

Соленоїдна антена радіотехнічної системи ідентифікації металів

Виявлення прихованих в діелектричному середовищі металевих об'єктів здійснюють за допомогою металошукачів, побудованих за вихреструмним принципом роботи. Потім виявлений метал ідентифікують. Для ідентифікації металів зазвичай використовують хімічні, оптичні, рентгенівські методи. Але виявлення та ідентифікацію можливо зробити і одночасно використовуючи метод графічно-цифрових образів. У таких приладах використовується коаксіальна соленоїдна антена рамочного типу. Але вона має низьку чутливість, нерівномірність чутливості за глибиною зондування та значний паразитний зв'язок між приймальною та передавальною антенами. Від таких недоліків вільна антенна система DD типу, але вона не дозволяє використати графічно-цифровий метод обробки сигналу. Тому пропонується нова конструкція антенної системи, яка дозволяє використати переваги розглянутого методу обробки сигналу та DD антен. Вона відрізняється тим, що одна із антен, наприклад передавальна, складається з двох частин, які розміщені симетрично відносно другої та створює дві активні зони випромінювання як коаксіальна антена, але аналогічні до зон випромінювання антеною типу DD.

Ключові слова: радіотехнічна система; антена; ідентифікація металів; метод графічно-цифрових образів.

Актуальність теми. Завдання виявлення та ідентифікації металевих предметів важливе для різних галузей господарства: для деревообробної промисловості, археології, медицини, для розмінування територій тощо. Виявлення металів здійснюють за допомогою металошукачів [1], а для ідентифікації металів використовують зазвичай інші методи, наприклад, хімічні, оптичні, рентгенівські методи, які коротко описані в [2]. Там для ідентифікації металів пропонується застосовувати новий метод, який побудований на основі вихреструмного приладу (ВСП). Активним (чутливим) елементом приладу є антенна система соленоїдного типу. Від її характеристик та типу значною мірою залежать параметри всього пристрою. Тому вибір конфігурації антени є актуальним завданням. Питання побудови антени, моделювання її параметрів і розглядається у цій публікації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Виявлення прихованих металевих предметів зазвичай здійснюється вихреструмним методом. Цьому питанню присвячено достатньо багато публікацій, огляд яких дається в [2]. Однак відомі методи обробки сигналу таких ВСП не дозволяють ідентифікувати метал, з якого виготовлено предмет, а дають лише дихотомічну оцінку (предмет виготовлений з чорного, або магнітного, чи кольорового, немагнітного матеріалу). Однак ведуться роботи з виявлення нових ознак у формі сигналу ВСП. Так аспектам ідентифікації металів електромагнітним (вихреструмним) методом присвячені публікації Claudio Bruschini [9]. Електромагнітний метод для ідентифікації металів за ознакою магнітний-немагнітний використав у своїх дослідженнях Сватош Якуб [10], а вимірювання затримки фазових характеристик для проведення геофізичних досліджень використовують Баженов В.Г. [11] та Килимник О.М. [12]. У формі сигналу знайдені нові ознаки, які дозволяють провести ідентифікацію сигналу в середині підгруп магнітних та немагнітних матеріалів, що дозволило, наприклад, відрізнити мідь від алюмінію чи золота. Цьому питанню присвячені роботи А.О. Абрамовича та співавторів [5, 7].

Метою статті є питання побудови антени, моделювання її параметрів.

Викладення основного матеріалу. В [2, 3] описано розроблений у навчально-дослідній лабораторії електронних приладів радіотехнічного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» лабораторний макет радіотехнічної системи, побудованої на основі вихреструмних ефектів в металі, який дозволяє провести дистанційну ідентифікацію металів без пошкодження їх поверхні. Прилад використовує для ідентифікації нові ознаки в формі наведеного від прихованого об'єкта сигналу, які були виявлені авторами, та спеціально розроблене для його обробки математичне забезпечення. Математичне забезпечення поєднує спектральний метод обробки [2, 4] та метод графічних образів [5], що дозволило збільшити вірогідність визначення типу прихованого металу.

Зазвичай у вихреструмних пристроях (ВСП) використовується антенна система, яка складається з двох рамочних соленоїдних антен (приймальної та передавальної), що працюють у діапазоні частот 5–10 кГц. Передавальна антена випромінює електромагнітне поле, яке при взаємодії із прихованим об'єктом створює відгук. Приймальна антена його реєструє та передає на блок обробки сигналу, який і дозволяє

ідентифікувати прихований об'єкт. Діаграма спрямованості антени та форма сигналу на виході фазового детектора радіотехнічної системи, що знімається з рамочної коаксіальної антени, показано на рисунках 1, 2. Зовнішній вигляд антенного блоку, в якому випромінювання зондувального та прийом наведеного від прихованого об'єкта сигналу, здійснюється за допомогою рамочних антен (котушок) круглої форми, що розміщені коаксіально та планарно одна відносно іншої, показано на рисунку 3.

Недоліком такої антенної системи є достатньо низька чутливість, нерівномірність чутливості по глибині зондування та значний паразитний зв'язок між приймальною та передавальною антенами. Зона чутливості такої системи має вигляд конуса направлено в бік об'єкта дослідження, який звужується біля вершини. Максимальна відстань, на якій можна виявити прихований метал, визначається віддалю від антени до кінця конуса.

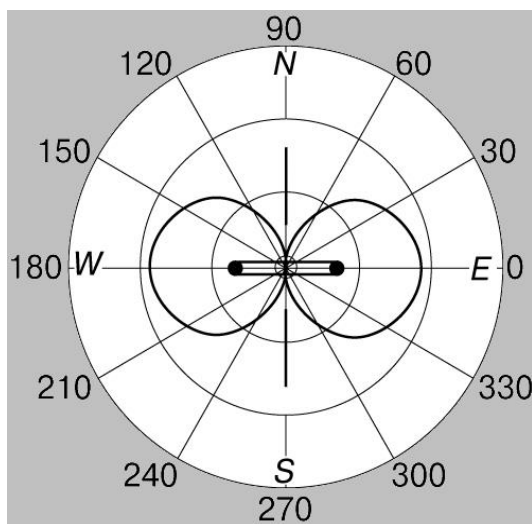


Рис. 1. Діаграма спрямованості рамочної антени



Рис. 2. Сигнал після фазового детектора, який знімається з антени

Ця антена зручна для виявлення металів на засміченій території та для дихотомічної ідентифікації виявленого металу (магнітний чи немагнітний). При роботі з такою антенною системою необхідно слідкувати, щоб кожен наступний прохід сканування частково перекривав попередній, а це збільшує кількість проходів при скануванні території заданої площі, зменшує швидкість переміщення оператора, наприклад, сапера по замінованій території.

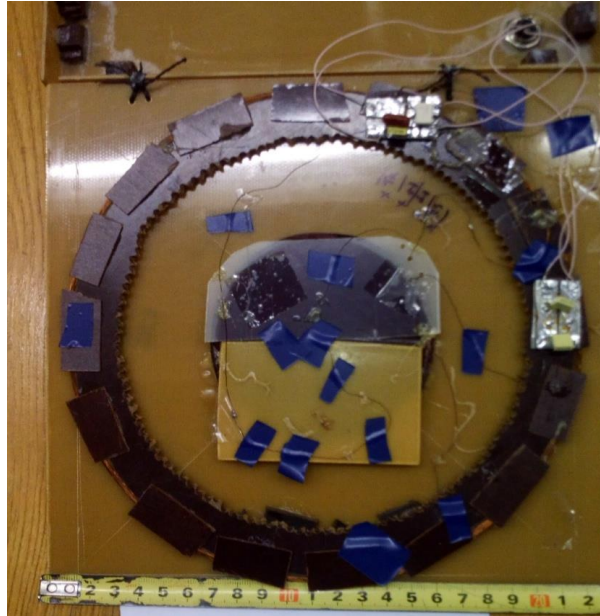


Рис. 3. Зовнішній вигляд антенної системи рамочного типу, що використовується в макеті ВСП

Авторами також розглядалася антенна система типу DD (рис. 4), в якій приймальна та передавальна антени є котушками, що мають форму латинської літери «D». Система складається з двох котушок «D» типу розміщених в дзеркальному відображенні. Витки приймальної та передавальної антен перетинаються в середній частині антенної системи, створюючи активну зону випромінювання електромагнітних хвиль. Випромінювання розповсюджується в вигляді прямокутника. Завдяки цьому краще виявляються об'єкти малих розмірів, що лежать на достатньо великій відстані від антени. Крім того, відпадає необхідність у жорсткому слідуванні за перекриттям проходів при скануванні.

Авторами проведені тестові дослідження двох типів антен приблизно однакових розмірів (діаметр антенної системи близько 150 мм). Приймальна та передавальна антени однакові за конструкцією та мають по 100 витків проводу діаметром 0,33 мм. Індуктивність антен – близька до 4 мГн. Дослідження проводилися на круглих зразках діаметром 25 мм та товщиною 3 мм, виготовлених із міді та алюмінію. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Обробка сигналу знятого з приймальної антени здійснювалася в електронному блоці радіотехнічної системи, в якій фазовий зсув між зондувальним та наведеним сигналом вимірювався фазовим детектором, здійснювався програмним забезпеченням, що реалізує спектральну обробку сигналу [2] та метод графічних образів [5]. Проводилися вимірювання відстані виявлення антенною системою металевого зразка на повітрі. Перше число – відстань від зразка до антенної системи, що характеризується стабільним виявленням при скануванні в обидві сторони. Друге число – нестабільний сигнал, виявлений при скануванні лише в один бік або через раз.

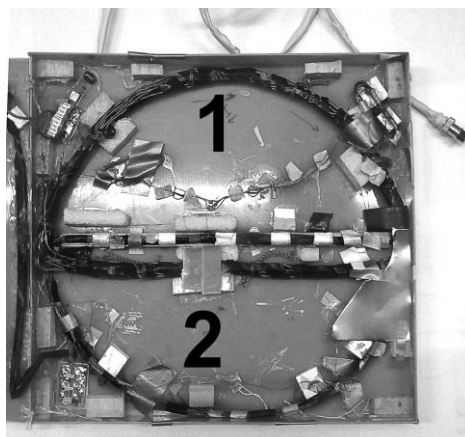


Рис. 4. Зовнішній макет DD антенної системи (1 – передавальна, 2 – приймальна антена)

Порівняльні характеристики коаксіальної та DD антен

Тип антени	Зразок/Відстань мм	
	Мідь електротехнічна	Дюралюміній
Коаксіальна	200–310	170–280
DD	300–380	260–330

Як видно з таблиці 1 використання DD антени дозволяє майже вдвічі збільшити відстань до виявленого прихованого об'єкта [6], тобто збільшити чутливість приладу. Сигнал на виході фазового детектора при скануванні мідного зразка антенною системою DD типу показано на рисунку 5.

Сигнал при використанні DD антени відрізняється за формою від сигналу для коаксіальної антенної системи. Він схожий на сигнал, знятий з одного плеча рамочної коаксіальної антени (рис. 6.).

Така форма сигналу не дозволяє для ідентифікації металу використати розроблені в [7] методи, які побудовані на вимірюванні коефіцієнта K % графічно-цифрового образу сигналу (рис. 7):

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

де A_1 та A_2 – два найбільших позитивних максимумів графічно-цифрового образу.

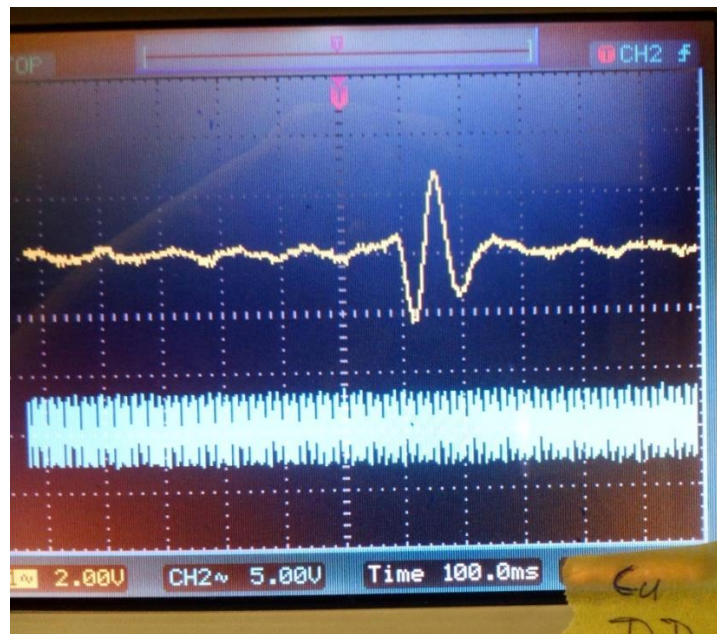


Рис. 5. Сигнал від мідного зразка для антени DD типу

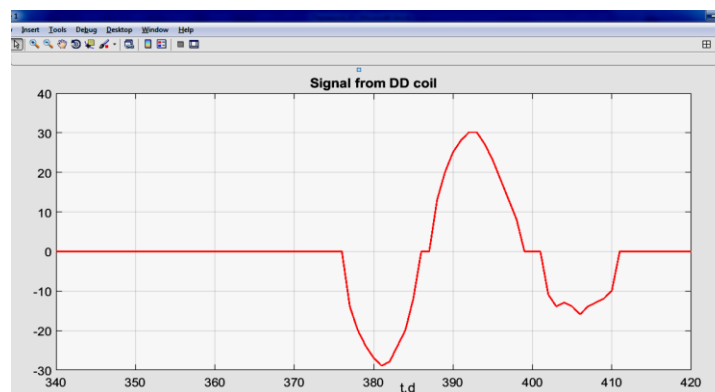


Рис. 6. Сигнал від мідного зразка, знятий над одним плечем коаксіальної рамочної антени і вирізаний із шумів

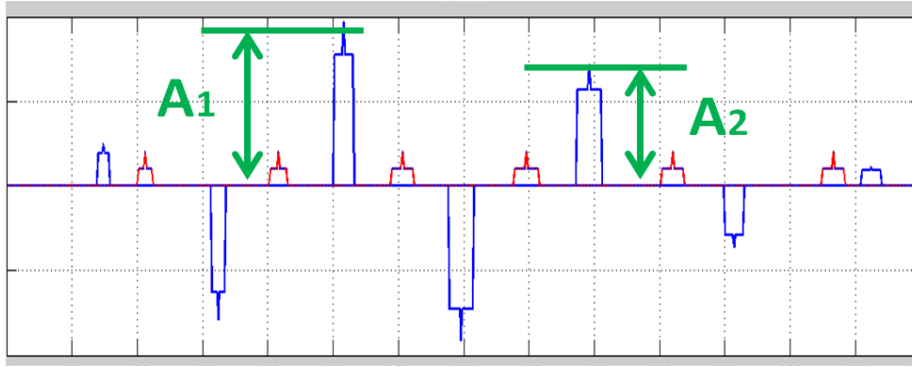


Рис. 7. Графічно-цифровий образ сигналу на виході фазового детектора

Однак можливе поєднання переваг DD антени [4] та графічно-цифрового методу [7] обробки сигналу. Для цього пропонується модифікувати антенну систему. Вона відрізняється тим, що одна із антен складається з двох частин, які розміщені симетрично відносно другої, та створює дві активні зони випромінювання, аналогічні до зон випромінювання антенною типу DD. Схематичний вигляд такої антенної системи показано на рисунку 8 [8], де $U_{\text{пд}}$ і $U_{\text{пр}}$ – напруги на передавальній та приймальній котушках антенної системи.

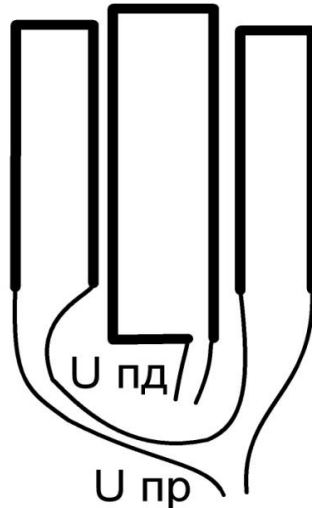


Рис. 8. Схематичне зображення модифікованої антени

Для моделювання вихідного сигналу на виході фазового детектора радіотехнічної системи використаємо теоретичні обґрунтування, запропоновані в [9], в яких розглядається зміна потокозчеплення між витками приймальної та передавальної антен та металевим об'єктом, що рухається над антенною системою [10–12] (рис. 9).

На приймальну котушку наводиться напруга від передавальної $U^{(p)}$ та від зразка $U^{(s)}$.

$$U_2^{(p)}(t) = -i\omega M_{02} I_0 e^{i\omega t}$$

$$U_2^{(s)}(t) = -i\omega M_{12} I_1 e^{i\omega t}$$

$$I_1 e^{i\omega t} = -\frac{M_{01}}{L} \left[\frac{i\omega L(R - i\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] I_0 e^{i\omega t}$$

де M – взаємодукція, що визначається потокозчепленням між елементами системи; R , L – опір та індуктивність, що вносяться досліджуванним металевим зразком в антенну систему; M_{02} – це технічна константа, що визначається потокозчепленням між приймальною та передавальною котушками антенної системи, а M_{01} та M_{12} – це змінні величини, які залежать від властивостей зразка та його положенням відносно котушок антени.

При пронесенні металевго досліджуваного зразка над котушками одна величина зростає, а інша зменшується.

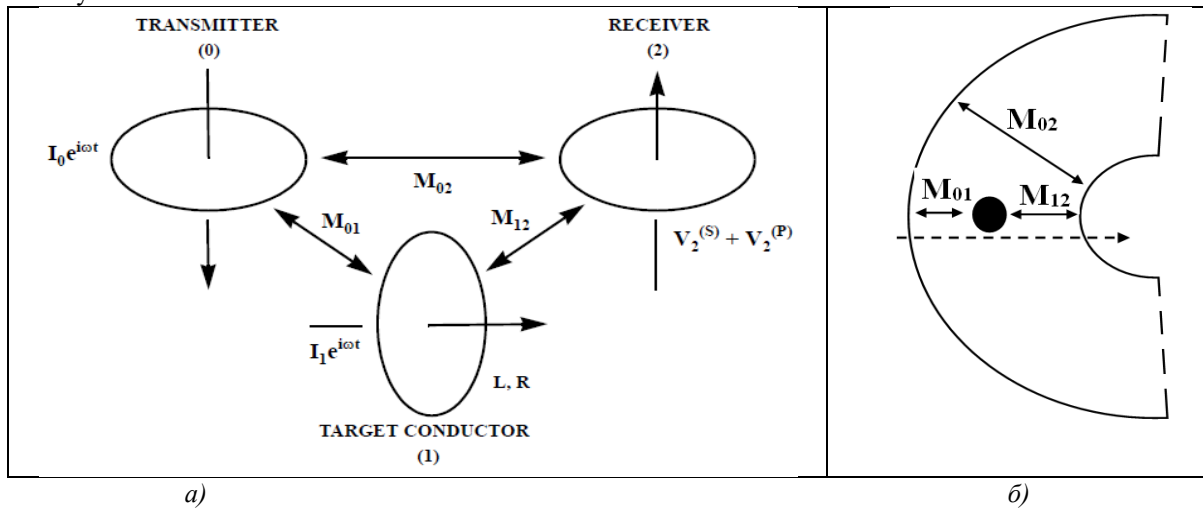


Рис. 9. Схематичне зображення зв'язків, які виникають між витками антени та металом (а) і проходження металевго зразка над коаксіальною антеною (б)

Фазовий зсув між сигналами визначиться виразом:

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{\text{Im}(U_2^{(p)}(t) + U_2^{(s)}(t))}{\text{Re}(U_2^{(p)}(t) + U_2^{(s)}(t))} \right]$$

$$M_{01,12} = \chi \mu_0 \frac{N_0 N_1}{l} S_{ef}$$

$$\chi = \mu_r - 1 \quad M_{td} = \chi \mu_0 \frac{N_0 N_1}{l} S_{td} \quad td = \overline{f_{Disk} \cdot t_{прон}} \quad S_{td} = \overline{S_{m \text{ i } n} S_m}$$

$$S_{m \text{ i } n} = 0, \quad S_{з \text{ п } а} : S_{max} = S_{зразка} \quad S_{зразка} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad f_{Disk} = 6600 \text{ Гц,}$$

$$t_{прон} = 0,073 \text{ с} \quad R \approx \frac{1}{\sigma} \text{ Ом.}$$

де χ – магнітна сприйнятність; S_{ef} – ефективна видима площа металу; N_0, N_1 – кількість витків відповідної котушки та металу (метал приймаємо як 1 виток); l – довжина зразка, td – дискретні відліки часу; f_{Disk} – частота зондування, $t_{прон}$ та час проходження металевго зразка над антеною.

Сигнал із приймальної та передавальної котушок надходить на фазовий детектор системи, який формує вихідний сигнал пропорційний косинусу зсуву фази між сигналами в котушках антенної системи.

$$U_a = \begin{cases} 0 & f_e \neq f_{ynp} \\ \frac{1}{2} U_e \cos \varphi & f_e = f_{ynp} \end{cases}$$

Цей сигнал в подальшому і обробляється програмним забезпеченням. Схема фазового детектора наведена на рисунку 10.

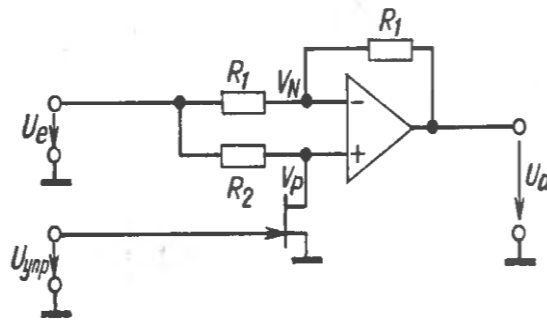


Рис. 10. Схема фазового детектора радіотехнічної системи ідентифікації металів

Значення M_{01} та M_{12} залежно від знаходження мідного досліджуваного зразка відносно антени та розраховане значення напруги на виході антени наведено у таблиці 2, змодельований сигнал показано на рисунку 10.

Таблиця 2

Значення величин M_{01} та M_{12} та напруги на приймальній антені для деяких точок

Координати	M_{01}	M_{12}	Напруга
0	-9,9523e-10	-1,0477e-10	-0.0000 + 0.0013i
100	-9,9502e-10	-1,0498e-10	-0.0522 - 0.1028i
150	-9,9492e-10	-1,0508e-10	0.4804 + 0.1520i
200	-9,9481e-10	-1,0519e-10	-0.9770 + 0.0567i

Змодельований сигнал на виході антени при пронесенні мідного зразка над одним із плечей антени [2, 5]:

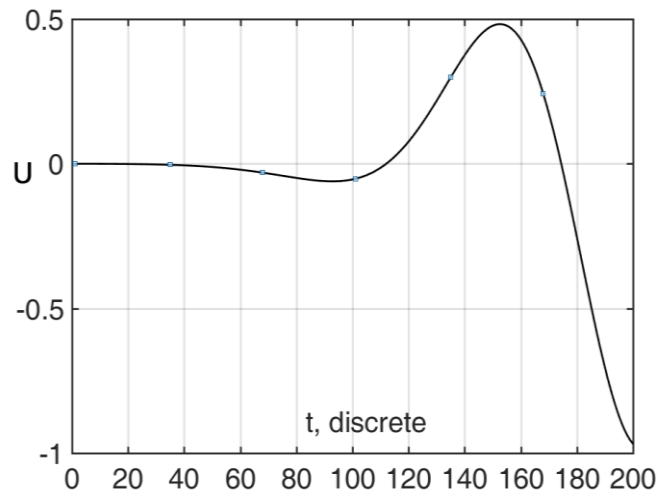


Рис. 11. Змодельований сигнал на виході антени при пронесенні мідного зразка над одним із плечей антени

Значення магнітної сприйнятності та питомої провідності для деяких металів наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Магнітні та провідні характеристики деяких металів

Метал	χ -магнітна сприйнятність, в.о.	σ Питома провідність, см/м
Сталь	100	7 690 000
Нікель	100-600	11 500 000
Мідь	$-9,63 \times 10^{-6}$	59 500 000
Срібло	$-23,1 \times 10^{-6}$	62 500 000
Золото	$-34,4 \times 10^{-6}$	45 500 000

Змодельований сигнал на виході модифікованої антени (рис. 11) подібний за формою до сигналу рамочної коаксіальної антени, що використовувалася раніше (рис. 2).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Моделювання вихідного сигналу модифікованої антени показало, що отриманий сигнал на виході антени подібний за формою до сигналів, отриманих при використанні коаксіальних антен. Вдалося зберегти та перефокусувати активні зони випромінювання рамочної коаксіальної антени подібно до зони випромінювання антени типу DD. Таким чином, модифікована рамочна антенна система поєднує переваги коаксіальної рамочної антенної системи та антенної системи DD типу, це дозволить використовувати ефективний графічно-цифровий метод обробки сигналу вихрострумів пристроїв для ідентифікації металів.

Список використаної літератури:

1. *Абрамович А.О.* Металодетектори / *А.О. Абрамович, С.М. Дяченко* // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» / Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011. – № 46. – С. 186–193.
2. *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. – PP. 51–57. – DOI : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177>.
3. *Абрамович А.О.* Радіолокаційно-вихрострумівий радар / *А.О. Абрамович* // Вісник НТТУ «КПІ» / Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014. – № 57. – С. 77–82.
4. *Jol M.H.* Ground Penetrating Radar Theory and Applications / *M.H. Jol*. – Oxford GB. : Elsevier B.V., 2009. – 574 p.
5. *Абрамович А.О.* Метод обробки відбитих сигналів вихрострумів імпульсних перетворювачів / *А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, І.С. Каширський* // Науковий вісник Запорізького національного технічного університету «Радіоелектроніка, інформатика, управління». – Запоріжжя, 2017. – № 4. – С. 7–14. – DOI : <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1>.
6. *Щербаков Г.Н.* Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих укрывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания / *Г.Н. Щербаков* // Радіотехніка. – 2005. – № 12. – С. 42–45.
7. *Абрамович А.О.* Дистанційний вихрострумівий аналіз складу металевих об'єктів / *А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, І.С. Каширський* // Міжнародний науково-технічний журнал «Металлофізика и новейшие технологии». – К., 2017. – Т. 39. – № 8. – С. 1035–1049 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html>.
8. *Diamanti L.* Characterizing the energy distribution around GPR antennas / *L.Diamanti, P.Annan* // *Journal of Applied Geophysics*. – December 2013. – Vol. 99. – PP. 83–90.
9. *Claudio Bruschini* A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining : Doctor in Applied Sciences Thesis / *Claudio Bruschini*. – Brussels, 2002. – 242 p.
10. *Svatoš Jakub* Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors : Ph.D. Thesis / *Svatoš Jakub*. – Prague, 2015. – 121 p.
11. Метод и аппаратура для измерения напряжённости электрических полей при геолого-геофизических исследованиях / *В.Г. Баженов, Н.А. Якимчук, С.В. Грузин, И.С. Пидлисна* // Зб. наук. праць «Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики». – 2014. – С. 17–30.
12. *Килимник О.М.* Підвищення точності радіолокаційного зондування підповерхневих об'єктів багаточастотними фазовими радіосистемами : дис. ... канд. тех. наук : 05.12.17 / *О.М. Килимник*. – Хмельницький, 2015. – 164 с.

References:

1. *Abramovych, A.O. and Djachenko, S.M.* (2011), «Metalodetektory», *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu Ukrainy «Kyiv's'kyj politehničnyj instytut»*, Serija *Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja*, No. 46, pp. 186–93.
2. *Abramovych, A.O. and Poddubny, V.O.* (2017), «Application of spectral analysis for distinguishing metals by signals from eddy current converters», *The East European Journal of Advanced Technology*, Kharkiv, Vol. 89, No. 5, pp. 51–57, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110177>.
3. *Abramovych, A.O.* (2014), «Radiolokacijno-vyhrostrumovij radar», *Visnyk NTTU «KPI»*, Serija *Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja*, No. 57, pp. 77–82.
4. *Jol, M.H.* (2009), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier B.V., Oxford GB., 574 p.
5. *Abramovych, A.O., Piddubnyj, V.O. and Kashyrs'kyj, I.S.* (2017), «Metod obrobky vidbytyh sygnaliv vyhrostrumovyh impul'snyh peretvorjuvachiv», *Naukovyj visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu «Radioelektronika, informatyka, upravlinnja»*, Zaporizhzhja, No. 4, pp. 7–14, DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-4-1>.
6. *Shcherbakov, G.N.* (2005), «Uvelichenie predel'noi glubiny obnaruzheniya lokal'nykh ferromagnitnykh ob'ektov v tolshche provodyashchikh ukryvayushchikh sred metodom distantsionnogo parametricheskogo podmagnichivaniya», *Radiotekhnika*, No. 12, pp. 42–45.
7. *Abramovych, A.O., Piddubnyj, V.O. and Kashyrs'kyj, I.S.* (2017), «Dystancijnyj vyhrostrumovij analiz skladu metalovykh ob'ektiv», *Mizhnarodnyj naukovo-tehničnyj zhurnal «Metallofyzika y novejšhye tehnologyy»*, K., T. 39, No. 8, pp. 1035–1049, [Online], available at: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html>

8. Diamanti, L. and Annan, P. (2013), «Characterizing the energy distribution around GPR antennas», *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 99, pp. 83–90.
9. Claudio Bruschini (2002), *A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining*, Dissertation of Doctor in Applied Sciences, Brussels, 242 p.
10. Svatoš Jakub (2015), *Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors*, Dissertation of Ph.D., Prague, 121 p.
11. Bazhenov, V.G, Jakimchuk, N.A., Gruzin, S.V. and Pidlisna, I.S. (2014), «Metod i apparatura dlja izmerenija naprjazhjonosti jelektricheskikh polej pri geologo-geofizicheskikh issledovanijah», *Zb. nauk. prac' «Teoretichni ta prikladni aspekti geoinformatiki»*, pp. 17–30.
12. Kylymnyk, O.M. (2015), *Pidvyshhennja tochnosti radiolokacijnogo zonduvannja pidpoverhnevych ob'ektiv bagatochastotnyjy fazovymy radiosystemamy*, Dissertation of kand. teh. nauk, 05.12.17, Hmel'nyuc'kyj, 164 p.

Абрамович Антон Олексійович – випускник аспірантури Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

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

Піддубний Володимир Олексійович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- електронні прилади та методи вимірювання механічних та фізичних величин.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019.