

**А.О. Абрамович, аспір.  
О.Д. Мрачковський, к.т.н., доц.  
В.Ю. Фурманчук, магістрант**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

### **ДИХОТОМІЧНЕ РОЗРІЗНЕННЯ МЕТАЛУ НА ЧОРНИЙ-КОЛЬОРОВИЙ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ**

*Задача виявлення металевих предметів в різних середовищах завжди була актуальною. Для її вирішення використовують металошукачі призначені для виявлення та ідентифікації предметів, які за своїми електричними чи магнітними властивостями відрізняються від середовища, в якому вони знаходяться. Найбільш розповсюдженими серед них є металошукачі типу «виявлення на дуже низькій частоті» (Very Low Frequency (VLF) detectors). Вони використовують вихрострумівий метод виявлення металевих мішеней, який вирішує задачу дихотомічного розрізнення, тобто задачу розбиття цілого (чи множини) на дві частини (підмножини): чорна чи кольорова мішень.*

*Розрізнення мішеней в них здійснюється за пороговим рівнем прийнятого сигналу. Однак такий підхід не дозволяє визначити тип мішені, якщо два зразки із різних металів лежать поруч.*

*Для подолання вище описаних обмежень пропонується інший спосіб розрізнення, який побудований на використанні спектрального аналізу сигналу, що виникає в антені металошукача під дією струмів Фуко. Покажемо, що задача дихотомічного розрізнення може бути вирішена за допомогою вимірювань ширини та площі під огинаючою амплітудного спектру (в подальшому спектра) прийнятого сигналу.*

*Для цього за допомогою лабораторного макету вихрострумівового металошукача знімемо відклик від двох зразків – сталі та міді, розміщених поряд та розрахуємо його спектр.*

*Завдання розрізнення металевих мішеней зводиться до визначення попадання спектрів еталонних зразків в отриманий спектр. Співвідношення між площами вимірюваного та еталонних спектрів вказує на відсотковий вміст конкретних металів (наприклад, два однакові зразки із різних металів лежали поруч).*

*Обробка сигналу здійснюється спеціально розробленою програмою, яка порівнює спектри двох поряд розміщених зразків з чорного та кольорового металів з базовими.*

**Ключові слова:** *спектральний аналіз; дихотомія; вихрострумівий металошукач; розрізнення металів.*

**Вступ.** Металошукач діє за принципом електромагнітної індукції, який базується на виникненні струмів Фуко на поверхні металевій мішені розміщеного в змінному електромагнітному полі. Ці струми спотворюють первинне електромагнітне поле, вимірювання змін у якому дозволяє визначити наявність та тип металевій мішені. Розрізнення мішеней в них здійснюється за пороговим рівнем прийнятого сигналу [3]. Вихрострумівий метод реалізовано більшістю виробників і представлено металошукачами фірм: Minelab, Fisher, Garret [2]. Однак такий підхід не дозволяє визначити тип мішені, якщо два зразки із різних металів лежать поруч.

Для подолання вище описаних обмежень пропонується інший спосіб розрізнення, який побудований на використанні спектрального аналізу сигналу, що виникає в антені металошукача під дією струмів Фуко. Покажемо, що задача дихотомічного розрізнення може бути вирішена за допомогою вимірювань ширини та площі під огинаючою амплітудного спектру (в подальшому спектра) прийнятого сигналу.

**Викладення основного матеріалу.** Відомо, що сигнал на вході металошукача  $\bar{U}_{вд}$ , який збуджується вторинним електромагнітним полем залежить від провідності зразка та від його магнітних властивостей [4].

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

$\varphi_1(x, \beta)$ ,  $\mu_r$ ,  $\mu_a$ ,  $\sigma$  – функція впливу, відносна, абсолютна магнітна проникності дослідних матеріалів та їх провідність.

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

де  $\lambda$  – параметр інтегрального перетворення,  $R_3$  – радіус зондувальної антени,  $\omega$  – кутова частота.

Спектральна щільність  $S^*(f)$  [5] вхідного сигналу  $\overline{U}_{ВД}$  є інформативним параметром, залежним від  $\mu_r$ ,  $\mu_a$ ,  $\sigma$  і в частотній області описується виразом  $S^*(f) = S(f)R(f)$ , де  $R(f)$  і  $S(f)$  – коефіцієнти згасання при проходженні через багато шарове середовище, в якому знаходиться дослідний зразок, та спектр вхідного сигналу, відповідно [6,7].

$$R(f) = \sum_{j=1}^{\infty} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau,f) d\tau},$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt,$$

$$S^*(f) = \sum_{j=1}^{\infty} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^{z_j} n(\tau,f) d\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{U}_{ВД}(t) e^{-2\pi i f t} dt,$$

Покажемо різницю у спектрах сигналів отриманих від різних металів. Для простоти припустимо, що всі параметри крім магнітної проникності та провідності однакові. Тоді спектральна щільність вихідного сигналу залежить лише від  $\varphi_1(x, \beta)$ .

Розрахуємо його значення для двох металів – чорного (сталі) та кольорового (міді). Як відомо[8], відносна магнітна проникність сталі

$\mu_r = 100$ , а міді  $\mu_r = 1$ , провідність заліза (сталь) = 769000 См/м, а для міді = 59500000 См/м. Тоді модуль функції впливу:

$$|\varphi_{1\text{сталь}}(x, \beta)| = 0,836,$$

$$|\varphi_{1\text{мідь}}(x, \beta)| = 1$$

Як бачимо, різниця в площах під кривими спектрів для цих двох металів більша ніж 16 %. Це дозволяє у спектрі сигналу, прийнятого від кількох мішеней, що знаходяться поруч, розрізнити типи металів.

Експериментально перевіримо це твердження. Для цього за допомогою лабораторного макету вихрострумowego металошукача [4] знімемо відклик від двох зразків – сталі та міді, розміщених поряд та розрахуємо його спектр (рис. 1). Інформативними ознаками дослідних спектрів металошукача є його ширина (за рівнем -40дБ) та площа під кривою.

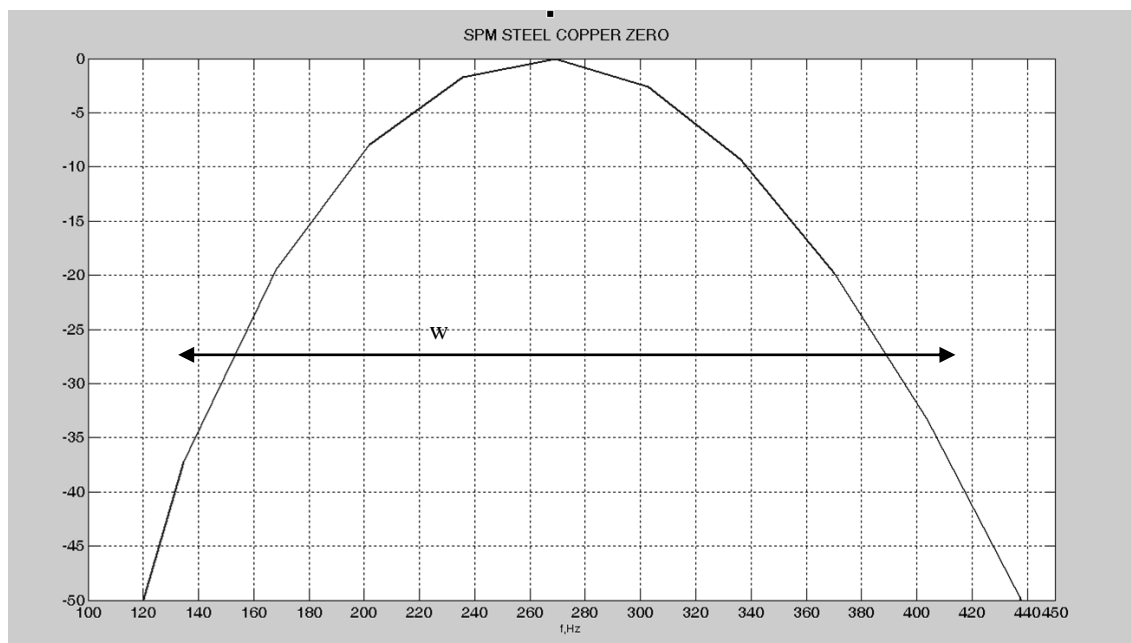


Рис. 1. Спектр сигналу від сталюого та мідного зразків, що розміщені поруч

Інформативна частина спектра лежить в діапазоні 130...418 Гц, площа під кривою 7400 дБ·Гц. В сигналі відсутня носійна частота, тому спектри від різних металів накладаються один на одного.

Завдання розрізнення металевих мішеней зводиться до визначення попадання спектрів еталонних зразків в отриманий спектр. Співвідношення між площами виміряного та еталонних спектрів вказує на відсотковий вміст конкретних металів (наприклад, два однакові зразки із різних металів лежали поруч).

Для цього за допомогою того ж макету створимо базу спектральних відгуків від різних типів металів (сталі, міді та алюмінію), яка буде використана в подальшій обробці спектральних характеристик відкликів.

Типові форми сигналів від різних типів металів  $\bar{U}_{ВД}$  та їхні спектральні щільності  $S(f)$  приведено на рисунку 2 та рисунку 3, відповідно.

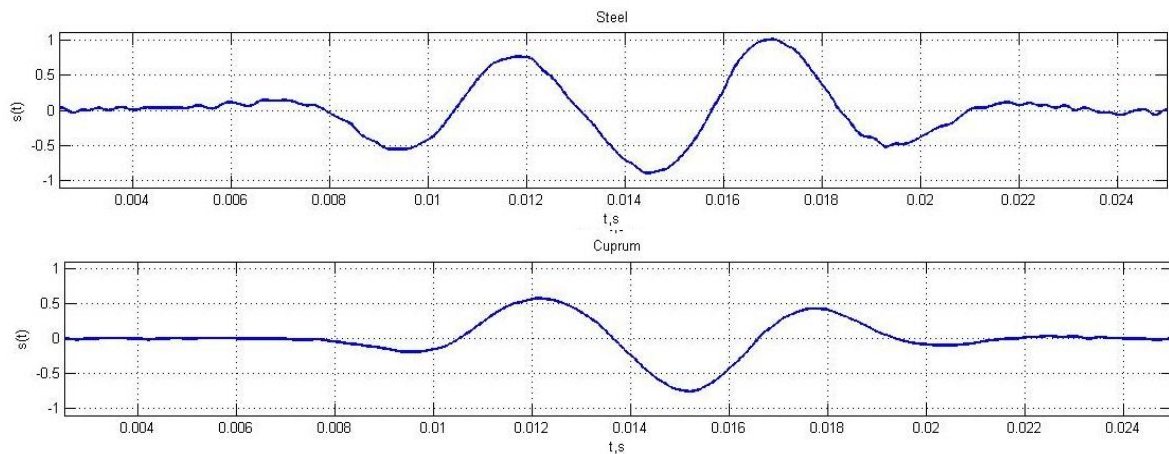


Рис. 2. Типові форми сигналів  $\bar{U}_{ВД}$  (зверху до низу: сталь, мідь)

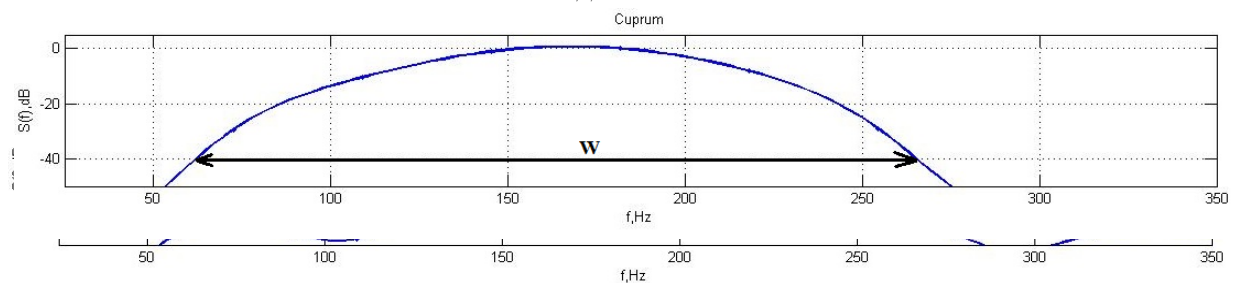


Рис. 3. Спектральні щільності сигналів дослідних зразків (зверху до низу: сталь, мідь)

Значення базових спектральних характеристик сигналу  $\bar{U}_{ВД}$  для сталі, міді та для двох металів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри базових спектральних характеристик дослідних зразків

Метал	Ширина спектра по рівню -40дБ (Гц)	Площа під огинаючою спектру (дБ·Гц)
сталь	120...270,4	4200
мідь	64,5...276,2	5800
два метали	130...418	7400

Як видно, параметри базових спектральних характеристик для чорних та кольорових металів суттєво відрізняються, що дозволяє ідентифікувати тип металу.

Подальша обробка сигналу здійснюється спеціально розробленою програмою [9,10], яка порівнює спектри двох поряд розміщених зразків з чорного та кольорового металів з базовими. Вона дозволяє розрізнити два метали, що знаходяться поруч, з вірогідністю 0.95.

**Висновки.** Таким чином, показано, що задача дихотомічного розрізнення металів може бути вирішена за допомогою використання спектрального методу обробки сигналів. Застосування даного методу дозволяє з високою вірогідністю відрізнити кольоровий та чорний метали між собою, навіть якщо два зразки із різних металів лежать поруч.

#### Список використаної літератури:

1. Правда В.І. Георадари / В.І. Правда, О.Д. Мрачковський, А.О. Абрамович // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія : Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2015. – № 818. – С. 49–54.
2. Абрамович А.О. Металодетектори / А.О. Абрамович, С.М. Дяченко // «Вісник НТУУ «КП». Серія : Радіотехніка. Радіопарабудування. – 2011. – Вип. 46. – С. 186–193.

3. Щербаків Г.Н. Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих укрывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания / Г.Н. Щербаків // Радиотехника. – 2005. – № 12. – С. 42–45.
4. Абрамович А.О. Радіолокаційно-вихрострумний радар / А.О. Абрамович // Вісник НТТУ «КПІ». Серія : Радиотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014. – Вип. 57. – С. 77–82.
5. IEEE Xplore. Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). – DOI : 10.1109/ICGPR.2012.6254822.
6. Joy M.H. Ground Penetrating Radar Theory and Applications / M.H. Joy // Oxford GB.: Elsevier B.V. – 2009. – 574 p.
7. Diamanti L. Characterizing the energy distribution around GPR antennas / L.Diamanti, P.Annan // Journal of Applied Geophysics. – 2013.
8. Неразрушающий контроль : в 5 т. Т. 3. Электромагнитный контроль : практ. пособие / под ред. В.В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1992. – 312 с.
9. 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. – Vol. 5 (2). – 2010. – Pp. 56–63.
10. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э.Айфичер, Б.Джервис ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.

#### References:

1. Pravda, V.I., Mrachkovskiy, O.D. and Abramovych, A.O. (2015), «Georadary», *Visnyk nacional'nogo universytetu «Lvivs'ka politehnika», Serija Radioelektronika ta telekomunikacii*, No. 818, pp. 49–54.
2. Abramovych, A.O. and Djachenko, S.M. (2011), «Metalodetektory», *Visnyk NTUU «KPI», Serija Radiotekhnika. Radioaparatobuduvannja*, Vol. 46, pp. 186–193.
3. Shherbakov, G.N. (2005), «Uvelichenie predel'noj glubiny obnaruzhenija lokal'nyh ferromagnitnyh ob'ektov v tolshhe provodjashhij ukryvajushhij sred metodom distancionnogo parametricheskogo podmagnichivanja», *Radiotekhnika*, No. 12, pp. 42–45.
4. Abramovych, A.O. (2014), «Radiolokacijno-vyhrostrumovyj radar», *Visnyk NTUU «KPI», Serija Radiotekhnika. Radioaparatobuduvannja*, Vol. 57, pp. 77–82.
5. «IEEE Xplore», *Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254822
6. Joy, M.H. (2009), «Ground Penetrating Radar Theory and Applications», *Oxford GB., Elsevier B.V.*, 574 p.
7. Diamanti, L. and Annan, P. (2013), «Characterizing the energy distribution around GPR antennas», *Journal of Applied Geophysics*.
8. Suhorukov, V.V. (ed.) (1992), *Nerazrushajushhij kontrol'*, in 5-th parts, Part 3, *Jelektromagnitnyj kontrol'*, Vysshaja shkola, Moskva, 312 p.
9. Obiazi, A.M., Anyasi, F.I. and Jacdonmi, O.O. (2010), «Implementing a Robust Metal Detector Utilizing the Colpitts Oscillator with Toroidal Coil», *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5 (2), pp. 56–63.
10. Ajficher, Je. and Dzhervis, B. (2004), *Cifrovaja obrabotka signalov. Prakticheskij podhod*, Translated from English, 2nd ed., Vil'jams, Moskva, 992 p.

АБРАМОВИЧ Антон Олексійович – аспірант кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету НТUU «КПІ».

Наукові інтереси:

- георадари;
- електромагнітні методи неруйнівного контролю;
- мікропроцесорна техніка та оптимізація систем.

Тел.: (067) 336–14–79.

E-mail:osslo@ukr.net.

МРАЧКОВСЬКИЙ Олег Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Радіотехнічного факультету НТUU «КПІ».

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- теорія складних сигналів та техніка цифрового формування і обробки складних радіолокаційних та радіонавігаційних сигналів.

ФУРМАНЧУК Вадим Юрійович – магістрант кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету НТUU «КПІ».

Наукові інтереси:

- георадари;
- мікросистемна техніка та цифрова обробка сигналів.

Стаття надійшла до редакції 23.02.2017.