

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ СЛАБОПРОВІДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ

В. М. Учанін, В. Г. Рибачук

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: vuchanin@gmail.com

Досліджено можливість контролю якості мідної руди щодо вмісту в ній мінералів, які містять мідь, вихрострумовим методом. Мідна руда подана як низькопровідне гетерогенне середовище, яке складається з двох однорідних фаз (вмісна порода і мідний мінерал). Зазначені фази мають суттєво різну питому електричну провідність (ПЕП). Для аналізу використано наближення ефективного середовища, коли гетерогенний матеріал можна вважати гомогенним (однорідним) з ефективною ПЕП, яка залежить від кількісного складу компонент. Розроблено накладний параметричний вихрострумний перетворювач (ВСП) локального типу і досліджено його сигнали в комплексній площині від зразків мідної руди з різним вмістом мідного мінералу (халькопіриту) в резонансному режимі роботи за допомогою вихрострумного дефектоскопа Eddycon C на частотах 5, 7 і 9 МГц. Підтверджено принципову можливість застосування вихрострумного методу для кількісного контролю халькопіриту в мідній руді. Сформульовані перспективи подальших досліджень, які пов'язані з розробкою ВСП інтегрального типу, зокрема екранних, сигнали яких залежать від вмісту халькопіриту в зразках мідної руди.

Ключові слова: *гетерогенний матеріал, мідна руда, ефективна питома електропровідність, параметричний вихрострумний перетворювач, резонансний режим, коливальний контур.*

POSSIBILITY OF EDDY CURRENT TESTING OF LOW-CONDUCTIVE HETEROGENEOUS MEDIA

V. M. Uchanin, V. G. Rybachuk

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

The possibility of copper ore quality testing for proportion of minerals containing copper in it by the eddy current method has been studied. Copper ore is presented as a low-conductivity heterogeneous medium consisting of two homogeneous ore constituents (enclosing rock and copper mineral). These constituents have significantly different specific electrical conductivity (SEC). For the analysis, the effective medium approximation is used. In this case a heterogeneous ore can be considered homogeneous with an effective SEC, which depends on the quantitative composition of its constituents. To solve this problem, the surface parametric eddy current probe (ECP) of a local type has been developed. Its design is optimized for operation at high frequencies (units – tens of MHz). ECP winding consists of 10 turns with a diameter of 11 mm, which wound up in one layer on a dielectric frame. The ECP signals in the complex plane from samples of copper ore with different content of copper mineral (chalcopyrite) in the resonant operation mode are studied using eddy current flaw detector of Eddycon C type. The operating frequencies are 5, 7 and 9 MHz. It has been established that with increasing frequency in the specified range, signals amplitude has a pronounced tendency to decrease. It is shown that as the frequency increases from 5 to 7 MHz, the phase sensitivity of the developed ECP to the content of chalcopyrite in the ore also decreases. Thus, the phase angle between signals from ore samples with low and high chalcopyrite content at the frequency of 5 MHz is 110°, and at the frequency of 7 MHz – 87.5°. With a further frequency increase to 9 MHz, the phase sensitivity remains practically unchanged, and the amplitude of the signals continues to decrease. This can be explained by a decrease of the ECP sensitivity to SEC changes with a transition to the over-extreme operating point of the complex plane by operating frequency

© В. М. Учанін, В. Г. Рибачук, 2022

increase. The fundamental possibility of using the eddy current method for the quantitative testing of chalcopyrite in copper ore has been confirmed. Prospects for further research related to the development of an integral-type ECP, in particular, screen ones, whose signals are determined by the content of chalcopyrite in copper ore samples as a whole, are formulated.

Keywords: *heterogeneous material, copper ore, effective specific electrical conductivity, parametric eddy current probe, resonant mode, oscillatory circuit.*

Вступ. Видобуток міді має стратегічне значення для світової економіки, насамперед, через її широке використання для виготовлення кабелів, провідників силових трансформаторів, електроприводів, монтажних друкованих плат, обмоток індуктивності тощо. Ці застосування пов'язані з її високою питомою електропровідністю (ПЕП), яка за 20°C коливається від 55,5 до 59,5 МСм/м залежно від ступеня очищення (друге місце серед металів після срібла). Мідні руди увійшли до переліку корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави, який затверджено рішенням Ради національної безпеки і оборони України і введено в дію Указом Президента України № 306/2021 від 23 липня 2021 року.

Ефективність технологічних процесів гірничодобувної і гірничозбагачувальної галузі під час виробництва міді залежить від якості руд щодо вмісту мінералів, які мають у складі мідь. Мідні руди поділяють на сульфідні, оксидні та змішані. У більшості промислових родовищ мідь знаходиться у сульфідній формі. Основними мінералами міді у мідних рудах є халькопірит (~ 35% міді), борніт (від 52 до 65% міді) і халькозин (~ 80% міді). В цілому кількість міді в рудах зазвичай коливається від 1 до 5%. Використання мідних руд з < 0,5% Cu за сучасного рівня розвитку відповідних технологій є нерентабельним. У мідних рудах часто є інші елементи, зокрема, цинк, свинець, нікель, молібден, золото, срібло тощо. На сьогодні вважають, що мідна руда придатна для збагачення, коли має в складі від 0,5 до 2% міді. В цілому мідні руди поділяють на багаті (> 2% міді), звичайні (1–2%) і бідні (< 1%) [1, 2].

Мідну руду можна вважати гетерогенним матеріалом, який складається з двох однорідних фаз, одна – вмісна порода, інша – мідний мінерал. Ці фази мають виражені поверхні розділу і суттєво відрізняються за властивостями (зокрема ПЕП). Теорія властивостей гетерогенних матеріалів знаходиться на стадії створення (див. наприклад [3, 4]). Використовуватимемо наближення ефективного середовища, коли гетерогенний матеріал вважатимемо гомогенним (однорідним) з ефективною ПЕП, яка залежить від кількісного складу компонент. Таке наближення успішно застосовували, зокрема, для аналізу впливу вмісту мартенситу в аустенітних сталях на сигнал вихрострумове перетворювача (ВСП), де гетерогенність матеріалу обумовлена немагнетними властивостями аустенітної фази і феромагнетними властивостями мартенситної фази [5]. Для такого матеріалу ввели поняття ефективної магнетної проникності. Цю задачу також вирішували вимірюванням ефективної коерцитивної сили, хоча відповідний термін не застосовували [6]. Принцип ефективного середовища і термін “ефективна коерцитивна сила” використали також для магнетного аналізу шаруватих об'єктів, які складаються з шарів з різними магнетними характеристиками [7].

Електромагнетні методи вже використовують для контролю вмісту магнетиту в залізній руді, яку також можна вважати гетерогенним матеріалом з феромагнетною компонентою [8–10]. Для цих задач також можна застосувати принцип ефективного середовища з відповідним магнетним параметром [5].

Нижче подано результати пошукового етапу досліджень з можливості оцінювання якості мідної руди щодо вмісту мідного мінералу вихрострумівим методом на основі використання резонансного способу обробки сигналів параметричного ВСП. Вибір цього типу ВСП обумовлений, з одного боку, простотою

конструкції, а з іншого – хорошими частотними характеристиками, які необхідні для роботи на високих частотах, через низькі значення ефективної ПЕП мідної руди.

Особливості роботи параметричного ВСП у резонансному режимі. Типова залежність імпедансу параметричного ВСП абсолютного типу в комплексній площині (годограф) від зміни ПЕП (σ), робочої частоти та зазору між ВСП і поверхнею електропровідного об'єкта контролю (ОК) проілюстрована на рис. 1 [11–13]. Положення робочої точки на наведеній залежності визначають узагальненим параметром $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$, де R – радіус обмотки збудження, $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота струму збудження, f – робоча частота, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнетна стала.

Розглянемо зміни імпедансу параметричного ВСП (складається з реальної R та уявної ωL складових) у комплексній площині, де вісь X формується відношенням збільшення реальної складової ($R - R_0$) до уявної складової (ωL_0) обмотки ВСП у “повітрі”, а вісь Y – уявної складової на матеріалі (ωL) до уявної у “повітрі” (ωL_0). При цьому робочу частоту контролю вважають сталою і змінюється тільки один з параметрів (зазор, ПЕП, робоча частота тощо).

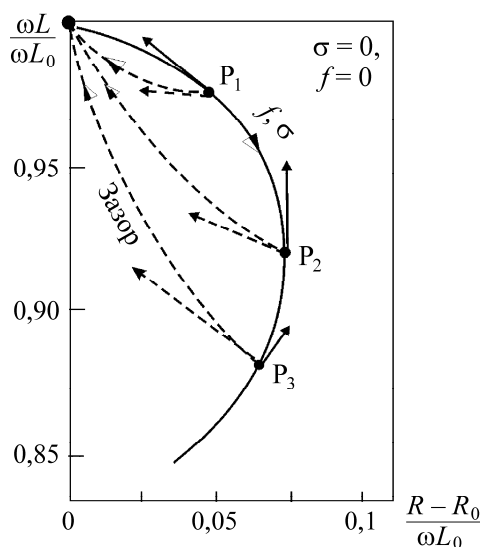


Рис. 1. Типова залежність внесеного імпедансу ВСП від ПЕП (σ), зазору та робочої частоти (f).

Нульова робоча частота f або ПЕП ОК відповідає початковій точці (0,1) годографа змін імпедансу ВСП, коли він розміщений у вільному просторі, тобто за межами зони впливу на нього ОК. Якщо ПЕП матеріалу > 0 , а його товщина більша за реальну глибину проникнення вихрових струмів, точка нормованого імпедансу обмотки ВСП (робоча точка) пересувається зі зростанням робочої частоти f по суцільній кривій вниз у напрямку від робочої точки P_1 до робочої точки P_3 (рис. 1). За сталої робочої частоти f зі збільшенням ПЕП робоча точка пересувається вздовж тієї ж кривої. Якщо ВСП піднімати над поверхнею ОК, робоча точка пересувається вздовж відповідних пунктирних кривих (стрілки “Зазор” на рис. 1) і закінчується в точці вільного простору (0,1). Але під час визначення змін ПЕП цей ефект є джерелом додаткової похибки. Проаналізувавши годографи, бачимо, що максимальна чутливість до змін ПЕП є за таких значень параметра β , за яких значення реальної складової внесеного впливом ОК імпедансу максимальне (на рис. 1 відповідає приблизно точці P_2). З подальшим збільшенням робочої частоти чутливість до змін ПЕП зменшується, а до зазору збільшується. Це схематично показано розмірами стрілок (рис. 1), що визначають напрямки збільшення зазору (пунктирні стрілки) та зменшення ПЕП (суцільні) у відповідних робочих точках. Збільшення робочої частоти призводить до певних особливостей, які можна використати для зменшення чутливості до зазору. Зокрема видно, що в заекстремальній робочій точці (наприклад P_3) залежність реальної складової імпедансу від зазору та зменшення ПЕП мають різний

знак. Така відмінність дає можливість за включення ВСП у резонансний контур вибором режиму відлаштуватись від змін зазору. Очевидно, що положення робочої точки на залежності імпедансу ВСП від ПЕП для немагнетного ОК залежить від двох параметрів – ПЕП і робочої частоти. Тобто необхідну чутливість до змін ПЕП (σ) у низькопровідних матеріалах, до яких належить мідна руда, можна досягнути відповідним збільшенням робочої частоти f .

Можливим способом виділення корисної інформації параметричного ВСП є використання резонансного режиму, який передбачає його увімкнення у послідовному або паралельному коливальному контурі [12–14]. Цей режим надає можливість виділення інформаційної складової зміни імпедансу ВСП з відлаштуванням від впливу одного з неконтрольованих параметрів ОК. Використали схему включення ВСП у коливальний контур, за якої обмотка ВСП з'єднується послідовно з конденсатором C і додатковим резистором R (рис. 2а). Їх ємність та опір підбирають так, щоб вихідна напруга $U_{\text{вих}}$, яку знімають з додаткового резистора, не залежала від змін неконтрольованого параметра P_3 . На рис. 2б подано діаграму повного імпедансу контуру за встановлення ВСП на ОК з номінальними значеннями параметрів (точка P_0), який описуємо так:

$$Z_0 = (R_{L_0} + R + R_{\text{вн}_0}) + j \left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C} - \omega L_{\text{вн}_0} \right), \quad (1)$$

де R_{L_0} і $j\omega L_0$ – відповідно активна і реактивна складові повного імпедансу котушки ВСП за відсутності ОК, $j\frac{1}{\omega C}$ – реактивний опір конденсатора C , $R_{\text{вн}_0}$ і $j\omega L_{\text{вн}_0}$ – відповідно активна і реактивна складові внесеного опору ОК з номінальними значеннями параметрів.

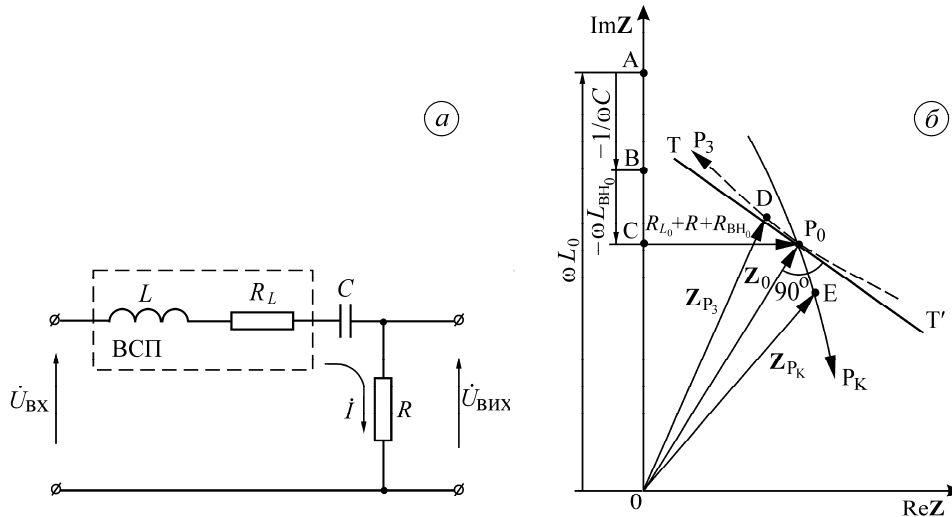


Рис. 2. Схема увімкнення параметричного ВСП у послідовному коливальному контурі (а) та діаграма комплексних опорів (б): P_0 – точка, яка відповідає встановленню ВСП на ОК з номінальними значеннями параметрів; P_3 і P_K – лінії впливу відповідно неконтрольованого і контрольованого параметрів; TT' – дотична до лінії впливу неконтрольованого параметра в точці P_0 ; Z_0 , Z_{P_3} і Z_{P_K} – вектори повного комплексного імпедансу контуру відповідно у точці P_0 та за зміни неконтрольованого (точка D) і контрольованого параметрів (точка E).

На діаграмі (рис. 2б) показано внесок кожної з вказаних складових у формування вектора повного імпедансу послідовного контуру (точки А, В, С і P₀). Значення опору резистора R та ємності конденсатора C і відповідно його реактивного опору ($-j\frac{1}{\omega C}$) підбирають так, щоб вектор повного імпедансу Z₀ утворював

прямий кут з дотичною TT' до лінії впливу неконтрольованого параметра P₃ з точки P₀. Тоді зміна параметра P₃ (у певних межах) (точка D) практично не впливає на модуль імпедансу контуру: $|Z_0| = |Z_{P_3}|$. Водночас зміна контрольованого

параметра P_K (точка E) істотно впливає на його модуль, тобто $|Z_0| \neq |Z_{P_K}|$.

З рис. 2а видно, що за сталої амплітуди вхідної напруги і параметрів елементів контуру, амплітуда вихідної залежить тільки від модуля імпедансу контуру:

$|\dot{U}_{\text{вих}}| = |\dot{U}_{\text{вх}}| \frac{R}{|Z|}$. Тому вона практично не змінюватиметься за коливань неконтрольованого параметра P₃, але суттєво залежатиме від контрольованого параметра P_K.

Резонансний режим з використанням найпростіших параметричних ВСП з однією обмоткою широко використовують у вихрострумівій дефектоскопії. Тут компенсують сигнал під час встановлення ВСП на бездефектну частину зразка, а потім під час сканування поверхні ОК реєструють відповідні зміни сигналу, обумовлені дефектом [15]. На відміну від цього для аналізу змін імпедансу, обумовлених впливом контрольованого середовища, компенсувати сигнал ВСП необхідно під час його розміщення у “повітрі”.

Зразки, обладнання і методика досліджень. Зразки мідної руди (рис. 3) – це мінерал, який складається з діориту (вмісна порода) з вкрапленнями халькопіриту (мідний колчедан). Діорит має дуже низьку ПЕП ($\sigma_d = 10^{-9}$ МСм/м), що дозволяє на робочих частотах, притаманних вихрострумівому методу, вважати його діелектриком. ПЕП халькопіриту суттєво змінюється від $\sigma_x = 10^{-5}$ до $\sigma_x = 10^{-1}$ МСм/м залежно від родовищ і вмісту домішок. Як бачимо, різниця за ПЕП діориту і халькопіриту є достатньо великою і становить щонайменше 4 порядки. Вміст високопровідного халькопіриту в багатій руді досягає 5%, в звичайній і бідній – ~ 1,5% і < 0,3%, відповідно.

Досліджувані зразки руди відрізнялися між собою різним вмістом халькопіриту і пронумеровані в порядку зростання його кількості: I – дуже малий вміст, II – малий, III – середній, IV – великий. Очевидно, що збільшення частки халькопіриту в зразках збільшує їх ефективну ПЕП. Спроба отримати об'єктивніші дані про вміст халькопіриту спектрально-оптичним методом з використанням аналізатора елементного складу Expert не дала позитивних результатів через природню неоднорідність зразків мідної руди.

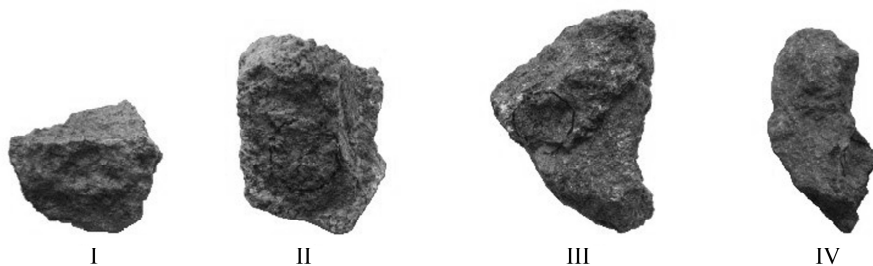


Рис. 3. Зразки мідної руди з різним вмістом халькопіриту: I – дуже малим; II – малим; III – середнім; IV – великим.

Через невеликі розміри і неправильну форму зразків для їх дослідження розробили і виготовили локальний накладний параметричний ВСП. Оскільки значення ПЕП досліджуваних зразків малі, його конструкцію оптимізували для роботи на високих частотах (одиниці–десятки МГц). Тому він має одношарову обмотку, яка складається з 10 витків емаль-проводу ПЭВ-2 діаметром 0,115 мм, намотану на діелектричному каркасі діаметром $d_k = 11$ мм і висотою $l_k = 50$ мм. Обмотка розміщена впритул до нижнього (робочого) торця каркаса. Її висота становить $l_0 = 1,6$ мм. До каркаса з боку робочого торця приклеєно склотекстолітову підкладку діаметром $d_n = 12$ мм і товщиною $T_n = 0,25$ мм для захисту від можливих пошкоджень під час контролю.

Розроблений параметричний ВСП під'єднували за допомогою коаксіального кабелю до входу універсального вихрострумового дефектоскопа типу Eddyson С, який переводили у резонансний режим з використанням його меню (пункт "Single" розділ TEST). Вибравши робочу частоту, напругу збудження та параметри підсилення, розміщували ВСП у повітрі (на віддалі від електропровідних об'єктів) і натискали кнопку "AUTO ADJUST" для автоматичного вибору значення конденсатора, який підключається в коло ВСП для реалізації резонансного режиму. Далі, продовжуючи утримувати ВСП у повітрі, його автоматично балансували натисканням на кнопку "NULL" на панелі дефектоскопа. Потім встановлювали ВСП на зразки мідної руди з різним вмістом халькопїриту (рис. 3), фіксували відповідні їм сигнали у комплексній площині на екрані дефектоскопа з реєстрацією результатів у пам'яті приладу з подальшим перенесенням на зовнішній носій типу флеш-пам'яті. Для зменшення впливу шумів сигнали обробляли за допомогою фільтра низької частоти з частотою зрізу 20 Гц.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 4а показано годографи сигналів для зразків II, III і IV, отримані на частоті 5 МГц. Видно, що вони чітко різняться між собою за амплітудою і фазою. На їх фоні сигнал від зразка I з дуже малим вмістом халькопїриту практично наближається до нуля (рис. 4б). Амплітуда сигналу зразка I у 13 разів менша за амплітуду сигналу зразка II. З цієї причини у подальшому сигнали від зразка I не знімали.

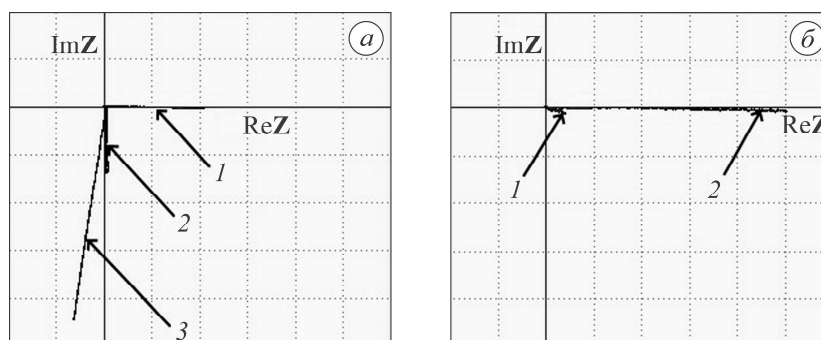


Рис. 4. Сигнали локального параметричного ВСП від зразків мідної руди з різним вмістом халькопїриту на частоті 5 МГц:
а: 1 – зразок II; 2 – III; 3 – IV; б: 1 – зразок I, 2 – II.

Аналогічні годографи сигналів для зразків II, III і IV на частотах 7 і 9 МГц подано на рис. 5. Вони отримані за збільшених на 6 дБ сумарних параметрів підсилення (у 2 рази). Згідно з цим, порівняльний аналіз наведених сигналів показує, що з ростом частоти їх амплітуда має виражену тенденцію до зменшення. Видно також, що зі збільшенням частоти від 5 до 7 МГц, зменшується також фазова чутливість розробленого ВСП до вмісту халькопїриту у зразках руди. Так, фазовий кут між сигналами від зразків II і IV на частоті 5 МГц становить 110° (рис. 4а),

а на частоті 7 МГц – 87,5° (рис. 5а). З подальшим ростом частоти до 9 МГц фазова чутливість практично не змінюється (рис. 5а і рис. 5б), а амплітуда сигналів продовжує зменшуватися.

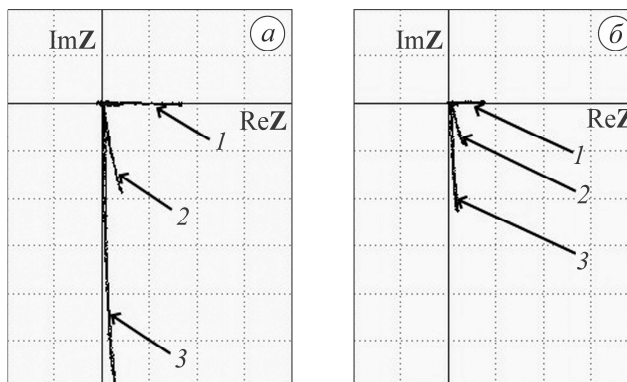


Рис. 5. Сигнали локального параметричного ВСП від зразків мідної руди з різним вмістом халькопіриту на частотах 7 (а) і 9 МГц (б) і збільшеному на 6 дБ підсиленні:
1 – зразок II; 2 – III; 3 – IV.

Слід зауважити, що точки на кінцях вектора досліджуваного сигналу параметричного ВСП відповідають розташуванню точок типового годографа зі збільшенням ПЕП (див. рис. 1). Це підтверджує можливість використання принципу ефективного середовища і поняття ефективної електричної провідності для слабопровідних гетерогенних середовищ, до яких належать мідні руди.

ВИСНОВКИ

Розроблено накладний параметричний ВСП локального типу для контролю вмісту халькопіриту в мідній руді. Досліджено його сигнали від зразків мідної руди з різним вмістом халькопіриту в резонансному режимі роботи за допомогою вихрострумowego дефектоскопа Eddyson C на частотах 5, 7 і 9 МГц. Показано принципову можливість застосування вихрострумowego методу для кількісного контролю халькопіриту в мідній руді. Встановлено, що зі зростанням частоти у вказаному діапазоні зменшуються амплітуда сигналів такого ВСП та їх фазова чутливість до вмісту халькопіриту. Це можна пояснити зменшенням чутливості ВСП до змін ПЕП з переходом у заекстремальну робочу точку комплексної площини зі збільшенням робочої частоти. Підтверджено можливість використання принципу ефективного середовища і поняття ефективної електричної провідності для слабопровідних гетерогенних середовищ, до яких належать мідні руди. Перспективним напрямком подальших досліджень можна вважати розробку інтегральних ВСП, зокрема анаксіального та екранного типів.

1. Concise mining encyclopedia. In 3 vol. Vol. 1; Biletskyi, V.S., Ed.; *Donbas, Donetsk*, 2004. (in Ukrainian)
2. Smyrnov, V.O.; Bredykhin, V.M.; Maniak, M.O.; Pozhuiev, V.I.; Chervonyi, I.F.; Hrytsai, V.P. Metallurgy of non-ferrous metals. Part 2. Beneficiation of non-ferrous metal ores; Chervonyi, I.F., Ed.; *ZDIA, Zaporizhzhia*, 2007. (in Ukrainian)
3. Mazurenko, O.H.; Smirnov, V.S.; Hutsaliuk, V.M. Effective electrical conductivity of heterogeneous media in an alternating electric field. *Scientific proceedings of Ukrainian state university of food technologies*, 2001, 10, Part 2, 156–157. (in Ukrainian)
4. Hrechko, L.H.; Hryshchuk, O.Yu.; Kunytska, L.Yu.; Lerman, L.B.; Liushchenko, M.O. Absorption of electromagnetic radiation in matrix-disperse systems with multilayer spherical inclusions, *Metallophysics and advanced technologies*, 2008, 30(6), 789–804. (in Ukrainian)

5. Uchanin, V.M.; Kulynych, Ya.P. Modeling of the influence of martensitic transformations of metastable austenitic steels on the signal of the eddy current probe. *Non-destructive testing and technical diagnostics – UkrNDT-2016*, Proceedings of the 8th National Science and Technology Conf., Kyiv, Ukraine, November 22–24, 2016; UT NKTD: Kyiv, **2016**, pp. 288–291. (in Ukrainian)
6. Lobanov, L.M.; Nekhotyashchii, V.A.; Palienko, A.L.; Bezlyudko, G.Ya. Investigation of deformational impact on 08Kh18N9 and 12Kh18N10T steels in welded vessels and pipes, *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, **2015**, 3, 7–10. (in Russian)
<https://doi.org/10.15407/tdnk2015.03.01>
7. Rybachuk, V.G.; Uchanin, V.M. Coercive force of double layer ferromagnetic materials, *Information extraction and processing*, **2021**, 49(125), 3–8. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.003>
8. Driga, V.V. Investigation of the influence of changes in the spatial location of the ore material in the magnetic field of an overhead inductive converter on the accuracy of continuous quality control of magnetite ores, *Kachestvo mineral'nogo syr'ja*, **2011**, 64–80. (in Russian)
9. Driga, V.V. Development of the mathematical model of the inductive sensor for monitoring the iron ore quality, *Kachestvo mineral'nogo syr'ia*, **2014**, 112–118. (in Russian)
10. Bazhenov, I.N.; Basov, O.O. Method of induction control of iron weight fraction in magnetite ore, *Journal of Mining Institute*, **2018**, 230, 123–130. (in Russian)
11. Dyakin, V.V.; Sandovskii, V.A. Theory and calculation of surface eddy current probes, *Nauka, Moscow*, **1981**. (in Russian)
12. Dorofeev, A.L.; Nikitin, A.I.; Rubin, A.L. Induction thickness measurement, *Energiya*, **1978**. (in Russian)
13. Gerasimov, V.G.; Pokrovskii, A.D.; Sukhorukov, V.V. Nondestructive testing. In 5 books. Book 3: Electromagnetic testing: Practical textbook; Sukhorukov, V.V., Ed.; *Vysshaya Shkola*, 1992. (in Russian)
14. Nondestructive testing and diagnostics: Ref. book; Klyuev, V.V., Ed.; *Mashinostroenie*, 2005. (in Russian)
15. Rybachuk, V.G.; Uchanin, V.M. New approach to designing multielement parametric eddy current transducers for single-channel flaw detectors, *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, **2019**, 3, 19–24. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.15407/tdnk2019.03.03>

Одержано 20.06.2022