

**Оптимізація швидкості сканування вихрострумовеого ідентифікатора металів**

Розглядаються результати ідентифікації металевих об'єктів вихрострумовою радіотехнічною системою (РС) з амплітудно-фазовим детектуванням сигналу відгуку при їх динамічному скануванні. Розроблено математичну модель, яка описує зміни інформаційних критеріїв сигналу відгуку залежно від матеріалу досліджуваних металевих об'єктів та швидкості лінійного переміщення їх відносно антени РС. Проведено моделювання сигналів відгуку для декількох металів та наведено порівняння із отриманими експериментальними результатами. Визначено оптимальний діапазон швидкостей сканування, який дозволяє отримати максимальну кореляційну різницю інформаційних критеріїв для різних металів, яка записується у запам'ятовувальній пристрій і використовується для подальшої ідентифікації невідомих провідних (металевих) об'єктів.

Запропонована математична модель сигналу відгуку вихрострумовеого пристрою з фазовим детектором та інтегрально-диференціальний підхід до визначення кореляційної різниці інформаційних критеріїв спектрального та графічно-цифрового методів ідентифікації металевих об'єктів дозволила експериментально визначити діапазон оптимальної швидкості руху металевого об'єкта відносно антенної системи. Отримані експериментальні результати показали, що максимум кореляційної різниці інформаційних параметрів запропонованої радіотехнічної системи лежить у діапазоні 12–14 Гц, що відповідає діапазону лінійних швидкостей 4–6 м/с.

**Ключові слова:** електромагнітні властивості металів; вихрострумовеий перетворювач; дистанційна ідентифікація металів; математичне моделювання; амплітудно-фазовий метод реєстрації сигналів.

**Актуальність теми.** Для розв'язання задачі дистанційної ідентифікації провідних (металевих) об'єктів використовуються різні методи, зокрема, рентгенівський, оптико-емісійний, вихрострумовеий [1]. Достатньо ефективним є використання запропонованої в [2] радіотехнічної системи (РС), в основі якої лежить вихрострумовеий метод виявлення металевих об'єктів [3].

Питанням формування сигналів вихрострумовеих радіотехнічних систем присвячено ряд робіт [3–5], але вони повною мірою не пояснюють виникнення та форму сигналу відгуку, отриманого в результаті зондування досліджуваного металевого об'єкта.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Зокрема, аспектам ідентифікації металів присвячено публікації К.Брушіні [3], А.Ю. Гриньова [4] та модель, взята з теорії неруйнівного контролю [5]. Однак ні одна з них повною мірою не пояснює виникнення сигналу та не відображає інформаційні ознаки, які характеризують відмінності металів і які закладені в формі сигналу відгуку.

**Метою статті** є дослідження потенційних можливостей вихрострумовеого ідентифікатора металів, завдяки визначенню оптимальної швидкості сканування для зростання ефективності його роботи.

**Викладення основного матеріалу.** Задача дистанційної ідентифікації металів за типом завжди цікавила науковців та практиків. Для розв'язання цієї задачі найчастіше використовується хімічний метод аналізу, рентгенофлуоресцентний та оптико-емісійний, але для їх використання необхідно мати металевий зразок для проведення лабораторних досліджень, хімічні реактиви та відповідне обладнання [1]. Такими способами неможливо дистанційно визначити метал, з якого виготовлений об'єкт. Проте існує метод, що побудований на взаємодії електромагнітного випромінювання антени з металевим об'єктом (вихрострумовеий), який дозволяє дистанційно визначити метал, з якого виготовлений об'єкт. В основі методу лежить явище збудження на поверхні досліджуваного металу вихрових струмів, але існуюча модель [5] не пояснює повною мірою виникнення сигналу-відгуку, який характеризує конкретний тип металу.

Покажемо, що відмінності залежать від електромагнітних характеристик металу. Для цього скористаємося моделлю, яка описана в [5]. У цій моделі напруга на виході приймальної антени вихрострумовеого перетворювача  $U_{ВД}$  визначається електромагнітними властивостями досліджуваного об'єкта контролю (ОК) та параметрами антенної системи:

$$U_{ВД}(x, t) = j\omega \mu_0 \pi N_D N_3 R_D \operatorname{Im} \cos(\omega t) \cdot \int_0^{\infty} \varphi_1(x, \beta) J_1(x R_{3*}) J_1(x) e^{-x h_*} dx \quad (3.2), \quad (1)$$

де  $N_D, N_3$  – кількість витків у приймальній та передавальній антенах рамочного типу;  $J_1$  – функція Бесселя першого роду першого порядку;  $\lambda$  – параметр інтегрального перетворення;  $R_D$  – радіус приймальної антени;  $R_3$  – радіус передавальної антени;

$$h_* = \frac{h_3 + h_D}{R_3}; \quad R_{3*} = \frac{R_D}{R_3}. \quad (2)$$

де  $h_3$  – висота передавальної антени,  $h_D$  – висота приймальної антени.

Тобто, величина наведеного в приймальній антені сигналу залежить від параметрів антенної системи. В нашому випадку антенна система мала такі геометричні розміри:  $R_3 = 80$  мм,  $R_D = 40$  мм,  $h_3 = 5$  мм,  $h_D = 5$  мм та  $N_3 = 85$ ,  $N_D = 280$ ,  $x = \lambda R_3$ .

У цій моделі введена функція впливу  $\Phi_1(x, \beta)$  [6, 7], яка враховує електричні та магнітні властивості металів, і може бути використана для оцінки відмінностей в сигналах, отриманих для різних металів.

$$\Phi_1(x, \beta) = \frac{\mu_r - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{\mu_r + \sqrt{x^2 + j\beta^2}}, \quad (3)$$

де  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність,  $x = \lambda R_3$ ,  $\lambda$  – параметр інтегрування [1/м],  $\beta = R_3 \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ ,  $\sigma$  – електропровідність металу,  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність.

Для прикладу, покажемо різницю в значеннях функції для сталі 20, нікелю, свинцю та електротехнічної міді. Як відомо, відносна магнітна проникність сталі  $\mu_r = 100$ , міді  $\mu_r = 1$ , нікелю  $\mu_r = 100 \dots 600$  (візьмемо 100), свинцю  $\mu_r = 1$ , провідність сталі  $\sigma = 7,69 \cdot 10^6$  См/м, міді  $\sigma = 58,1 \cdot 10^6$  См/м, нікелю  $\sigma = 11,5 \cdot 10^6$  См/м, а свинцю  $\sigma = 4,81 \cdot 10^6$  См/м. Розраховані значення функції впливу  $\Phi_1(x, \beta)$  для різних металів приведені нижче:

$$|\Phi_{1\text{сталь}}(x, \beta)| = 0,802, |\Phi_{1\text{нікель}}(x, \beta)| = 0,833, |\Phi_{1\text{мідь}}(x, \beta)| = 0,992, |\Phi_{1\text{свинць}}(x, \beta)| = 0,972.$$

Різниця між функціями впливу для міді та сталі становить більше ніж 19,0 %, а міді та нікелю – більше за 16,0 %. Це дозволяє за значенням напруги  $U_{ВД}$  та її зміною в часі ідентифікувати метал, з якого виготовлений ОК. Інформацію про матеріал металевого ОК несе також фазовий зсув між зондувальним та сигналом, що наводиться в приймальній антені. В [8, 9] пропонується використовувати спектральні характеристики сигналу відгуку, а в [2, 10] метод графічно-цифрових образів, що дозволяє аналізувати сигнал в часовій області.

Розглянемо структурну схему модифікованої РС (рис. 1). Вона побудована на основі схемотехнічних рішень вхідних каскадів, які використовуються в металошукачах (генератор зондувального сигналу, вихідний підсилювач, малошумний вхідний підсилювач наведеного в приймальній антені сигналу, фазовий детектор) [3], та мікроконтролера. РС для дослідження впливу швидкості переміщення досліджуваного об'єкта відносно антенної системи (динамічного вимірювання сигналу відгуку) на форму сигналу відгуку в своєму складі має обертальну установку, до дозволяє змінювати швидкість цього переміщення.

РС складається з антенної системи (передавальна та приймальна антени) та електронного блоку, що містить генератор зондувального сигналу, підсилювач сигналу відгуку, фазовий детектор, смуговий фільтр та цифровий блок обробки, який забезпечує ідентифікацію матеріалу металевого об'єкта за допомогою методів графічно-цифрових образів та спектрального [3].



Рис. 1. Структурна схема розробленої вихрострумової системи

Сигнал відгуку, що виникає в результаті взаємодії випроміненого передавальною антеною сигналу із металевим об'єктом, несе інформацію, що залежить від його електричних та магнітних властивостей, і на основі яких формується специфічний для конкретного металу сигнал відгуку. Цей сигнал не є абсолютною характеристикою конкретного металу, а залежить від ряду технічних параметрів РС, таких як швидкість та стабільність відносного переміщення ОК та антенної системи. Тому, виникає необхідність врахування цих параметрів та стабілізації траєкторії руху антени відносно об'єкта. Для цього розроблена оберտальна лабораторна установка, яка дозволяє змінювати відносну швидкість переміщення металевих зразків та антени у паралельній антені площині в діапазоні від 2 до 8 м/с. Без фіксації цих параметрів відбитий сигнал є відносною характеристикою металу, яка стає абсолютною лише після порівняння сигналів відгуку від різних металів, знятих при однаковій відносній швидкості переміщення, і створення бази сигналів, що необхідна для їх взаємного порівняння.

Сигнал на вході фазового детектора, який є основним елементом РС, що формує досліджуваний сигнал, залежить від положення ОК відносно антенної системи, магнітної проникності та електропровідності металу.

$$U_3 = f[U_{ВД}(x, \mu_r, \sigma)] \quad (4)$$

За відсутності ОК в зоні дії антенної системи на приймальну антену від передавальної наводиться сигнал частотою  $\omega$ . Миттєве значення напруги у приймальній антені буде  $U_{03} = U_{03\max} \cos(\omega t)$ , де  $U_{03\max}$  – амплітуда сигналу в приймальній антені.

Якщо металевий ОК рухається паралельно антенній системі та перетинає її вздовж осі, що проходить через центр системи, то на виході приймальної антени виникає сигнал, який відносно зондувального змінюється за фазою та амплітудою. Рух ОК відбувається з постійною швидкістю, що закладено в конструкції обертальної установки РС. Тому будемо вважати, що в першому наближенні закон зміни фази та амплітуди від часу – лінійний, а рух ОК – рівномірний. При переміщенні ОК відносно антени відбувається зміна амплітуди сигналу та фазова модуляція сигналу (зміна фази наведеного сигналу).

Зміна амплітуди сигналу пропорційна лінійній швидкості переміщення ОК. Миттєве значення амплітуди коливання, що наводиться в приймальній антені матиме вигляд:

$$U_{13} = U_{130} \cos\left(\frac{V}{L}t\right) \cos(\omega t), \quad (5)$$

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

Крім амплітудної, відбувається і фазова модуляція сигналу. Фаза змінюється від мінімального до максимального значення, які визначаються властивостями металу, з якого виготовлено ОК. Тому, із урахуванням відносного переміщення, миттєве значення сигналу в приймальній антені може бути:

$$U_3 = U_{130} \cos\left(\frac{V}{L}t\right) \cos(\omega t + \varphi(t)), \quad (6)$$

де  $\varphi(t) = \varphi_{\text{поч}} + \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{\text{max}}}t$ ,  $\varphi_{\text{поч}}$  – початкове значення зсуву фази,  $\varphi_{\text{max}}$  – максимальне значення зсуву початкової фази,  $\Delta\varphi$  – крок зміни початкової фази.

Сигнал  $U_3$  подається на вхід синхронного детектора (рис. 2) [11], на виході якого виникає сигнал, пропорційний фазовому зсуву між опорним (зондувальним) сигналом та сигналом, наведеним в приймальній антені.

Сигнал на виході синхронного фазового детектора  $U_a$  пропорційний характеру зміни фази:

$$U_a = \begin{cases} 0 & f_3 \neq f_{\text{опор}} \\ \frac{1}{2} U_3 \cos\varphi & f_3 = f_{\text{опор}} \end{cases}, \quad (7)$$

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

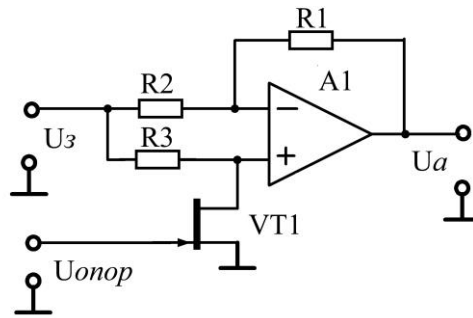


Рис. 2. Схема синхронного фазового детектора [11]

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

Моделювання сигналу за запропонованою методикою в пакеті прикладних програм Матлаб [12] дозволило сформувати сигнали, близькі за формою до експериментально отриманих (рис. 3–5). Форма змодельованих та експериментально вимірених сигналів для міді, титану та сталі наведена на рисунках 5–7.

Досліджувані об'єкти мали однакові геометричні розміри та форму. Швидкість переміщення ОК відносно антенної системи становила 2,2 м/с. Візуально видно, що для міді (немагнітний матеріал) перший екстремум – негативний, а для сталі (магнітний матеріал) – позитивний.

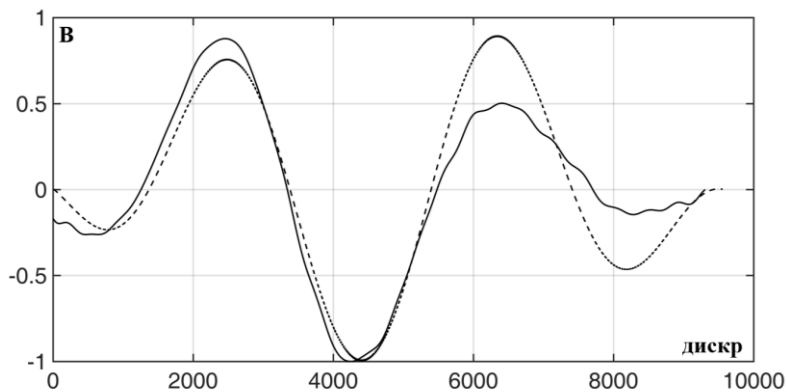


Рис. 3. Порівняння сигналів розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для ОК із міді

Сигнали мають різне співвідношення між екстремумами, яке в подальшому використовується для комп'ютерної обробки сигналів. На етапі ідентифікації металів сигнал-відгук оцифровується, після чого подається в цифровий блок, де здійснюється його обробка як в часовій, так і спектральній областях.

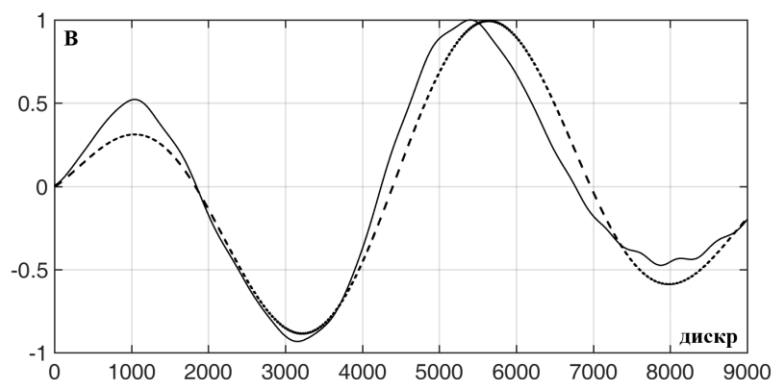


Рис. 4. Порівняння сигналів розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для ОК із титану

Метою обробки є виділення інформаційних коефіцієнтів, що характеризують конкретний метал або сплав. Це – кількість екстремумів, їм взаємне співвідношення, площа спектра під обвідною, кривизна обвідної спектра, нижня та верхня межа спектрів. Їх можна представити як матрицю-рядок

$$f(K\%, E_{cum}, KOP, S_{xs}, f_n, f_v). \tag{8}$$

Схематично процес ідентифікації можна уявити як:

$$U(V, \sigma, \mu) \Rightarrow [\Phi] \Rightarrow f(K\%, E_{cum}, KOP, S_{xs}, f_n, f_v), \tag{9}$$

де  $\Phi$  – нелінійний фільтр, після проходження через який виділяються інформаційні коефіцієнти.

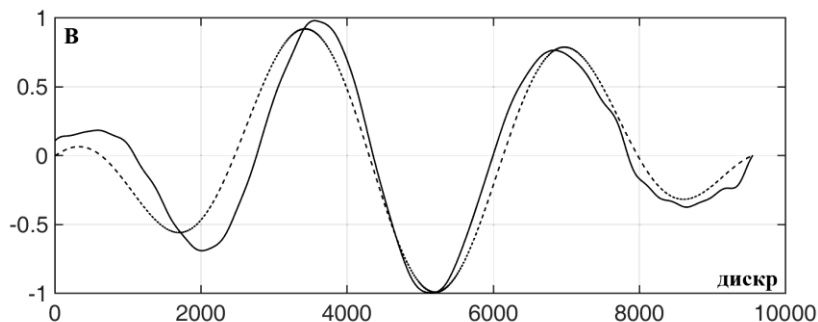


Рис. 5. Порівняння сигналів розрахованих (штрихова лінія) та експериментальних (суцільна лінія) для ОК зі сталі

При різних швидкостях переміщення ОК відносно антени форма сигналу буде різною, відповідно інформаційні коефіцієнти також будуть різними. Кореляція коефіцієнтів між собою для різних металів призведе до кращої або гіршої їх ідентифікації. Тому, доречним є визначення оптимальних швидкостей (частот обертання) обертальної установки, які забезпечать максимально можливу точність ідентифікації матеріалу ОК.

Матриця-рядок не містить інформації про швидкість переміщення ОК відносно антенної системи, тому що фільтр виділяє лише інформаційні коефіцієнти. Тому необхідно дослідити вплив на сигнал відгуку швидкості переміщення ОК відносно антенної системи.

Класичний аналіз пошуку екстремумів [13–15], який передбачає обрахунок похідної за однією зі змінних та прирівнювання результату до нуля, неприйнятний, тому що критерієм максимальної кореляції між металами є матриця-рядок, а не початкова функція.

Для пошуку оптимальної швидкості руху металевих зразків над антеною пропонуємо почергово порівнювати між собою похідні функції сигналу-відгуку графічно-інтегральним шляхом.

Максимальна графічно-інтегральна різниця похідних для двох різних металів є підтвердженням максимальної кореляції між параметрами металів, що порівнюються. Схематично цей метод можна записати як:

$$\int \frac{U_1(V, \sigma, \mu)}{\partial V} - \frac{U_2(V, \sigma, \mu)}{\partial V} \Rightarrow \max \tag{10}$$

$$\frac{U_1(V, \sigma, \mu)}{\partial V} = \frac{U_{130} \cos\left(\frac{V}{L}t\right) \cos(\omega t + \varphi(t))}{\partial V} = -\frac{t}{L} U_{130} \sin\left(\frac{V}{L}t\right) \cos(\omega t + \varphi(t)).$$

У роботі розраховані значення інтегральної характеристики для 4-х різних металів. Вони представлені на рисунку 6. На них наведено взаємно-кореляційні характеристики для діапазону частот обертання рухомої частини обертальної установки від 10 до 18 Гц, що відповідає швидкості лінійного переміщення ОК відносно антенної системи в 2...8 м/с.

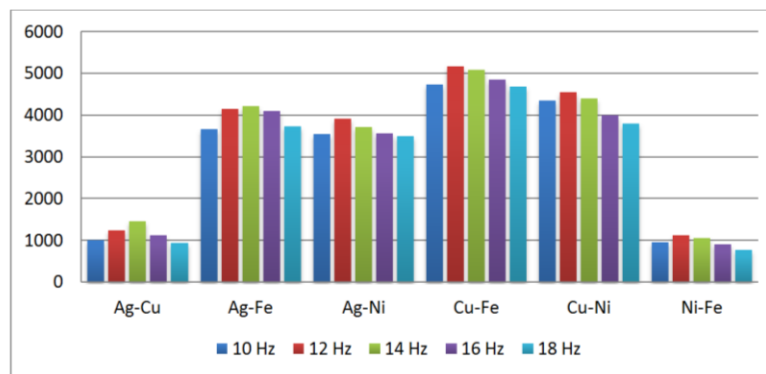


Рис. 6. Діаграма взаємно-кореляційних інтегральних характеристик 4-х різних металів

Аналіз діаграми показує, що явно вираженої однієї оптимальної частоти не існує, а є діапазон частот 12–14 Гц, при якому забезпечується максимум кореляційної інтегральної характеристики.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Запропонована математична модель сигналу відгуку вихрострумовевого пристрою з фазовим детектором та інтегрально-диференційний підхід до визначення кореляційної різниці інформаційних критеріїв спектрального та графічно-цифрового методів ідентифікації металевих об'єктів дозволила експериментально визначити діапазон оптимальної швидкості руху металевих об'єктів відносно антенної системи.

Отримані експериментальні результати показали, що максимум кореляційної різниці інформаційних параметрів запропонованої радіотехнічної системи, для обертальної установки з плечем 500 мм, лежить у діапазоні 12–14 Гц, що відповідає діапазону лінійних швидкостей 4–6 м/с. У подальших дослідженнях доцільно збільшити чутливість приймального тракту, що дозволить здійснювати ідентифікацію не тільки металів за типом, а і визначати сплави, працювати зі складеними виробами.

#### Список використаної літератури:

1. Abramovych A.O. Eddy-current amplitude-phase based method for identifying conductive (metal) objects / A.O. Abramovych, V.O. Poddubny // *Metallophysics and the latest technologies : International scientific and technical journal*. – Kyiv, 2020. – Vol. 42, № 8. – P. 1069–1085. DOI: 10.15407/mfint.42.08.1169.
2. 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: 10.15407/mfint.39.08.1035.
3. Bruschini C.A. Multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining : dissertation of Doctor in Applied Sciences / C.A. Bruschini. – Brussels : Vrije Universiteit Brussel, 2002. – 242 p.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации : кол. монограф. / под ред. А.Ю. Грунева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
5. Неразрушающий контроль : в 5-ти т. / под ред. В.В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1992. – Т. 3. – 312 с.
6. ГОСТ 24289-80 Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.
7. Сокольников А.Н. Методы неразрушающего контроля / А.Н. Сокольников. – Красноярск : Сиб. федер. унив., 2021. – 132 с.
8. 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*. – Ternopil, 2017. – Vol. 86, № 2. – P. 76–83.
9. Abramovych A.O. Solenoid antenna of radio engineering system of metal identification / A.O. Abramovych, V.O. Piddubny // *The Journal of Zhytomyr State Technological University. Ser. : Engineering*. – 2019. – № 1 (83). – P. 188–196. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-188-196.
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. Piddubny // *Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University / Radioelektronika, Informatics, Management*. – 2020. – № 1. – P. 7–17. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-1.
11. Тумце У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство / У.Тумце, К.Шенк. – М. : Мир, 1982. – 450 с.
12. Salih M. Fourier Transform – Signal Processing / M.Salih. – Rijeka, Croatia. : InTech, 2012. – 366 p.
13. Ifeachor E. Digital Signal Processing : A Practical Approach 2nd ed. / E.Ifeachor, B.Jervis. – Hoboken, USA : Prentice Hall, 2001. – 933 p.
14. Stroustrup B. Programming: principles and practice using C++ (2nd Edition) / B.Stroustrup. – Boston, USA : Addison-Wesley, 2014. – 2339 p.
15. Carey S.C. Software defined radio for stepped-frequency, ground-penetrating radar / S.C. Carey, W.R. Scott // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. – 2017. – P. 4825–4828. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128082.

## References:

1. Abramovych, A.O. and Poddubny, V.O. (2020), «Eddy-current amplitude-phase based method for identifying conductive (metal) objects», *Metallophysics and the latest technologies, International scientific and technical journal*, Kyiv, Vol. 42, No. 8, pp. 1069–1085, doi: 10.15407/mfint.42.08.1169.
2. Abramovych, A.O., Kashirsky, I.S. and Piddubnyi, V.O. (2017), «The remote eddy-current analysis of a composition of metal objects», *Metallophysics and advanced technologies*, Vol. 39, No. 8, pp. 1035–1049, doi: 10.15407/mfint.39.08.1035.
3. Bruschini, C.A (2002), *Multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining*, D.Sc. Thesis of dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 242 p.
4. Grineva, A.Yu. (ed.) (2005), *Voprosy podpoverkhnostnoi radiolokatsii*, kollektivnaya monograf., Radiotekhnika, M., 416 p.
5. Sukhorukova, V.V. (ed.) (1992), *Nerazrushayushchii kontrol'*, in 5 vol., Vyssh. shk., M., Vol. 3, 312 p.
6. GOST 24289-80 Kontrol' nerazrushayushchii vikhretokovyi. Terminy i opredeleniya.
7. Sokol'nikov, A.N. (2021), *Metody nerazrushayushchego kontrolya*, Sib. feder. univ., Krasnoyarsk, 132 p.
8. Abramovych, A.O. and Poddubny, V.O. (2017), «Rationing of signals of eddy – current converters for correct comparison of them», *Bulletin of the Ternopil National Technical University, Ser. Technical sciences*, Ternopil, Vol. 86, No. 2, pp. 76–83.
9. Abramovych, A.O. and Piddubnyi, V.O. (2019), «Solenoid antenna of radio engineering system of metal identification», *The Journal of Zhytomyr State Technological University, Ser. Engineering*, No. 1 (83), pp. 188–196, doi: 10.26642/tn-2019-1(83)-188-196.
10. Abramovych, A.O., Agalidi, Y.S. and Piddubnyi, V.O. (2020), «Radio engineering system identification of metals on the basis of eddy-current converters», *Scientific Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University, Radioelektronika, Informatics, Management*, No. 1, pp. 7–17, doi: 10.15588/1607-3274-2020-1-1.
11. Tittse, U. and Shenk, K. (1982), *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*, spravochnoe rukovodstvo, Mir, Moskva, 450 p.
12. Salih, M. (2012), *Fourier Transform – Signal Processing*, InTech, Croatia, Rijeka, 366 p.
13. Ifeachor, E. and Jervis, B. (2001), *Digital Signal Processing, A Practical Approach 2nd Ed.*, Prentice Hall, USA, Hoboken, 933 p.
14. Stroustrup, B. (2014), *Programming: principles and practice using C++*, 2nd Edition, Addison-Wesley, USA, Boston, 2339 p.
15. Carey, S.C. and Scott, W.R. (2017), «Software defined radio for stepped-frequency, ground-penetrating radar», *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 4825–4828, doi: 10.1109/IGARSS.2017.8128082.

**Абрамович** Антон Олексійович – кандидат технічних наук, інженер Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- георадари;
- електромагнітні методи неруйнівного контролю;
- мікропроцесорна техніка.

**Піддубний** Володимир Олексійович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- електронні прилади;
- методи вимірювання механічних та фізичних величин

**Abramovych A.O., Piddubnyi V.O.**

#### Optimizing the scanning speed of the eddy current metal detector

The results of the identification of metal objects by an eddy current radio engineering system (RS) with amplitude-phase detection of the response signal during their dynamic scanning are considered. A mathematical model was developed that describes the changes in the information criteria of the response signal depending on the material of the investigated metal objects and the speed of their linear movement relative to the RS antenna. Simulations of response signals for several metals are carried out and comparisons with experimentally obtained results are given. The optimal range of scanning speeds was determined, which allows obtaining the maximum correlation difference of information criteria for different metals, which is recorded in a memory device and used for further identification of unknown conductive (metal) objects.

The proposed mathematical model of the response signal of the eddy current device with a phase detector and the integral-differential approach to determining the correlation difference of the information criteria of the spectral and graphic-digital methods of identification of metal objects made it possible to experimentally determine the range of the optimal speed of movement of a metal object relative to the antenna system. The obtained experimental results showed that the maximum correlation difference of the information parameters of the proposed radio engineering system lies in the range of 12–14 Hz, which corresponds to the range of linear speeds of 4–6 m/s.

**Keywords:** electromagnetic properties of metals; eddy current converter; remote identification of metals; mathematical modeling; amplitude-phase signal registration method.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2022.