиток цього методу внесли такі вчені як Маєвський С.М., Баженов В.Г., Любчик В.Р., Учанин В.М., Гальченко В.Я. та інші. Інтенсивно ведуться роботи і за кордоном, про що говорять матеріали міжнародних конференцій та публікації у міжнародних журналах. Захищено ряд дисертацій як в Україні, так і за кордоном. Це вчені Килимник О.М., Сватош Якуб та інші. Аналіз робіт показав, що ще не вдалося ідентифікувати об'єкти в середині підгруп чорних чи кольорових металів. Лабораторний аналіз не завжди прийнятний, а вихрострумний метод можна використовувати для побудови пристроїв експрес-тесту типу металу, в геофізичних дослідженнях, археології та у військовій справі.

В сучасних системах задача виявлення та ідентифікації металевих об'єктів покладається цілком на оператора. Це потребує врахування людського фактору та призводить до значних суб'єктивних помилок під час ідентифікації матеріалу виявленого об'єкту.

Таким чином, актуальною є задача розроблення методів та засобів вихрострумного контролю включно з їх алгоритмічним і програмним забезпеченням, які здатні забезпечити ідентифікацію об'єктів з металу з високою вірогідністю.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в КПІ імені Ігоря Сікорського на кафедрах «Радіотехнічних пристроїв та систем»

радіотехнічного факультету та «Приладів і систем неруйнівного контролю» приладобудівного факультету, також виконано ініціативну науково-дослідну роботу «Дослідження можливості застосування кепстрального аналізу сигналів металошукача з метою дихотомічного визначення типу металу», номер державної реєстрації 0116U006188 (2016 рік).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є забезпечення ідентифікації металів всередині підгруп магнітних / немагнітних на основі удосконалення вихрострумowego методу контролю.

Відповідно до мети, *основними завданнями* дослідження є:

1. Аналіз сучасного стану методів ідентифікації металу у виробках з різними невідомим мас-габаритними характеристиками та обґрунтування вихрострумowego методу для реалізації цього завдання.

2. Розроблення вихрострумowych методів ідентифікації матеріалу металевих об'єктів за результатами аналізу інформаційних сигналів у часовій і частотній областях.

3. Обґрунтування та відбір сукупності інформативних ознак сигналів вихрострумowego контролю, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом в динамічному режимі.

4. Удосконалення вихрострумowego засобу, розроблення алгоритму його роботи та створення діючого макету засобу для перевірки ефективності запропонованих вихрострумowych методів ідентифікації матеріалу металевих об'єктів.

5. Створення бази образів металів за обраними сукупностями інформативних ознак сигналів.

6. Проведення експериментальних досліджень розроблених методів і засобу з ідентифікації матеріалу металевих об'єктів на обраній сукупності тестових зразків.

7. Впровадження результатів досліджень в практику вихрострумowego контролю для розв'язання завдання ідентифікації металів.

**Об'єктом дослідження** є процес ідентифікації матеріалу металевих виробів за сигналами неруйнівного контролю.

**Предметом дослідження** є вихрострумовой метод і засіб ідентифікації матеріалу металевих виробів.

**Методи дослідження.**

Поставлені в роботі задачі вирішувались на основі методів неруйнівного контролю, експериментальних досліджень, методів математичної статистики, спектрального аналізу та числового моделювання з використанням диференційного числення.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Основні результати роботи, які визначають її наукову новизну та виносяться на захист:

1. Вперше запропоновано вихрострумовой метод ідентифікації типу металу у виробках під час сканування ділянки простору з цими виробами вихрострумowym перетворювачем за результатами аналізу інформаційних сигналів у частотній області, що на відміну від відомих методів, дає змогу ідентифікувати метали в межах підгруп чорних та кольорових металів.

2. Вперше запропоновано вихрострумний метод ідентифікації типу металу у виробках під час сканування ділянки простору з цими виробами вихрострумним перетворювачем за результатами аналізу інформаційних сигналів у часовій області, який, на відміну від відомих, ґрунтується на заміні сигналів їх графічно-цифровими образами, що в ряді завдань забезпечує ідентифікацію металів з більшою достовірністю.

3. Вперше запропоновано нові для задачі виявлення та ідентифікації матеріалу металевих виробів сукупності інформативних ознак сигналів вихрострумного контролю, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом в динамічному режимі - екстремуми та переходи сигналу через нульовий рівень в часовій області, та площа під обвідною спектру та його смуга в спектральній області представлення сигналу, які є достатніми для достовірної ідентифікації металу виробу та дає змогу проводити ідентифікацію металів в межах підгруп чорних та кольорових металів в реальному часі.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Розроблено макет вихрострумної системи контролю та алгоритм її роботи, що дало змогу перевірити і підтвердити ефективність запропонованих методів ідентифікації металів за аналізом інформаційних сигналів у часовій і частотній областях.

2. Розроблено структуру вихрострумної адаптивної системи контролю, яка дає змогу дистанційно проводити ідентифікацію металу з якого виготовлений об'єкт, в тому числі прихований в діелектричному середовищі, в межах підгруп чорних та кольорових металів.

3. Експериментально досліджено сигнали відгуків від ряду кольорових та чорних металів, отриманих в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з металевими об'єктами, та створено бази їх образів у вигляді спектральних характеристик сигналів та їх графічно-цифрових образів, які можуть слугувати основою для створення нових систем ідентифікації металів та сплавів.

4. Закладено передумови для створення бази образів за обраними інформаційними ознаками не лише металів та сплавів, але й об'єктів, що виготовлені з декількох металів та мають складну геометричну форму, до прикладу, детонатори вибухових пристроїв.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в дослідницьку діяльність ЦНДІ ОВТ ЗСУ ДР 0117U00062д, а також в навчальний процес кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні положення і результати моделювання в дисертаційній роботі автором отримані самостійно. Особистий вклад автора полягає у тому, що автором написано 12 статей за темою дисертації.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [1] – огляд існуючих методів виявлення металів; [2] – проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку - радіолокаційно-вихрострумного метода; [3] – проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку - радіолокаційно-вихрострумного метода; [4] – розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для дихотомічного розрізнення металів (за ознакою магнітний / немагніт-

ний); [5] – розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації (РСБЛ) для розрізнення металів в спектральній області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів; [6] – розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в часовій області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів та запропоновано метод графічно-цифрових образів; [7] – розроблено алгоритм пошуку інформативних максимумів в сигналі для його нормування за тривалістю для зручності подальшої обробки; [8] – розроблено структурну схему РСБЛ на якій використані спектральний та метод графічно-цифрових образів; [9] – запропоновано створити базу даних образів металевих виробів, яку можна використовувати при розмінуванні територій; [10] – розглянуто фізичні ефекти та запропоновано пояснення причини виникнення сигналу контролю, який обробляється системою для ідентифікації металів; [11] – запропоновано математичну модель, що дозволяє отримати теоретичні сигнали, подібні до експериментально вимірних. Показано перспективи та подальші шляхи розвитку даного моделювання сигналів контролю відгуків від різних металів; [12] – здійснено порівняння розроблених методів обробки сигналу відгуку та показано можливості розроблених методів для ідентифікації металів при зашумленні сигналів відгуків; [16] – запропонована модифікована радіотехнічна система; [17] – здійснено огляд існуючих типів металодетекторів та вказано перспективні напрямки – створення радіотехнічної системи ближньої локації для виявлення металів; [20] – запропонована структурна схема радіолокаційно-вихрострумовевого радара; [22] – розроблено метод графічно-цифрових образів, що полягає у заміні сигналу в часовій області відповідними його графами амплітуд на основі РСБЛ; [25] – запропоновано використовувати метод лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів по сигналам РСБЛ; [29] – запропоновано в спектральній області нові інформативні ознаки: площу під обвідною та форму обвідної; [30] – запропоновано новий інформативний параметр  $K\%$  для розрізнення металів в часовій області по сигналам РСБЛ; [31] – запропоновано накопичення бази образів різних металевих виробів для їх аналізу радіотехнічною системою ближньої локації.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації і основні положення, отримані в роботі, представлялись на науково-технічній конференції "Фізика, електроніка, електротехніка" (м. Суми, 2013 р., 2014 р., 2015 р., 2017 р.); IV науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіоелектроніка в XXI столітті" (м. Київ, 2010 р.); V науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Радіоелектроніка в XXI столітті" (м. Київ, 2011 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи» (м. Київ, 2013 р., 2014 р., 2015 р., 2016 р., 2017 р. (дві доповіді), 2018 р. (дві доповіді)); V міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (м. Тернопіль, 2016 р.); IV міжнародній науково-практичній конференції: "Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки" (Київ, 2016 р.); V міжнародній науково-практичній конференції: "Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки" (Київ, 2017 р.); міжнародній нау-

ково-технічній конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ" (м. Львів, 2017 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані у 31 науковій праці, в тому числі 11 статей у фахових журналах (6 із них надруковані у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз: 3 статті у виданнях, що входять до бази Scopus, 2 статті – Web of Science та одна стаття – Index Copernicus) та 1 стаття в іноземному журналі країн ЄС, отримано 3 авторських свідоцтва, 16 тез доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 185 сторінок, з них 127 сторінок основного тексту, 57 рисунків, 27 таблиць і 2 додатки на 10 сторінках, список використаних джерел з 98 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** проведено обґрунтування актуальності тематики дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Також наведено список публікацій здобувача та апробацію результатів дисертації, показано структуру та обсяг дисертації.

В **першому розділі** розглянуто існуючі принципи побудови аналізаторів металів (хімічний, рентгено-флуоресцентний та оптико-емісійний) і вказано їхні недоліки, доцільність подальших досліджень та їх напрямки. Запропоновано використовувати вихрострумову систему контролю для аналізу металів та розробити методи обробки відбитого сигналу для створення нового типу аналізаторів металів.

Сформульовано постановку наукової задачі дослідження.

Для вирішення задачі виявлення та ідентифікації прихованих металевих об'єктів в діелектричних середовищах необхідно спочатку знайти об'єкт, а потім провести його аналіз в лабораторних умовах на спеціальних аналізаторах металів. Перший етап задачі здійснюється за допомогою металошукачів, а другий – аналіз, в лабораторних умовах.

Існує декілька методів такого аналізу. Найбільш розповсюджений хімічний метод, який побудований на розкладі досліджуваного матеріалу на атоми та молекули та подальшому дослідженню спектру отриманого від складових частин об'єкту. Це найбільш точний метод аналізу.

Зараз хімічний метод замінюється іншими, наприклад оптико-емісійним, рентгено-флуоресцентним та іншими методами. Недоліками згаданих методів є менша точність, великі часові затрати, а поверхня об'єкту, що аналізується, обов'язково повинна бути очищена від фарби та іржі. Ці методи потребують наявності зразка металу і не дозволяють визначити його склад дистанційно (безконтактно), без лабораторних досліджень.

Тому задача ідентифікації металевих предметів без їх ушкодження, в тому числі і прихованих в іншому діелектричному середовищі, є актуальною.

Такі методи виявлення металевих об'єктів вперше були використані для знаходження вибухонебезпечних предметів, мін за допомогою вихрострумів перетворювачів (ВСП), які аналізують сигнал вихрострумів контролю, який відбитий від прихованого об'єкту.

Інформацію про досліджуваній об'єкт можливо виявити в амплітуді, фазі чи частоті сигналу, прийнятого "антенною", причому, дуже часто, тільки один з цих параметрів є інформативний. Для виявлення та аналізу інформативного параметру у відбитому сигналі можна використовувати амплітудний, фазовий та частотний методи обробки сигналу. Однак всі відомі методи дозволяють проводити аналіз складу металу за ознакою магнітний / немагнітний метал.

У **другому розділі** для ідентифікації складу металу пропонується розроблена спеціалізована цифрова електронна система, яка забезпечує динамічне отримання сигналу вихрострумів контролю внаслідок неперервного переміщення антени над зразком.

В розробленій системі використовуються загальні принципи роботи типового вихрострумів пристрою - металошукача, які доопрацьовані під динамічне отримання сигналу вихрострумів контролю (рис.1, рис. 2). У дослідженнях використано металеві об'єкти різної форми, які співрозмірні із "антенною" системи (мінімальний зразок 10x10x1 мм та максимальний 80x80x5 мм) і лише для такого діапазону розмірів результати дисертаційного дослідження є коректними!

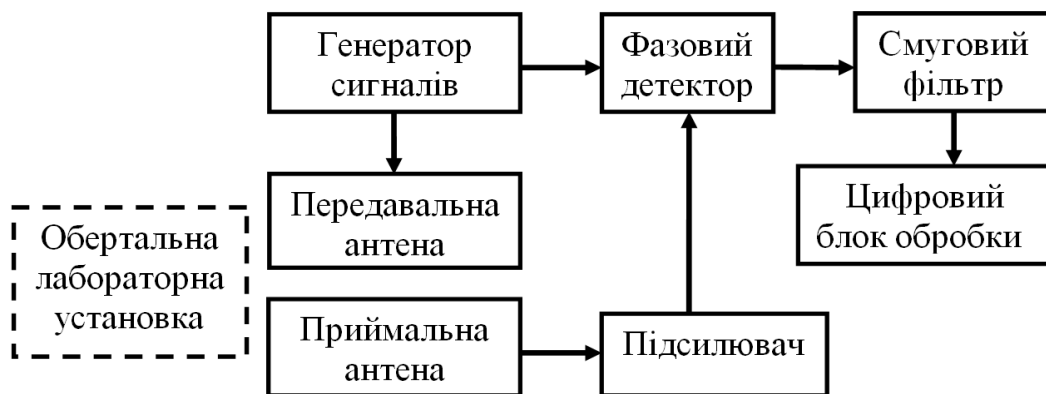


Рисунок 1 – Структурна схема розробленої вихрострумів системи

Відбитий сигнал (відгук) вихрострумів контролю, що виникає в результаті взаємодії випроміненого сигналу із металевим об'єктом несе інформацію, яка залежить від електричних та магнітних властивостей металу. Кожен метал має особливу фізичну природу і створює специфічний відбитий сигнал. Відбитий сигнал не є абсолютною характеристикою конкретного металу і залежить від ряду технічних факторів, що вимагають стабілізації траєкторії руху "антени" відносно об'єкта або навпаки - руху об'єкта відносно "антени". Тому у спроектованій експериментальній системі відбитий сигнал є його відносною характеристикою, яка стає абсолютною лише після порівняння різних металів і створення їх бази.

Так, амплітуда сигналу наведеного від сталі значно менша за амплітуду сигналу наведеного від міді, що пояснюється різними електричними та магнітними власти-



востями металів. Це призводить до необхідності *нормування сигналу за амплітудою*, для подальшої ідентифікації металів.

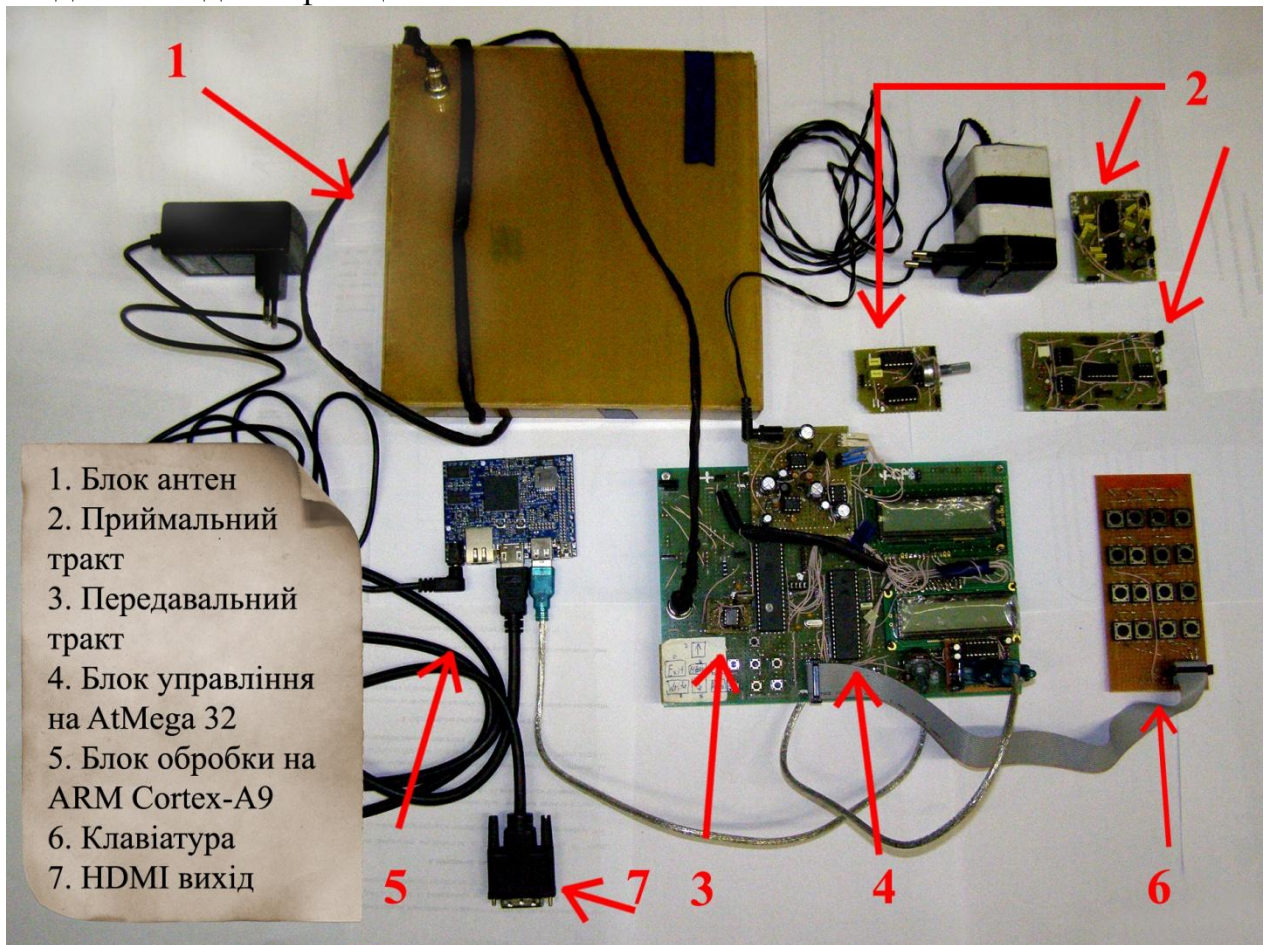


Рисунок 2 – Електронна частина розробленої системи

Тривалість сигналу залежить від швидкості проходу пошукової "антени" над металевим об'єктом, яка повинна бути однаковою на всьому етапі контролю, тому виникає необхідність *нормування сигналу за тривалістю*.

Було створено макет цифрової універсальної програмованої системи контролю для отримання оцифрованих сигналів для забезпечення можливості подальшої їх обробки, з метою визначення ознак при ідентифікації металів.

У **третьому розділі** розроблено методи для ідентифікації металів у спектральній області та у часовій, визначено інформативні ознаки, за якими можна створювати базу образів металів. Перевірена та підтверджена можливість застосування методу лінійного передбачення для ідентифікації металів. Вказано недоліки спектрального методу.

Сигнал контролю описується дійсною функцією, а гармонічний склад сигналу в частотній області описується перетворенням Фур'є. В роботі пропонується оцінювати параметри сигналу за його спектральними характеристиками.

Окрім спектрального методу для ідентифікації металів досліджено використання методу лінійного передбачення, який використовується при обробці мовних сигналів. В дисертації вперше показана можливість застосування методу лінійного передбачення до сигналів для ідентифікації металів.

Проведено аналіз сигналів у часовій області, розроблено алгоритм перетворення часових сигналів у відповідний їм графічно-цифровий образ.

Розроблено **метод графічно-цифрових образів**, який 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 апроксимуючі поліноми ділянок.

Часовий сигнал, отриманий експериментальною системою, перетворюється в графічно-цифровий образ, в якому неперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями, що відповідають екстремумам сигналу. Графічні образи мають більшу інформаційну насиченість, ніж часовий сигнал, оскільки їхні характерні лінії чітко розрізняються координатами, висотою та полярністю. Крім того, графічний образ доповнюється точками переходу сигналу через нульовий рівень.

Сигнал, отриманий від різних металів, має різне розташування екстремумів і нульових точок, тому за їх значеннями можна ідентифікувати тип металу, з якого виготовлено об'єкт. Для аналізу металів потрібно створити образ об'єкту з невідомого металу, розрахувати його коефіцієнти та порівняти їх з тими, що вже є в базі даних, та знайти відповідний образ, тим самим визначивши тип металу.

Відбитий нормований сигнал описується функцією  $U_{ВД}(t)$ , а гармонічний склад сигналу описується перетворенням Фур'є  $S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{ВД}(t)e^{-2\pi ift} dt$ . Як інформативну ознаку вибрано спектральну щільність  $S(f)$  сигналу  $U_{ВД}$  яка як і сам сигнал залежить від магнітної проникності металу (відносної або абсолютної)  $\mu_r$ ,  $\mu_a$  та електропровідності  $\sigma$ . Інформативними ознаками спектрів є площа спектру під обвідною та його ширина (за рівнем -40дБ).

Аналіз спектральних характеристик сигналів отриманих від сталі, дюралюмінію та міді, показав, що ширина спектру за рівнем -40дБ для сталі складає  $3,84 \pm 0,12 \dots 23,05 \pm 0,25$  Гц, дюралюмінію –  $6,45 \pm 0,11 \dots 28,13 \pm 0,22$  Гц, міді –  $6,72 \pm 0,08 \dots 27,48 \pm 0,16$  Гц а спектральні щільності сигналу відповідно –  $444,50 \pm 3,6$  дБ·Гц,  $551,30 \pm 4,6$  дБ·Гц,  $575,88 \pm 3,1$  дБ·Гц, тобто суттєво відрізняються одна від одної, що підтвердило можливість їх використання як інформативної ознаки.

Результати вимірів основних спектральних характеристик деяких металів наведені в табл. 1, а відсоткова різниця в параметрах в табл. 2.

Таблиця 1– Параметри спектральних характеристик дослідних зразків

Метал	Ширина спектру по рівню -40дБ (Гц)	Площа під обвідною спектру (дБ·Гц)
Золото 900 проба	$6,50 \pm 0,15 \dots 27,99 \pm 0,32$	$545,0 \pm 4,3$
Вісмут	$4,89 \pm 0,11 \dots 28,46 \pm 0,86$	$580,6 \pm 10,8$
Сталь та мідь, поруч	$7,54 \pm 0,29 \dots 26,02 \pm 0,32$	$493,42 \pm 4,2$

Сигнал контролю за формою та частотним діапазоном подібний до звукових сигналів, тому розглядалася можливість ідентифікації металів методом лінійного передбачення. Було встановлено, що його використання доцільне лише для дихотомічного поділу металів.

Таблиця 2 – Розрахована відсоткова різниця між міддю та іншими металами

Метали, що порівнюються	Різниця площ під обвідними	Різниця в смугах Частот
Мідь та золото	5,60 %	1,67 %
Мідь та вісмут	12,03 %	10,19 %

Форма сигналу контролю може бути охарактеризована в часовій області амплітудами екстремумів сигналу та точками переходу сигналу через нульовий рівень. Для пошуку їх числових значень необхідно апроксимувати сигнали різними методами, наприклад, кусково-лінійною, кусково – квадратичною, кусково – кубічною, методами фракталів та іншими. Використання вказаних методів апроксимації не доцільно через великі масиви оброблюваної інформації і є складними для апроксимаційних програм Matlab. Тому розроблено зручний для роботи метод апроксимації.

Ступінь полінома апроксимації  $n$  та кількість ділянок апроксимації  $N$  змінюється в залежності від складності сигналів і точності апроксимації. На кожній  $i$ -й ділянці задаємо  $m$  дискретних точок  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}$ , отриманих в експерименті, і запишемо поліном апроксимації  $i$ -ої ділянки

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

Розрахунки полінома (1) в дискретних точках представимо як матрицю:

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

Використаємо кусково-поліноміальну апроксимацію сигналу при мінімальній кількості ділянок апроксимації (максимальному значенні  $m$  на кожній ділянці). Найбільш простим є випадок  $n=m-1$ , при якому для розрахунку коефіцієнтів полінома (1) розв'язується система лінійних рівнянь

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

Однак, для великої кількості дискретних точок ( $m \geq 25$ ) система лінійних рівнянь (3) є некоректною і не може бути розв'язана стандартними методами. Тому застосуємо зменшення ступеня апроксимуючого полінома, внаслідок чого система лі-

нійних рівнянь виявляється несумісною і в матриці (4) кількість рядків значно перевищує кількість стовпців ( $m > n$ ). Введемо вектор  $F_0$  чисельних значень полінома (3) в дискретних точках і вектор  $Z$  невідомих коефіцієнтів полінома (3)

$$F_0 = \begin{bmatrix} P(x_{i,1}) \\ P(x_{i,2}) \\ \vdots \\ P(x_{i,m}) \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Тоді в матричній формі маємо систему лінійних рівнянь

$$A \cdot Z = F_0 \quad (5)$$

Система рівнянь (5) теж є несумісною. Для її розв'язку застосуємо алгоритм псевдорозв'язку для несумісних систем

$$A^T \cdot A \cdot Z = A^T \cdot F_0 \quad (6)$$

де  $-A^T$  транспонована матриця (4). Матричне рівняння (6) має розв'язок

$$Z = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot F_0 \quad (7)$$

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

$$Z_1 = \begin{bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \vdots \\ a_{n_1-1}^1 \end{bmatrix}; \quad Z_2 = \begin{bmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ \vdots \\ a_{n_2-1}^2 \end{bmatrix}; \dots \quad (8)$$

Розрахунок за всіма векторами  $Z_1, Z_2, \dots$  забезпечує збіг повної апроксимуючої кривої з заданою кривою часового сигналу.

Розроблений метод полягає в тому, що для апроксимованого сигналу визначаються екстремальні значення сигналу та точки переходу його через нуль, які потім перетворюються в характерні лінії, які відрізняються одна від одної координатами, висотою та полярністю. Апроксимовані поліноми ділянок:

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

Кожен поліном перетинає вісь абсцис у декількох точках (корені, нулі) і має декілька екстремумів (мінімумів, максимумів). Для пошуку коренів поліномів (9) існують стандартні програми, однак їх аналіз показав, що поліноми на окремих ділянках виявляються занадто складними для таких програм.

Тому для визначення координат екстремумів окремих ділянок пропонується розглядати похідні від поліномів (9)

$$\begin{aligned}\frac{dP_1(x)}{dx} &= a_2^1 + 2a_3^1x + \dots + (n_1)a_{n_1-2}^1x^{n_1-1}, \\ \frac{dP_2(x)}{dx} &= a_2^2 + 2a_3^2x + \dots + (n_2)a_{n_2-2}^2x^{n_2-1}, \\ &\vdots\end{aligned}\quad (10)$$

Для кожної ділянки розв'язується задача визначення коренів багаточленів:

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

Корені рівнянь (11) визначають розташування екстремумів на ділянці, а амплітуда нормованого часового сигналу у відповідних точках – їх висоту.

Часовий сигнал перетворюється в графічно-цифровий образ, в якому неперервний сигнал замінюється характерними лініями, що відповідають екстремумам сигналу. Крім того, графічний образ доповнюється точками переходу сигналу через нуль (рис. 3). В табл. 4 наведено характеристики графічно-цифрових образів деяких металів, що досліджувалися в даній роботі.

Таблиця 4 – Коефіцієнти графічно – цифрових образів для різних металів

Параметр	№п/п екстремуму						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Сталь 20</b>							
Амплітуда	0,3055	-0,9471	0,9461	-0,9007	0,9826	-0,5326	0,1844
Координати екстрем.	8	18	28	36	46	57	69
Координати нулів	12	23	32	41	52	65	
<b>Мідь електротехнічна</b>							
Амплітуда	-0.2551	0.8720	-0.9963	0.4949	-0.1403		
Координати екстрем.	7	18	29	41	52		
Координати нулів	11	23	36	49	56		
<b>Золото, 900 проба</b>							
Амплітуда	-0,272	0,8802	-0,9841	0,4997	-0,1554		
Координати екстрем.	8	18	28	40	51		
Координати нулів	11	23	35	48			

Для кожного зразка в стовпцях 1,2,... наведено значення і координати послідовностей екстремумів, а також координати точок проходження сигналу через нуль, які різні для різних металів. Тому для ідентифікації металу, з якого виготовлено об'єкт потрібно створити образ об'єкту невідомого металу, розрахувати його коефіцієнти та порівняти їх з тими, що вже є в базі даних.

Таким чином, метод графічно-цифрових образів дозволяє за числовими коефіцієнтами ідентифікувати тип металу навіть в обраній підгрупі.

У **четвертому розділі** описано методику проведення вимірювань та наведено результати розрізнення металів, які здійснені запропонованими методами.

Амплітуда сигналу контролю залежить від маси об'єкту, тому при дослідженні використовувалися амплітуди, приведені до маси об'єкту (питомі амплітуди). Питомі

ма амплітуда дозволяє порівнювати метали між собою, не прив'язуючись до їх розмірів.

Проведено порівняння відносної амплітуди з властивостями металів за відомою таблицею «як таблиця Менделєєва» та за теорією електронегативності Полінга-Бенсона, яка відображає властивості атомів зв'язаних між собою хімічними зв'язками. Аналіз металів, оцінених за відбитими сигналами показав, що їх властивості не відповідають властивостям цієї таблиці, але добре співпадають з новою таблицею, яку введено у використання міжнародною комісією в 1989 році.

Об'єкти контролю (металеві об'єкти) вибрані співрозмірними із "антенною системою" вихрострумowego пристрою (мінімальні розміри зразка –10x10x1 мм, а максимальні – 80x80x5 мм). Лише для такого базового діапазону розмірів ОК результати дисертаційного дослідження є коректними!

Для динамічного отримання сигналу контролю вихрострумовим пристроєм на основі приладу КД6-4 створено установку, що переміщує ОК над антенною системою в секторі 120 градусів. Зразок металу рухається над антенним блоком з ліва направо та з права наліво з рівномірною регульованою кутовою швидкістю (30...200 град./с). Час проходження сектора 750 мс. Довжина штанги  $L = 1$  м. Відстань від зразка до антени може змінюватися від 30 і до 120 мм. Зазвичай, якщо це не зазначено окремо – 60 мм.

Узагальнені результати експериментальних досліджень спектральним методом зведені в табл. 5 та табл. 6, а методом графічно-цифрових образів в табл. 7 та табл. 8. На рис. 2 наведено графічно-цифровий образ металу.

$M$ ,  $M_H$ ,  $M_B$ ,  $S$ ,  $S_H$ ,  $S_B$  – математичні очікування та середні квадратичні відхилення площі спектру, нижньої та верхньої частоти смуги сигналу.

Таблиця 5 – Спектральні характеристики магнітних металів

Метал	Ширина спектру по рівню -40дБ (Гц)	Площа під обвідною (дБ·Гц)
Сталь 20	$M_H = 3,84$ $S_H = 0,12$ $M_B = 23,06$ $S_B = 0,25$	$M = 444,50$ $S = 3,6$
Нікель	$M_H = 9,56$ $S_H = 0,11$ $M_B = 26,77$ $S_B = 0,18$	$M = 495,00$ $S = 4,5$

Таблиця 6 – Спектральні характеристики деяких металів

Метал	Ширина спектру по рівню -40дБ (Гц)	Площа під обвідною (дБ·Гц)
Мідь електротех.	$M_H = 6,72$ $S_H = 0,09$ $M_B = 27,48$ $S_B = 0,16$	$M = 575,91$ $S = 3,1$
Титан	$M_H = 7,44$ $S_H = 0,29$ $M_B = 27,84$ $S_B = 0,36$	$M = 537,66$ $S = 5,1$
Золото 900 проба	$M_H = 6,50$ $S_H = 0,15$ $M_B = 27,99$ $S_B = 0,32$	$M = 545,08$ $S = 4,3$
Сурма	Сигнал відсутній	Сигнал відсутній
Вісмут	$M_H = 4,89$ $S_H = 0,21$ $M_B = 28,46$ $S_B = 0,36$	$M = 580,62$ $S = 10,8$

Для інтегральної оцінки коефіцієнтів графічно-цифрових образів вводимо коефіцієнт  $K$  – відсоткову різницю між двома найбільшими першими екстремумами си-

гналу (для сигналів, подібних до сталі – беруться два від’ємні максимуми, а для сигналів, подібних до міді – беруться два позитивні найбільші максимуми).

Таблиця 7 – Коефіцієнти графічно-цифрових образів для сталі та нікелю

Параметр	№п/п екстремуму					
	1	2	3	4	5	6
<b>Сталь 20</b>						
Амплітуда, відн. один.	M=0,3178 S =0,0245	M=0,9238 S =0,0573	M=0,9143 S =0,0742	M=0,8224 S =0,0954	M=0,8336 S =0,1692	M=0,4636 S =0,0979
Координати екстремумів	M =8,000 S =0,6667	M=17,222 S =0,9162	M=26,888 S =1,4487	M=35,444 S =1,7069	M=44,777 S =1,6178	M=55,666 S =,2111
Координати нулів	M=11,666 S =0,9428	M=22,111 S =1,0999	M=31,222 S =1,5476	M=39,77 S =1,8725	M=0,888 S =1,6630	M=63,3333 S = 1,8257
<b>Нікель</b>						
Амплітуда, відн. один.	M=0,1593 S =0,0372	M=0,6750 S =0,0836	M=0,9032 S =0,0723	M=0,9375 S =0,0596	M=0,4941 S =0,0738	M=0,1904 S =0,0312
Координати екстремумів	M=5,500 S =0,5000	M=13,200 S =0,8718	M=21,600 S =1,4967	M=30,300 S =1,1874	M=40,700 S =1,2689	M=52,000 S =1,4142
Координати нулів	M=8,400 S =0,6633	M=16,900 S =0,9434	M=26,100 S =1,2207	M=36,200 S =1,2490	M=47,700 S =1,3450	M=58,900 S =1,5780

Розрахунок коефіцієнта  $K$  для табл. 7 здійснюється за двома найбільшими максимумами  $A_1$  та  $A_2$  (рис. 3). Для сталі  $K$  складає 11%, для нікелю –  $K=28\%$ .

$$A_1 > A_2 \quad ; \quad K = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100\%$$

Значення коефіцієнта  $K$  для різних металів наведені у табл. 8. Достовірність вимірів з вірогідністю 0,95 гарантує 100 проходжень кожного із зразків над антенним блоком.

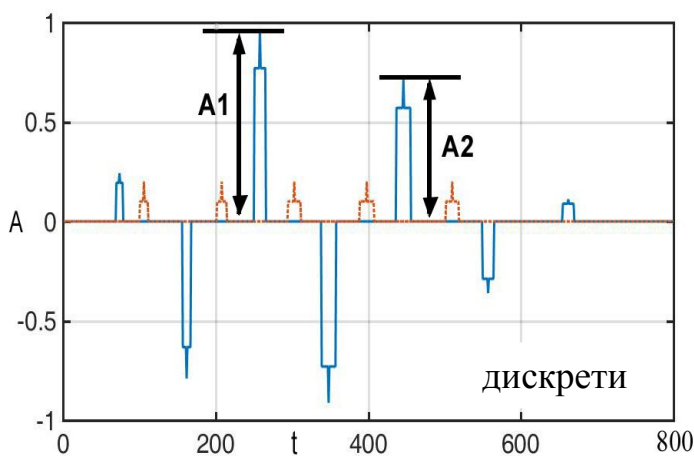


Рисунок 3 – Графічно-цифровий образ сталі

Для сигналу контролю, отриманого від різних об’єктів, доцільно фіксувати найбільші значення амплітуди. Зважаючи на те, що матеріали, з яких виготовлені об’єкти контролю, мають різну масу, при дослідженні використовувалися амплітуди, приведені до маси об’єкту (питомі амплітуди). Маса зразка впливає на амплітуду вихідного сигналу. Питома амплітуда дозволяє порівнювати метали між собою, не прив’язуючись до їх розмірів.

В табл. 9 наведено порівняння питомої амплітуди з властивостями металів за таблицею «Менделєєва» та теорією електронегативності Полінга-Бенсона.

Таблиця 8 – Значення коефіцієнта  $K$  для інтегральної оцінки графічно-цифрових образів різних металів

Назва зразка	Відсоткова різниця між двома максимумами $K, \%$	Полярність 1-го екстремуму
Сталь 20	$13,88 \pm 0,95$	+
Мідь електротехнічна	$43,99 \pm 0,35$	-
Срібло 9999 проба	$41,79 \pm 0,44$	-
Срібло 900 пр. рубль 1896р.	$44,66 \pm 0,37$	-
Срібло 900 пр. 50 копійок 1912р.	$44,81 \pm 0,43$	-
Титан	$51,10 \pm 0,67$	+
Золото 900пр	$43,22 \pm 0,32$	-
Свинець	$47,06 \pm 0,43$	-
Вісмут	$46,26 \pm 0,28$	+
Нікель	$37,89 \pm 0,39$	+

Так, для ряду металів (титан, залізо, мідь, алюміній) амплітуда сигналів зростає з номером групи у новій таблиці. 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 і тому їх амплітуди істотно відрізняються.

Вісмут зовсім випадає з наведених вище у таблиці закономірностей – він стоїть в таблиці «Менделєєва» в одному горизонтальному рядку праворуч із свинцем, але всупереч його положенню амплітуда відбитого від нього сигналу є на порядок меншою порівняно із амплітудою сигналу, отриманого від зразка свинцю.

Для сурми відсутність відбитого сигналу можна пояснити приналежністю її до іншого сімейства таблиці – металоїдів.

Система дозволяє по чергово проводити, як спектральний аналіз так і аналізувати сигнали в часовій області, а потім порівняти результати. Співпадіння результатів аналізу двома методами гарантує достовірність ідентифікації металу. В випадку коли результати різні, виводяться обидва результати ідентифікації і рішення приймає оператор системи.

Таблиця 9 – Відносні амплітуди сигналів, отриманих від різних металів

Метал	Відносна амплітуда	Електронегативність за Полінгом	Відстань від об'єкту (мм) до антени
Сталь 20	2,32	1,83	70
Мідь електротехн.	7,41	1,90	70
Срібло 868 проба	3,05	1,93	70
Дюралюміній	19,74	1,61	70
Титан	1,76	1,54	40
Вісмут	0,20	1,90	40
Свинець	2,52	1,80	40
Сурма	0,00	2,05	40
Нікель	10,49	1,91	40



Порівняння графічно-цифрових образів між собою та з записаними в базі даних складне завдання і його можна виконувати програмно алгоритмами штучного інтелекту (алгоритми нейронних мереж), що є метою подальших досліджень.

Таким чином, розглянуті методи дозволяють розрізнення металів в межах підгруп, тобто здійснення дистанційної ідентифікації металів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача з удосконалення вихрострумowego методу контролю для ідентифікації металевих предметів. Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведено огляд існуючих найбільш поширених методів (рентгенофлуоресцентний, оптико-емісійний та хімічний) ідентифікації металів та вказано їхні недоліки – вони є лабораторними. Сформульовано подальший напрям досліджень, що полягає у використанні альтернативного напрямку – вихрострумowego.

Запропонований новий динамічний метод визначення типу металів на основі вихрових струмів, який дозволяє дистанційно та оперативно визначати тип металу. Що на відміну від хімічного, рентгенівського та опто-емісійного, дозволяє аналізувати склад досліджуваних об'єктів без пошкодження поверхні об'єкту (зачищення, шліфування, тощо). Аналіз відбувається швидко завдяки використанню сучасних цифрових технологій.

2. Створено робочий лабораторний макет та система обробки отриманих сигналів, яка використовує обробку сигналу в часовій області (метод графічних образів) та спектральній (спектральний метод обробки) – це розширило функціональні можливості вихрострумowych пристроїв, збільшено номенклатуру типів металів, які можна ідентифікувати.

3. Вперше показано, що аналіз 5-ти інформативних ознак в характеристиках сигналу, отриманого в результаті взаємодії зондувального електромагнітного поля з прихованим металевим об'єктом таких, як – форма сигналу, екстремальні значення сигналу в часовій області (мінімуми та максимуми) та переходи сигналу через нульовий рівень, площа під обвідною спектру та смуга сигналу, дозволяє дистанційно розрізняти метали. Застосування методу вихрових струмів дозволило спростити процес ідентифікації металів, адже метал досліджується дистанційно і не пошкоджується.

– Показано, що спектральний метод дозволяє ідентифікувати тип металу, оскільки існує різниця в характеристиках спектрів сигналів отриманих від різних металів. Завдання ідентифікації металів зводиться до визначення попадання спектрів еталонних зразків в отриманий спектр. Показано, що спектральний метод може бути використаний і в випадку, коли два об'єкти знаходяться у безпосередній близькості один від одного. Співвідношення між площами виміряного та еталонних спектрів вказує на відсотковий вміст конкретних металів.

– Вперше запропоновано та розроблено метод часового аналізу сигналу, побудованого на заміні сигналу графічно-цифровими образами. Часовий сигнал, отриманий системою, оцифровується і перетворюється в графічний образ, в якому безперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями, які відрізняються координатами

тами, висотою і полярністю та пов'язані з екстремумами сигналу та переходом його через нуль. Запропонований метод дозволяє сигнал представити як діаграму із інформативних ознак, яка для різних металів є різною, а це дозволяє провести ідентифікацію металу за результатами її порівняння з попередньо записаними даними.

4. За допомогою системи контролю проведені експериментальні дослідження бази сигналів більше чим від 10-ти типів металів із складу підгруп чорних та кольорових металів. Накопичена база сигналів від металів дозволила запропонувати як інформативний параметр, поняття відносної амплітуди (амплітуди отриманого сигналу, приведеної до маси об'єкту). Використання цього поняття дозволило встановити, що електромагнітний сигнал, який реєструється приймальною "антенною", не відбивається від поверхні прихованого металу, а проникає в середину металевого об'єкту і взаємодіє зі всією масою зразка. Це дозволило у відповідності до теорії про електронегативність Бенсона–Полінга розподілити метали за групами, які співпадають із «новою» таблицею хімічних елементів, що запроваджена у 1989 р. міжнародною комісією на заміну традиційній таблиці «Менделєєва».

5. Поєднання результатів спектрального методу та методу графічно-цифрових образів дозволяє створювати базу образів еталонних сигналів, необхідну для аналізу металевих об'єктів як узагальнений образ. Ідентифікація типу металу відбувається з імовірністю більше 0,9.

6. Працездатність розробленого динамічного методу підтверджена діючим макетом. Розроблена та експериментально перевірена методика проведення вимірювань параметрів для спектрального та часового методів.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також в дослідницьку діяльність ЦНДІ ОВТ ЗСУ ДР 0117U00062д.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Абрамович А. О. Металодетектори / А. О. Абрамович, С. М. Дяченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ.– 2011. – Вип. №46. – С. 186-193. *Здобувачем виконано огляд існуючих методів виявлення металів.*

2. Абрамович А. О. Радіолокаційно-вихрострумний радар / А. О. Абрамович // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ.– 2014. – Вип. №57. – С. 77-82. *Здобувачем проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку - радіолокаційно-вихрострумного метода.*

3. Правда В. І. Георадари / В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович // Вісник національного університету "Львівська політехніка", Серія : радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів.– 2015. – № 818. – С. 49-54. (**Index Copernicus**). *Здобувачем проведено огляд існуючих георадарів та вказано перспективні напрями їх подальшого розвитку - радіолокаційно-вихрострумний метод.*

4. Абрамович А. О. Дихотомічне розрізнення металу на чорний-кольоровий за допомогою спектрального аналізу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. Ю. Фурманчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер:

Технічні науки. – Житомир.– 2017. – Вип. №1(79). – С. 48-51. *Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для дихотомічного розрізнення металів (за ознакою магнітний / немагнітний).*

5. 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.– Kharkiv.– 2017. – Vol. 89 (No. 5). – P. 51-57 (**Scopus**) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177>. *Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в спектральній області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів.*

6. Абрамович А. О. Дистанційний вихорострумний аналіз складу металевих об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський // Міжнародний науково-технічний журнал «Металлофізика и новейшие технологии». – Київ – 2017. – Том 39. – Вип. №8. – С. 1035-1049. (**Scopus**) URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html>. *Здобувачем розроблено інформативні ознаки у сигналі радіотехнічної системи ближньої локації для розрізнення металів в часовій області в середині підгруп немагнітних та магнітних металів та запропоновано метод графічно-цифрових образів.*

7. Abramovych A. O. Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them / A. O. Abramovych, V. O. Poddubny // Вісник Тернопільського національного технічного університету. Серія: Технічні науки. – Тернопіль. – 2017. – Випуск 86 (№2). – P.76-83. *Здобувачем розроблено алгоритм пошуку інформативних максимумів в сигналі для його нормування за тривалістю для зручності подальшої обробки.*

8. Абрамович А. О. Метод обробки відбитих сигналів вихорострумних імпульсних перетворювачів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський // Науковий вісник Запорізького національного технічного університету, Радіоелектроніка, інформатика, управління.– Запоріжжя. – 2017. – Вип. №4. – С.7-14. (**Web of science**) DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1>. *Здобувачем розроблено структурну схему РСБЛ на якій використані спектральний та метод графічно-цифрових образів.*

9. Абрамович А. О. Вихорострумний пристрій з базою даних образів для ідентифікації типів металів прихованих об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, О. М. Гусяков // Науково технічний журнал "Озброєння та військова техніка". – Київ. – 2017. – №3(15). – С. 51-56. *Здобувачем запропоновано створити базу даних образів металевих виробів, яку можна використовувати при розмінванні території.*

10. 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 // Науковий вісник Запорізького національного технічного університету, Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя. – 2020. – Вип. №1. – С.7-17. (**Web of science**) DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-1>. *Здобувачем розглянуто фізичні ефекти та запропоновано пояснення причини виникнення сигналу контролю, який обробляється системою для ідентифікації металів.*

11. Абрамович А.О. Вихорструмовий амплітудно-фазовий метод ідентифікації провідних (металевих) об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Міжнародний науково-технічний журнал «Металофізика та новітні технології». – Київ. – 2020. – Том 42. – Вип. №8. – С. 1169-1185. (Scopus) URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v42/i08/1169.html>. *Здобувачем запропоновано математичну модель, що дозволяє отримати теоретичні сигнали, подібні до експериментально виміряних. Показано перспективи та подальші шляхи розвитку даного моделювання сигналів контролю відгуків від різних металів.*

12. Абрамович А.А. Вихретоковая система идентификации металлических объектов / А.А. Абрамович, В.Г. Баженов, В.А. Поддубный // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic. – 2020. – Vol 1. – №56. – р. 44-53. (країна ЄС **IndexCopernicus**). *Здобувачем здійснено порівняння розроблених методів обробки сигналу відгуку. Показано можливості розроблених методів для ідентифікації металів при зашумленні сигналів відгуків.*

13. Авторське свідоцтво. № 70479 Метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі / А. О. Абрамович; заявк. 22.12.2016, опубліковано 16.02.2017 Державна служба інтелектуальної власності України. *Здобувачем запропоновано метод виявлення металевих предметів у діелектричному середовищі на основі поєднання радіолокаційного та вихорструмового методу обробки сигналу.*

14. Авторське свідоцтво. № 70945 Спосіб розрізнення металів на чорні та кольорові з використанням коефіцієнтів лінійного передбачення за даними металошукача на основі вихрових струмів: / А. О. Абрамович, С. Я. Жук; заявк. 24.01.2017, опубліковано 16.03.2017 Державна служба інтелектуальної власності України. *Здобувачем запропоновано використання методу лінійного передбачення для розрізнення металів за ознакою магнітний / немагнітний по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.*

15. Авторське свідоцтво. № 73585 Часовий метод виявлення металевих об'єктів у діелектричному середовищі / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський; заявк подано. 20.06.2017, опубліковано 28.08.2017 Державна служба інтелектуальної власності України. *Здобувачем запропоновано метод графічно-цифрових образів для розрізнення металів в часовій області по сигналам РСБЛ.*

16. Абрамович А. О. Модифікована радіотехнічна система ближньої локації для ідентифікації прихованих металів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 176-178. *Здобувачем запропонована модифікована РСБЛ.*

17. Абрамович А. О. Металодетектори / А. О. Абрамович, С. М. Дяченко // Матеріали V науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіоелектроніка в ХХІ столітті». – Київ. – 2011. – С. 140-141. *Здобувачем здійснено огляд існуючих типів металодетекторів та вказано перспективні напрямки – створення радіотехнічної системи ближньої локації для виявлення металів.*

18. Абрамович А. О. Вибрані аспекти математичної обробки сигналів георадарів / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково – технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2013. – С. 111-112.

19. Абрамович А. О. Радіолокаційно – вихрострумний метод обробки сигналів георадарів / А. О. Абрамович // Матеріали науково – технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми.– 2013. – С. 148.

20. Абрамович А. О. Радіолокаційно – вихрострумний метод виявлення металів / А. О. Абрамович, І. О. Товкач // Матеріали науково – технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми.– 2014. – С. 167. *Здобувачем запропонована структурна схема радіолокаційно-вихрострумного радара.*

21. Абрамович А. О. Георадар для пошуку та класифікації металів / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково – технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2014. – С. 144-146.

22. Абрамович А. О. Метод графічних образів в радіотехнічній системі ближньої локації / А. О. Абрамович, І. С. Каширський, В. О. Піддубний // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2018. – С. 173-175. *Здобувачем розроблено метод графічно-цифрових образів, що полягає у заміні сигналу в часовій області відповідними його графами амплітуд на основі радіотехнічної системи ближньої локації.*

23. Абрамович А. О. Класифікаційна ознака у сигналі георадара, що дозволяє розрізнити конкретний тип металу / А. О. Абрамович // Матеріали міжнародної науково – технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2015. – С. 142-144.

24. Абрамович А. О. Виявлення в сигналі георадара класифікаційних ознак для розрізнення кольорових металів / А. О. Абрамович // Матеріали науково – технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми.– 2015. – С. 154

25. Абрамович А. О. Экспериментальное исследование возможности дихотомического различия черных и цветных металлов по данным металлоискателя на основе вихревых токов методом линейного предсказания / А. О. Абрамович, С. Я. Жук, О. Д. Мрачковский // Матеріали міжнародної науково – технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2016. – С. 14-16. *Здобувачем запропоновано використовувати метод лінійного передбачення для дихотомічного розрізнення металів по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.*

26. Абрамович А. О. Розпізнавання металевих об'єктів за допомогою аналізу сигналу металошукача в часовій області / А. О. Абрамович // Матеріали V міжнародної науково – технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – Тернопіль. – 2016. – С. 92-93.

27. Абрамович А. О. Розрізнення образів металевих об'єктів за допомогою спектрально – часового аналізу сигналу вихрострумного металошукача / А. О. Абрамович // Матеріали IV міжнародної науково – практичної конференції: "Проблеми координації військово – технічної та оборонно – промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки". – Київ. – 2016. – С. 57.

28. Абрамович А. О. Нормування сигналу металоаналізатора для застосування методу лінійного передбачення / А. О. Абрамович // Матеріали науково – технічної конференції "Фізика, електроніка, електротехніка". – Суми. – 2017. – С. 137.

29. Абрамович А. О. Вихрострумний металошукач із спектральною обробкою сигналу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. О. Піддубний // Матеріали між-

народної науково – технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14-16. *Здобувачем запропоновано в спектральній області нові інформативні ознаки: площу під обвідною та форму обвідної.*

30. Абрамович А. О. Распознавание металлических объектов с помощью анализа временных сигналов / А. О. Абрамович, І. С. Каширський, О. Д. Мрачковський // Матеріали міжнародної науково – технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». – Київ. – 2017. – С. 14-16. *Здобувачем запропоновано новий інформативний параметр  $K\%$  для розрізнення металів в часовій області по сигналам радіотехнічної системи ближньої локації.*

31. Абрамович А. О. Накопичення бази даних образів про металеві предмети, як метод підвищення ефективності металошукачів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, С. А. Цибуля // Матеріали міжнародної науково – технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ". – Львів. – 2017. – С. 256-257. *Здобувачем запропоновано накопичення бази образів різних металевих виробів для їх аналізу радіотехнічною системою ближньої локації.*

### АНОТАЦІЯ

**Абрамович А.О. Удосконалення вихрострумowego методу контролю для ідентифікації металевих предметів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовини – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

У дисертаційній роботі удосконалено вихрострумовой метод ідентифікації матеріалу металевих виробів шляхом динамічного методу отримання вихрострумowych сигналів, і крім того, завдяки запропонованим та використаним методам його обробки: спектральним методом, методом лінійного передбачення та методом графічно-цифрових образів.

Показано, що спектральний метод та метод графічно-цифрових образів, що використовують узагальнений образ об'єкту контролю, дозволяють ідентифікувати метали в середині підгруп чорних та кольорових металів, а метод лінійного передбачення дозволяє лише ідентифікувати метали як чорний чи кольоровий. Аналіз ефективності алгоритмів обробки сигналів проведений шляхом моделювання на ЕОМ та експериментальних досліджень металевих об'єктів за допомогою розробленого діючого макета вихрострумовой системи динамічного контролю показав вірну ідентифікацію металів.

**Ключові слова:** ідентифікація металів, динамічна вихрострумова система контролю, спектральний метод, метод лінійного передбачення, метод графічно-цифрових образів.

### АНОТАЦІЯ

**Абрамович А.А. Совершенствование вихретокового метода контроля для идентификации металлических предметов.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава вещества – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2021.

В диссертационной работе усовершенствован вихретоковый метод идентификации материала металлических изделий путем динамического метода получения вихретоковых сигналов, и кроме того, благодаря предложенным и использованным методам его обработки: спектральным методом, методом линейного предсказания и методом графически-цифровых образов.

Показано, что спектральный метод и метод графически-цифровых образов, используют обобщенный образ объекта контроля, позволяющие идентифицировать металлы в середине подгрупп черных и цветных металлов, а метод линейного предсказания позволяет только идентифицировать металлы как черный или цветной. Анализ эффективности алгоритмов обработки сигналов проведен путем моделирования на ЭВМ и экспериментальных исследований металлических объектов с помощью разработанного действующего макета вихретоковой системы динамического контроля показал верную идентификацию металлов.

**Ключевые слова:** идентификация металлов, анализ металлов, вихретоковая система ближней локации, спектральный метод, метод линейного предсказания, метод графически-цифровых образов.

## SUMMARY

**Abramovych A.O. Improving the eddy-current control method for the identification of metal objects. - On the rights of the manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.11.13 – Devices and methods of control and determination of substance composition – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

Today, in various fields of science, technology, inspection and military affairs, there is a need to detect and identify metal objects. This is related to the search for explosive metal objects, communications, identification of the metal from which the unknown object is made, identification of found nuggets, including hidden ones. To search, use electronic devices (metal detectors), built on the registration of differences in electrical and magnetic properties of hidden objects and the environment in which they are located. Such devices, in addition to searching, carry out preliminary identification of the metal. They determine which subgroup the metal belongs to - ferrous or non-ferrous metals. Metal detectors, which are an eddy current system for detecting metal objects, perform dichotomous analysis of metals, divide them into two large subgroups (black, colored) and do not provide the ability to identify metal within subgroups, but can not distinguish gold from aluminum or copper, nickel from steel etc.

Final identification is performed by laboratory analysis of the composition of a metal object, which uses chemical, X-ray fluorescence or opto-emission methods. They require a metal sample and do not allow it to be identified remotely (contactless). In addition, the surface of the analyzed object must be cleaned of contaminants. For these reasons, laboratory analysis is not always acceptable. In cases where it is not necessary to establish the

chemical composition of the metal object, but only to identify the metal from which the object is made, other methods can be used. One such method, after some refinement, may be the eddy current method of detecting metal objects, which belongs to the electromagnetic methods of detecting metals in a dielectric medium.

In modern systems, the task of detecting and identifying metal objects rests entirely with the operator. This requires consideration of the human factor and leads to significant subjective errors in the identification of the material of the detected object.

The identification of composition of the metal, a developed specialized digital electronic system is proposed, which performs dynamic recording of the eddy current control signal.

The developed system uses the general principles of operation of a typical eddy current device - a metal detector, which are modified for dynamic removal of the eddy current control signal. The research uses metal objects of different shapes, which are commensurate with the "antenna" of the system (minimum sample 10x10x1 mm and maximum 80x80x5 mm) and only for this range of sizes the results of the dissertation research are correct!

The reflected signal (response) of the eddy current control, which arises as a result of the interaction of the emitted signal with the metal object, carries information that depends on the electrical and magnetic properties of the metal. Each metal has a special physical nature and creates a specific reflected signal. The reflected signal is not an absolute characteristic of a particular metal and depends on a number of technical factors that require normalization of the trajectory of the "antenna" relative to the object or vice versa - the movement of the object relative to the "antenna". Therefore, in the designed experimental system, the reflected signal is its relative characteristic, which becomes absolute only after comparing different metals and creating their base.

Thus, the task of developing methods and means of eddy current control, including their algorithmic and software, which are able to ensure the identification of objects made of metal with high probability.

The eddy-current method is improved in the dissertation for identification of materials from metals by a dynamic method of receiving eddy-current signals, which is based and used next methods of processing: a spectral method, a method of linear prediction and a method of graphical - digital images.

It is shown that the spectral method and the method of graphic-digital images, which use a generalized image of the object of control, allow to identify metals in the middle of subgroups of ferrous and nonferrous metals, and the method of linear prediction allows to identify metals as ferrous or nonferrous. The analysis of the efficiency of signal processing algorithms carried out by computer simulation and experimental studies of metal objects using the developed working model of the eddy current system of dynamic control showed the correct identification of metals.

**Key words:** identification of metals, analysis of metals, eddy current control system, spectral method, linear prediction method, method of graphical and digital images.