DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-68-78

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Моркун В.С., Моркун Н. В., Олійник Т.А., Грищенко Я.О.

MODELING OF EDDY CURRENT TRANSFORMATION OF AN ELECTROMAGNETIC SIGNAL TO SOLVE THE PROBLEM OF DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF IRON ORE

Morkun V.S., Morkun N.V., Oliynyk TA., Hryshchenko Y.O.

Запропоновано метод комбінованого електромагнітного перетворення для визначення характеристик феромагнітних матеріалів. Метод заснований на формуванні електромагнітним способом пружних ультразвукових хвиль у гірському масиві, визначенні параметрів імпульсного вихрострумового перетворення, а також амплітуди, фази і частоти сформованого супутнього акустичного сигналу, що пройшов певну відстань у досліджуваному середовищі. Доведено зв'язок певних характеристичних властивостей мінералого-технологічних властивостей гірських порід із параметрами електромагнітного акустичного перетворення зондуючих сигналів. Розглянуто основні елементи моделі процесу вихрострумового перетворення, як складової частини запропонованого методу.

У пристроях вихрострумового контролю котушка збудження, керована змінним струмом, індукує вихровий струм у зразку через електромагнітний зв'язок. У свою чергу, циркуляція вихрового струму індукує вторинне магнітне поле. Це поле змінюватиметься, якщо зміниться електропровідність та магнітна проникність зразка. Зміну в полі вловлює чутливий пристрій, яким є або котушка, або магнітний датчик.

Обчислення магнітного векторного потенціалу та щільності магнітного потоку виконано із застосуванням методу розподіленого джерела струму (DCS). DCS враховує вихрові струми та намагніченість за допомогою об'ємних і поверхневих джерел струму, що дає закриті рішення для вихрових струмів, щільності магнітного потоку та електрорушійної сили.

Імпеданс є важливим параметром, що характеризує частотну характеристику датчиків вихрострумного контролю. Досліджена технологія, що дозволяє методом оптимізаційної процедури щодо обмеженої кількості сегментів мережі Foster обчислити імпеданс котушки вихрострумового датчика, його резистивну та індуктивну складові та визначити частоту, відповідно до якої ці складові дорівнюють одна одній. Ці параметри є характеристичними ознаками властивостей феромагнітних корисних копалин, зокрема мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Для практичної реалізації такого підходу запропоновано застосовувати метод інтелектуального розпізнавання із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої системи.

***Ключові слова**: електромагнітний перетворювач, фізичні параметри, моделювання, вихрові струми.*

Вступ. Випробування із застосуванням вихрових струмів дає можливість вимірювати фізичні параметри досліджуваного середовища та наявність в ньому структурних порушень. Електромагнітні перетворення в процесі вихрострумового контролю, засновані на рівняннях Максвелла. Їх можна вирішити як у часовій, так і в частотній областях [1]. Для рішень у частотній області часові сигнали перетворюються спочатку в частотний спектр за допомогою перетворення Фур'є, а потім, пройшовши певну обробку, отримують зворотнє перетворення у часову область для отримання кінцевих результатів. Як і в багатьох інших інженерних задачах, у вихрострумових

дослідженнях використовуються як аналітичні, так і числові моделі.

Останні аналітичні рішення, які якісно описують перехідні сигнали вихрових струмів у керованих напругою ланцюгах збудження, застосовуються для випадку коаксіального зонда, що оточує довгу феромагнітну провідну трубку [2]. Використовуючи прямі рішення, розроблений новий зворотний метод, який дозволяє одночасно і точно характеризувати магнітну проникність і електропровідність. Зокрема, метод розглядає обчислені площі під масштабованими перехідними кривими сигналу вихрових струмів. У узагальненому випадку кілька характеристичних параметрів виділяються з одного перехідного сигналу, скориставшись властивістю диференціювання в частотній області перетворення Лапласа. Проведені експерименти показують, що значення проникності та провідності, розраховані для різноманітних феромагнітних і неферомагнітних трубок, добре узгоджуються із вимірюваними значеннями [2].

Відомі два основних метода вихрострумового контролю, які пов'язані з режимом збудження датчика: імпульсний та синусоїдальний. При використанні імпульсного режиму електромагнітне поле створюється джерелом імпульсного струму змінної амплітуди та тривалості. Цей метод відомий як метод імпульсних вихрових струмів (PEC) [3]. Техніка PEC допускає велику сферу застосування, проте вимагає складного аналізу [4,5]. З іншого боку, при синусоїдальному режимі збудження на датчик подається синусоїдальний струм заданої частоти.

Відомий також багаточастотний синусоїдальний метод за яким різні синусоїдальні складові об'єднуються в одному сигналі. Це дозволяє регулювати амплітуду певної частотної складової. Багаточастотний синусоїдальний сигнал визначається наступним виразом [6]

$$S_M(t) = \sum_{k=1}^{N_s} S_k \sin(2\pi f_k t + \emptyset_k) \qquad (1)$$

де $\emptyset_k$ та f_k фаза і частота k-й синусоїди, N_s - кількість складових.

Обмеження пікової потужності є важливим у практичних додатках. Знижуючи пікову потужність та максимізуючи загальну енергію, що подається у фіксований час t, можна також максимізувати відношення амплітуди корисного сигналу до шуму (SNR) [7, 8].

Порівняно з традиційним вихрострумовим обстеженням, імпульсний вихровий струм (PEC) може забезпечити реакцію в широкому частотному діапазоні та використовувати більше інформації як у часовій, так і в частотній областях. Однак спостерігається ефект відриву, шум вимірювання та окислення поверхні зразка, які негативно впливають на характеристику часової області під час класифікації PEC досліджуваних зразків [9]. У цій роботі запропоновано спектральний аналіз (SA) і SA після вейвлет-розкладу (SA-WD) для виділення ознак. Аналіз головних компонентів (PCA) і лінійний дискримінантний аналіз (PCA-LDA) спрямовано на протидію розмірним методам, які використовуються для надання нижчих розмірних ознак. Класифікатор Байєса також застосовується для класифікації дефектів. Експериментальні результати демонструють, що тріщини та порожнини на поверхні та під поверхнею зразка можна задовільно класифікувати за допомогою запропонованих методів [9].

У роботі [10] на основі аналітичних рішень у часовій області для моделі PEC феромагнітних пластин провідність і проникність визначаються за допомогою оберненої задачі, встановленої за допомогою розрахованих і виміряних значень індукованої напруги. Метод PEC для вимірювання провідності перевіряється за допомогою методу чотирьох точок зонда на трьох пластинах з вуглецевої сталі. Крім того, досліджено вплив амплітуди імпульсного струму збудження та відриву котушок зонда на результати вимірювань.

Прикладом практичного застосування вихрострумового перетворення є виділення кольорових металів з твердих відходів [11]. Електромагнітна індукція може спричиняти взаємодію між частинками кольорових металів, змінювати силові стани частинок і посилювати невпорядкованість траєкторій під час руху та поділу частинок. Під змінним магнітним полем, створюваним обертовим магнітним роликом, кольорові метали піддаються впливу вихрових струмів і спрямовуються в різні приймальні резервуари, завдяки чому досягається поділ між кольоровими металами та неметалами, а також між різними кольоровими металами. У роботі [11] наведено результати досліджень щодо аналізу змін у магнітному полі, вихровому струмі, силі вихрового струму, траєкторії руху та точці приземлення частинки. Розкрито механізм взаємодії між частинками за рахунок електромагнітної індукції та запропоновано спосіб реалізації, що використовує силу взаємодії між частинками.

Таблиця

Усереднені значення фізичних параметрів, що характеризують властивості основних різновидів гірських порід

Гірські породи	Щільність, г/см^3	Швидкість хвиль		Магнітна сприйнятливість, 10^{-5} од. SI	Питомий електричний опір, Ом · м
		Vp, км/с	*Vs*, км/с		
Магматичні					
Ультраосновні (піроксеніт, перидотит)	3,2–3,3	7,5	4,5	1000–25 000	10^5–10^8
Основні (габро, діорит)	2,9–3,0	6,0	3,8	300–15 000	10^4–10^7
Кислі (грандіорит, граніт)	2,7	4,6	3,3	100–45 000	10^3–10^6
Ефузивні (діабаз, базальт)	2,9	3,5	3,0	500–150 000	10^5–10^6
Метаморфічні					
Гнейси, сланці	2,7	3,8	3,2	100–20 000	10^3–10^5
Осадові					
Скельні (вапняк, доломіт)	2,6	2	1,8	50–2500	100–10^5
Уламкові (піски, гравійно-галькові)	2,3	0,8	0,5	50–5000	100–10^3
Пластичні (глина, аргіліт)	1,2–2,4	1,5	0,4	10–3000	100–10^3

У роботі [12] запропоновано використовувати метод комбінованого електромагнітного перетворення для визначення характеристик феромагнітних матеріалів, Метод заснований на формуванні електромагнітним способом пружних ультразвукових хвиль у гірському масиві, визначенні параметрів імпульсного вихрострумового перетворення, а також амплітуди, фази і частоти сформованого супутнього акустичного сигналу, що пройшов певну відстань у досліджуваному середовищі. Метод заснований на наявності певних характеристичних властивостей мінералого-технологічних різновидів гірських порід, які можуть бути визначені із використанням електромагнітного акустичного перетворення зондуючих сигналів. В таблиці наведено усереднені значення деяких параметрів, що характеризують фізичні властивості основних різновидів гірських порід (*Vp* та *Vs* – швидкості поширення поздовжніх та поперечних пружних хвиль у гірських породах).

Практичне застосування запропонованого методу свідчить про пряму залежність надійності отриманих результатів від якості моделювання залежностей, що використані для його реалізації.

Метою роботи є моделювання основних скдадових і визначення характеристичних параметрів вихрострумового перетворення електромагнітного сигналу для розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди.

Викладання основного матеріалу. У пристроях вихрострумового контролю котушка збудження індукує вихровий струм у зразку через електромагнітний зв'язок. У свою чергу, циркуляція вихрового струму індукує вторинне магнітне поле. Це поле змінюватиметься, якщо присутній дефект, який перешкоджає вихровим струмам, або зміниться електропровідність, магнітна проникність або товщина зразка. Зміну в полі вловлює чутливий пристрій, яким зазвичай є або котушка, або магнітний датчик. Проникнення та щільність вихрового струму в зразку є важливим питанням при реалізації методу контроля на його основі. Проникнення обмежене завдяки скін-ефекту, внаслідок чого його щільність експоненціально зменшується з глибиною. Глибина скін-слою δ визначається як [13].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\varpi\mu\sigma}} \qquad (2)$$

де δ - глибина слою (м), μ - магнітна проникність (Гн/м), σ - електропровідність (См/м), а ω - кутова частота (рад/с).

Основоположним при розробці пристроїв вихрострумового контролю є обчислення магнітного поля, створюваного котушкою, яка містить певну кількість витків. У статичному випадку поле можна визначити шляхом

інтегрування вздовж дроту в обчисленні Біо-Савара [14]. Однак, якщо використовується велика кількість витків, ця процедура стає непомірно дорогою. У таких випадках потрібен альтернативний метод обчислення магнітного поля, особливо якщо передбачається якийсь тип оптимізації, у якому потрібна велика кількість обчислень поля. У роботі [15] запропоновано простий метод обчислення магнітного поля, створюваного круглою котушкою, яка містить велику кількість витків, намотаних на соленоїд прямокутного перерізу. Таким чином, котушка апроксимується круглим кільцем, що містить безперервну постійну густину струму, що дуже близько до реальної ситуації, коли використовується дріт прямокутного перетину. Процедура передбачає обчислення функцій, які визначаються як інтеграли періодичних величин. Це точно й ефективно виконується за допомогою квадратури трапеції.

У роботі [15] зроблено припущення про те, що фактичний соленоїд можна замінити областю з постійною густиною струму J_0. Це наближення стає точнішим із збільшенням N. Якщо соленоїд містить велику кількість N щільно намотаних витків дроту, через який проходить деякий струм I_0, тоді в котушці існує ефективна (постійна) щільність струму J_0

$$J_0 = \frac{NI_0}{4ab} \tag{3}$$

При цьому мається на увазі, що вісь z декартової системи координат лежить уздовж центральної лінії котушки, а нижня і верхня поверхні котушки лежать на площинах $z = -a$ та $z = a$ відповідно. Внутрішня і зовнішня поверхні котушки мають радіуси $r = R_0 - b$ та $r = R_0 + b$.

З рівнянь Максвелла випливає, що магнітну індукцію $\boldsymbol{B}$ для статичного поля можна вивести з магнітного векторного потенціалу з використанням формули [14,15]

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}) = \mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}) \tag{4}$$

де $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})$ задано узагальненим законом Біо-Савара [14] у формі

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}) = \frac{\mu}{4\pi}\iiint_V \frac{\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}')}{(\boldsymbol{r}'-\boldsymbol{r})}dV' \tag{5}$$

де μ - магнітна проникність повітря поза котушкою.

У виразі (5) штриховані змінні відносяться до вихідних точок всередині соленоїда ($\boldsymbol{r}'$), а нештриховані змінні позначають точки поля поза ним ($\boldsymbol{r}$).

Циліндричні полярні координати вибираються так, що точка джерела $\boldsymbol{r}'$ має компоненти (r', θ', z'), а точка поля $\boldsymbol{r}$ представлена як (r, θ, z). Якщо $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$ та $\boldsymbol{k}$ позначають одиничні вектори, спрямовані вздовж осей x, y та z декартової системи координат, відповідно, тоді відповідними одиничними векторами в напрямках r, θ та z у точці поля є $\boldsymbol{e}_r$, $\boldsymbol{e}_\theta$ та $\boldsymbol{k}$, де

$$\boldsymbol{e}_r = \cos\theta\boldsymbol{i} + \sin\theta\boldsymbol{j} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{e}_\theta = -\sin\theta\boldsymbol{i} + \cos\theta\boldsymbol{j} \tag{7}$$

У полярних координатах вектор щільності струму $\boldsymbol{J}$ у (5) має вигляд

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}') = J_0\boldsymbol{e}'_\theta \tag{8}$$

де J_0 - постійна щільність струму, задана в (3).

У роботі [15] показано, що магнітний векторний потенціал $\boldsymbol{A}$, заданий формулою (5), має лише один компонент у θ-напрямку, тому

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}) = A_\theta(r,z)\boldsymbol{e}_\theta \tag{9}$$

$$A_\theta(r,z) = \frac{\mu J_0}{2\pi}\int_{z'=-a}^{a}\int_{r'=R_0-b}^{R_0+b} M(r',z';r,z)r'dr'dz' \tag{10}$$

де

$$M(r',z';r,z) = \int_0^\pi \frac{\cos\beta d\beta}{[(r')^2 + r^2 - 2rr'\cos\beta + (z'-z)^2]^{1/2}} \tag{11}$$

Оскільки векторний потенціал $\boldsymbol{A}$ має лише одну компоненту, поле магнітної індукції в (4) має просту форму [15]

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}) = -\frac{\partial}{\partial z}(A_\theta)\boldsymbol{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta)\boldsymbol{k}\,. \tag{12}$$

Для представлення магнітної індукції в декартовій формі $\boldsymbol{B} = (B_x, B_y, B_z)$ компоненти поля отримуються з (6)-(12) і можуть бути записані у вигляді

$$B_x = -\frac{x}{r}\frac{\partial}{\partial z}(A_\theta)\,, \tag{13}$$

$$B_y = -\frac{y}{r}\frac{\partial}{\partial z}(A_\theta)\,, \tag{14}$$

$$B_z = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta)\,, \tag{15}$$

де $x = r\cos\theta$ та $y = r\sin\theta$ відповідно до звичайних умов для циліндричних полярних координат.

Обчислення магнітного векторного потенціалу A та щільності магнітного потоку B виконано із застосуванням методу розподіленого джерела струму (DCS) та засобів, наведених у роботах [16,17]. DCS - це метод моделювання динамічних реакцій вихрових струмів, викликаних об'єктами. На відміну від звичайних чисельних методів, таких як метод скінченних елементів, DCS враховує вихрові струми та намагніченість за допомогою об'ємних і поверхневих джерел струму, що дає закриті рішення для вихрових струмів, щільності магнітного потоку та електрорушійної сили. При розрахунках використані наступні параметри котушки: внутрішній радіус котушки - 5e-3 м; зовнішній радіус котушки - 10e-3 м; довжина індуктора – 7.5e-3 м. Розрахунок проведений для кількості 50, 100 та 150 витків котушки. На рис. 1 наведено результати обчислення векторного потенціалу A у θ-напрямку із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) [14] та методу DCS [16], а на рис. 2,3 представлено результати обчислення щільності магнітного потоку B_r та B_z для тих же умов.

Отримані результати свідчать про те що метод DCS практично не поступається за точністю класичному методу із застосуванням потрійного інтегралу але потребує на порядок менше часу та обчислювальних ресурсів. Це дозволяє використовувати саме цей метод для формування алгоритмічної бази засобів вихрострумового контролю.

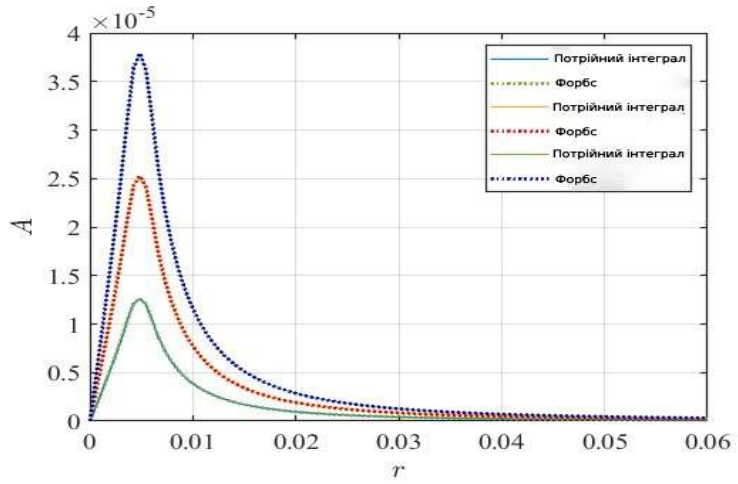


Рис. 1. Результати обчислення векторного потенціалу A соленоїду із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) та методу DCS

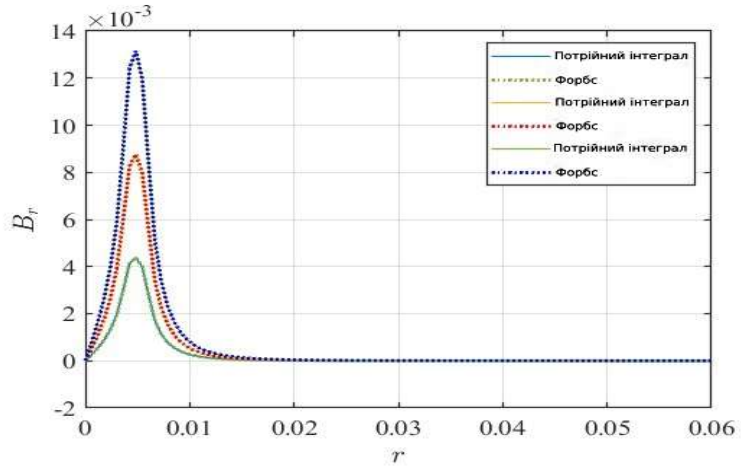


Рис. 2. Результати обчислення щільності магнітного потоку B_r соленоїду із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) та методу DCS

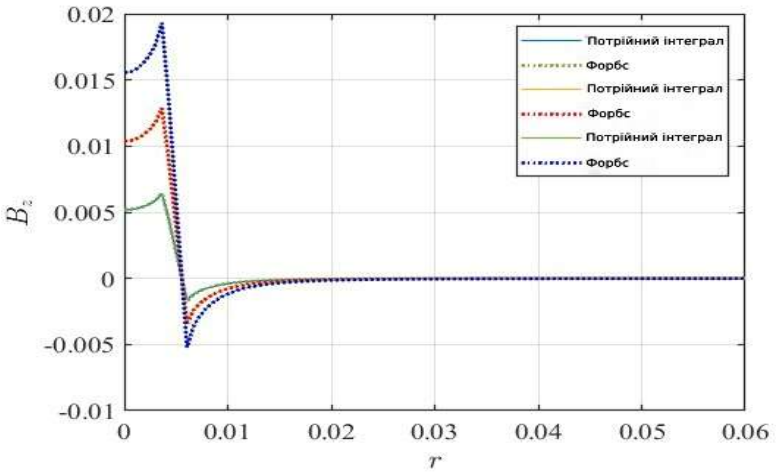


Рис. 3. Результати обчислення щільності магнітного потоку B_z соленоїду із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) та методу DCS

I. Імпеданс є важливим параметром, що характеризує частотну характеристику датчиків вихрострумного контролю. Зазвичай імпеданс визначається як повний опір пристрою або ланцюга протікання змінного струму заданої частоти і представляється комплексною величиною [18]. Вектор імпедансу складається з дійсної частини R і уявної частини X. Дійсна частина є опір, а уявна частина позначає реактивний опір, який може бути або індуктивним, або ємнісним. Для отримання імпедансу необхідно виміряти як дійсну, так і уявну частини. У роботі [19] надано інформацію стосовно основних методів, що застосовуються для цього.

Розрахунок електричного опору котушки, включаючи вихрові струми у циліндричному сердечнику, наведено у роботі [20]. Динаміка вихрових струмів визначається напруженістю магнітного поля **H** феромагнітного матеріалу з втратами, що регулюється рівнянням дифузії

$$\nabla^2\mathbf{H} = \sigma\mu\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \tag{16}$$

де μ - магнітна проникність, а σ - електропровідність матеріалу.

Індуктивність індуктора без вихрових струмів з котушкою з N витків, радіусом a, намотаними на магнітопроводі з проникністю μ і довжиною ℓ визначається виразом [20]

$$L_0 = \mu N^2 2\pi a^2/l \tag{17}$$

З урахуванням наведеного імпеданс можна обчислити за формулою [20,21]

$$Z = jwL_0\left[\frac{2J_1(j\beta\alpha)}{j\beta\alpha J_0(j\beta\alpha)}\right] \tag{18}$$

де $\beta = \sqrt{jw\sigma\mu}$; σ – електропровідність матеріалу сердечника.

В області низьких частот $|\beta a| \ll 1$ і останній множник у рівнянні (17) наближається до одиниці. Таким чином, низькочастотна індуктивність L_0 визначається рівнянням (17). Тобто це значення, яке може бути розраховано для сердечника без вихрових струмів.

У високочастотній асимптотичній області $|\beta a| \gg 1$ і імпеданс стає

$$Z \to \sqrt{jwL_0R_0} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{wL_0R_0} \tag{19}$$

де опір R_0 (не є фактичним фіксованим опором) визначається як

$$R_0 = \frac{4\pi N^2}{\sigma l}\,. \tag{20}$$

У термінах, використаних у рівнянні (17), можна отримати

$$\beta a = 2\sqrt{jw\,L_0/R_0} \tag{21}$$

Значення R_0 можна обчислити на основі детального знання конструкції або його можна визначити з вимірювання імпедансу в асимптотичній області високої частоти та за допомогою рівняння (19). Фактично, на всіх частотах імпеданс повністю характеризується значеннями L_0 і R_0, використовуючи рівняння (17) і (21).

Приклад розрахованого таким чином імпедансу показано на рис. 4. При цьому застосовані сценарій та засоби, наведені у роботах [22,23]. Розрахунок проведений для R_0 = 0.75 Ом та L_0 = 0.004 Гн.

З цього графіка можна побачити, що імпеданс є індуктивним на низьких частотах з індуктивністю L_0, і стає напівіндуктивним на частоті, де $R_0 = jwL_0$, і залишається напівіндуктивним на всіх вищих частотах.

У роботі [21] доведено, що цей імпеданс можна моделювати за допомогою нескінченної сходової мережі Cauer. Усічення цієї мережі забезпечує наближення з обмеженою смугою, яке є дуже точним на низьких частотах і стає менш точним із збільшенням частоти. Хоча ця мережа може забезпечити довільну точність, для цього потрібно багато компонентів [21].

Велика кількість компонентів, необхідна для точності мережі Cauer, спонукає до пошуку альтернативи з меншою кількістю компонентів [24-26]. Мережа Foster (послідовне з'єднання набору паралельних ділянок *LR*) може забезпечити розумну точність з набагато меншою кількістю компонентів.

Запропонований у роботі [21-24] метод, полягає у використанні структури Foster та запуску завдання оптимізації для вибору значень компонентів, які мінімізують помилку апроксимації імпедансу. Вирішується задача знаходження мережі Foster, імпеданс якої приблизно збігається з опором наведеної вище котушки з втратами. При цьому R і L є векторами значень для резисторів і котушок індуктивності в мережі і значення цих векторів обираються таким чином, щоб мінімізувати помилку в наближенні «точного» значення, обчисленого вище.

Результати цього процесу оптимізації показані на рис. 5. Це наближення використовує чотири пари Foster [21,22].

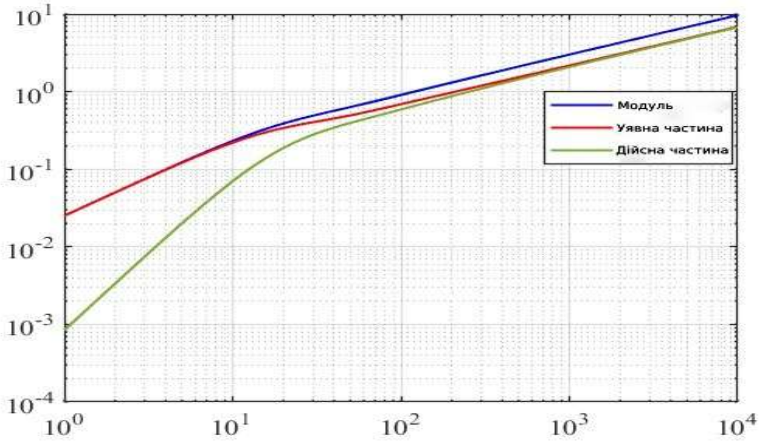


Рис. 4. Електричний опір вихрострумового датчика, змодельованого у вигляді циліндричного індуктора із сердечником з магнітного матеріалу

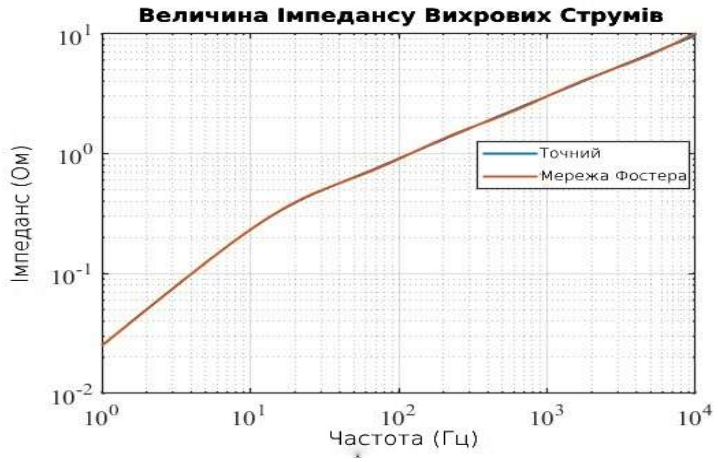


Рис. 5. Результат виконання оптимізаційної процедури щодо компонентів мережі Foster для наближення імпедансу індуктора до теоретичного значення

Як слідує з рис. 5 використана процедура обчислення значень резисторів Foster та котушок індуктивності дають прийнятне наближення до імпедансу котушки: два отриманих графіка важко розрізнити.

Досліджений у роботі [12] акустичний перетворювач електромагнітного типу (ЕМАП) являє собою розподілену структуру, що складається з джерела змінного магнітного поля і деякого об'єму феромагнітного компонента гірської породи, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань частинок середовища. Разом з тим також відбуваються зміни імпедансу ЕМАП в залежності від характеристик гірської породи.

Наведена вище технологія дозволяє методом оптимізаційної процедури щодо обмеженої кількості сегментів мережи Foster обчислити імпеданс котушки вихрострумового датчика, його резистивну та індуктивну складові та визначити частоту, відповідно до якої ці складові дорівнюють одна одній. Ці параметри є характеристичними ознаками властивостей феромагнітних корисних копалин, зокрема мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Для практичної реалізації такого підходу доцільно застосовувати метод інтелектуального розпізнавання із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої системи, опис якої надано у роботах [27-29].

Висновки. Запропонований метод визначення характеристик залізної руди на основі електромагнітного акустичного перетворення. Він включає формування під дією імпульсного магнітного поля у феромагнітному середовищі ультразвукових хвиль та вихрових струменів, визначення супутніх параметрів, що характеризують ці процеси та їх узгодження з властивостями середовища, де вони відбуваються. Розглянуто основні елементи моделі процесу вихрострумового перетворення, як складової частини запропонованого методу.

Основоположним при розробці пристроїв вихрострумового контролю є обчислення магнітного поля, створюваного котушкою, яка містить певну кількість витків. Вихрові струми в матеріалах магнітного сердечника викликані змінними в часі магнітними полями. Ці зміни щільності поля індукують потенціали напруги всередині матеріалу, змушуючи струм протікати в замкнутих контурах. Доведено доцільність застосування методу розподіленого джерела струму для обчислення магнітного векторного потенціалу та щільності магнітного потоку у котущці вихрострумового датчику.

Імпеданс є важливим параметром, що характеризує частотну характеристику датчиків вихрострумного контролю. Він визначається як повний опір датчика або ланцюга протікання змінного струму заданої частоти і представляється комплексною величиною. Для підвищення точності визначення імпедансу вихрострумового датчика доцільно використовувати модель на основі мережи Foster та оптимізаційну процедуру для вибору значень компонентів, які мінімізують помилку апроксимації цього параметру.

Таким чином, отримані результати дозволяють сформувати основні елементи моделі вихрострумового перетворення для реалізації комбінованого електромагнітного акустичного методу визначення характеристик залізної руди.

Література

1. Li Y, Tian G Y, Simm A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation. NDT E Int., 2008, 41(6): 477–483.
2. Desjardins D, Krause T W, Clapham L. Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity. *NDT E Int.*, 2016, 80: 65–70.
3. Ala Eddine Lakhdari, Ahmed Cheriet, Islam Nacereddine El-Ghoul. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. IET Circuits, Devices & Systems. 2019, Volume13, Issue2, p. 255-259. https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322.
4. Bour, J.-C., Zubiri, E., Vasseur, P. et. al. Étude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructive. J. Phys. III, 1996, 6, (1), pp. 7– 22.
5. Popovic, Z., Popovic, B.D. Introductory electromagnetics. (Prentice hall Upper Saddle River, NJ, USA, 2000).
6. Kharudin Bin Ali, Ahmed N. Abdalla, Damhuji Rifai, Moneer A. Faraj. Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization. IET Circuits, Devices & Systems, Special Issue: Developments and Advancements on Electronics Education. 2017, Volume 11, Issue 4, P. 338-351. doi: 10.1049/iet-cds.2016.0327.
7. Betta G., Ferrigno L., Laracca M., et al: ‘Optimized complex signals for eddy current testing’. IEEE Instrumentation Measurement Technology Conf., 2014, pp. 1120–1125
8. Schroeder M.R.: ‘Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low

autocorrelation', IEEE Trans. Inf. Theory, 1970, 16, (1), pp. 85–89
9. Xuanbing Qiu, Peng Zhang, Jilin Wei, Xiaochao C ui, Chao Wei, Lulu Liu. Defect classification by pulsed eddy current technique in con-casting slabs based on spectrum analysis and wavelet decomposition. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 203, 1 December 2013, Pages 272-281. https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.004.
10. Xingle Chen, Yinzhao Lei. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. - NDT & E International, Volume 75, October 2015, Pages 33-38. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.005.
11. Zhicheng Shan, Yi Yuan, Bin Cao, Shilong Miao, Guojian Li, Qiang Wang. The effect of interaction between particles on eddy current separation. - Separation and Purification Technology, Volume 346, 2024, 127382. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127382.
12. Моркун В. С., Моркун Н. В., Грищенко С.М., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Бобров Є. Ю. Моделювання електромагнітного акустичного перетворювача. Гірничий вісник, Кривий Ріг, 2023. Вип. 111. с. 88-95.
13. Sophian, A., Tian, G. & Fan, M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. Chin. J. Mech. *Eng.* 30, 500–514 (2017). https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4.
14. S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Dum, Fields and Waves in Communication Electronics.
15. Forbes, L. K., Crozier, S., Doddrell, D. M. Rapid computation of static fields produced by thick circular solenoids. - IEEE Transactions on Magnetics, 1997, vol. 33, issue 5, pp. 4405-4410. DOI:10.1109/20.620453.
16. B. J. Hao, K. M. Lee, and K. Bai, "Distributed current source modeling method for 3D eddy current problem in magnetic conductor with discrete state-space J-φ formulation," Journal of Computational Physics, vol. 401, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.jcp.2019.109027.
17. Distributed Current Source. https://github.com/wei-chen-li/Distributed-Current-Source.
18. Xia, Z.; Huang, R.; Chen, Z.;Yu, K.; Zhang, Z.; Salas-Avila, J.R.; Yin, W. Eddy Current Measurement for Planar Structures. Sensors 2022, 22,8695. https://doi.org/10.3390/s22228695.
19. Technologies Keysight. Impedance Measurement Handbook. Available online: www.keysight.com.
20. Vanderkooy, J., A Model of Loudspeaker Driver Impedance incorporating eddy currents in the pole structure," J. Audio Eng. Soc., 37(37), pp. 119-128, 1989.
21. Thompson, S. C. and Warren, D. M., "Analog circuit model for loudspeakers including eddy current behavior and suitable for time domain simulation," AES Convention Paper 9826, 143rd Convention, 2017.
22. Steve Thompson. MathWorks files for inductor with eddy currents in core. https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core.
23. Thompson, Stephen Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core [Data set]. Scholarsphere. 2024. https://doi.org/10.26207/3h14-4190.
24. Thompson, S. C., Warren, D. M. and Gabrielson, T. B. Analog model for thermoviscous propagation in a cylindrical tube, J. Acoust. Soc. Am.135(2) pp. 585-590.
25. Bilbao, S. and Harrison, R., "Passive time-domain numerical models of viscothermal wave propagation in acoustic tubes of variable cross section," J. Acoust. Soc. Am.140(1) 728 (2016). doi: 10.1121/1.4959025.
26. Thibault, A. and Chabassier, J., "Dissipative time-domain one-dimensional model for viscothermal acoustic propagation in wind instruments," J. Acoust. Soc. Am.150(2) 1165 (2021). doi: 10.1121/10.0005537
27. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. Mining of Mineral Deposits. 2024. *18*(3), 1-8. https://doi.org/10.33271/mining18.03.001.
28. Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Gaponenko, A. Mineralogical Analysis of Iron Ore Using Ultrasonic Wave Propagation Parameters. - Acta Mechanica et Automatica, 2023, 17(3), p. 364-371.
29. Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Serdiuk O.Y., Haponenko A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties recognition. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, No 6, pp. 19-24. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019.

References

1. Li Y, Tian G Y, Simm A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation. NDT E Int., 2008, 41(6): 477–483.
2. Desjardins D, Krause T W, Clapham L. Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity. NDT E Int., 2016, 80: 65–70.
3. Ala Eddine Lakhdari, Ahmed Cheriet, Islam Nacereddine El-Ghoul. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. IET Circuits, Devices & Systems. 2019, Volume13, Issue2, p. 255-259. https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322.
4. Bour, J.-C., Zubiri, E., Vasseur, P. et. al. Étude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructive. J. Phys. III, 1996, 6, (1), pp. 7– 22.

5. Popovic, Z., Popovic, B.D. Introductory electromagnetics. (Prentice hall Upper Saddle River, NJ, USA, 2000).
6. Kharudin Bin Ali, Ahmed N. Abdalla, Damhuji Rifai, Moneer A. Faraj. Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization. IET Circuits, Devices & Systems, Special Issue: Developments and Advancements on Electronics Education. 2017, Volume 11, Issue 4, P. 338-351. doi: 10.1049/iet-cds.2016.0327.
7. Betta G., Ferrigno L., Laracca M., et al: 'Optimized complex signals for eddy current testing'. IEEE Instrumentation Measurement Technology Conf., 2014, pp. 1120–1125
8. Schroeder M.R.: 'Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation', IEEE Trans. Inf. Theory, 1970, 16, (1), pp. 85–89
9. Xuanbing Qiu, Peng Zhang, Jilin Wei, Xiaochao C ui, Chao Wei, Lulu Liu. Defect classification by pulsed eddy current technique in con-casting slabs based on spectrum analysis and wavelet decomposition. - Sensors and Actuators A: Physical, Volume 203, 1 December 2013, Pages 272-281. https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.004.
10. Xingle Chen, Yinzhao Lei. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. - NDT & E International, Volume 75, October 2015, Pages 33-38. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.005.
11. Zhicheng Shan, Yi Yuan, Bin Cao, Shilong Miao, Guojian Li, Qiang Wang. The effect of interaction between particles on eddy current separation. - Separation and Purification Technology, Volume 346, 2024, 127382. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127382.
12. Morkun V. S., Morkun N. V., Ghryshhenko S.M., Ghaponenko A. A., Ghaponenko I. A., Bobrov Je. Ju. Modeljuvannja elektromaghnitnogho akustychnogho peretvorjuvacha. Ghirnychyj visnyk, Kryvyj Righ, 2023. Vyp. 111. S. 88-95.
13. Sophian, A., Tian, G. & Fan, M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. Chin. J. Mech. Eng. 30, 500–514 (2017). https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4.
14. S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Dum, Fields and Waves in Communication Electronics.
15. Forbes, L. K., Crozier, S., Doddrell, D. M. Rapid computation of static fields produced by thick circular solenoids. - IEEE Transactions on Magnetics, 1997, vol. 33, issue 5, pp. 4405-4410. DOI:10.1109/20.620453.
16. B. J. Hao, K. M. Lee, and K. Bai, "Distributed current source modeling method for 3D eddy current problem in magnetic conductor with discrete state-space J-φ formulation," Journal of Computational Physics, Vol. 401, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.jcp.2019.109027.
17. Distributed Current Source. https://github.com/wei-chen-li/Distributed-Current-Source.
18. Xia, Z.; Huang, R.; Chen, Z.;Yu, K.; Zhang, Z.; Salas-Avila, J.R.; Yin, W. Eddy Current Measurement for Planar Structures. Sensors 2022, 22,8695. https://doi.org/10.3390/s22228695.
19. Technologies Keysight. Impedance Measurement Handbook. Available online: www.keysight.com.
20. Vanderkooy, J., A Model of Loudspeaker Driver Impedance incorporating eddy currents in the pole structure," J. Audio Eng. Soc., 37(37), Pp. 119-128, 1989.
21. Thompson, S. C. and Warren, D. M., "Analog circuit model for loudspeakers including eddy current behavior and suitable for time domain simulation," AES Convention Paper 9826, 143rd Convention, 2017.
22. Steve Thompson. MathWorks files for inductor with eddy currents in core. https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core.
23. Thompson, Stephen Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core [Data set]. Scholarsphere. 2024. https://doi.org/10.26207/3h14-4190.
24. Thompson, S. C., Warren, D. M. and Gabrielson, T. B. Analog model for thermoviscous propagation in a cylindrical tube, J. Acoust. Soc. Am.135(2) pp. 585-590.
25. Bilbao, S. and Harrison, R., "Passive time-domain numerical models of viscothermal wave propagation in acoustic tubes of variable cross section," J. Acoust. Soc. Am.140(1) 728 (2016). doi: 10.1121/1.4959025.
26. Thibault, A. and Chabassier, J., "Dissipative time-domain one-dimensional model for viscothermal acoustic propagation in wind instruments," J. Acoust. Soc. Am.150(2) 1165 (2021). doi: 10.1121/10.0005537
27. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. Mining of Mineral Deposits. 2024. 18(3), 1-8. https://doi.org/10.33271/mining18.03.001.
28. Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Gaponenko, A. Mineralogical Analysis of Iron Ore Using Ultrasonic Wave Propagation Parameters. - Acta Mechanica et Automatica, 2023, 17(3), p. 364-371.
29. Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Serdiuk O.Y., Haponenko A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties recognition. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, No 6, pp. 19-24. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019.

Morkun V.S., Morkun N.V., Oliynyk TA., Hryshchenko Y.O. **Modeling of eddy current transformation of an electromagnetic signal to solve the problem of determining the characteristics of iron ore**

The method of combined electromagnetic transformation for determining the characteristics of ferromagnetic materials is proposed. The method is based on the formation of elastic ultrasonic waves in a rock mass by electromagnetic means and the determination of the parameters of the pulsed eddy current transformation, as well as the amplitude, phase, and frequency of the generated accompanying acoustic signal that has traveled a certain distance in the studied environment. The connection of certain characteristic properties of mineralogical and technological properties of rocks with the parameters of electromagnetic acoustic transformation of sounding signals is proved. The main elements of the model of the eddy-current transformation process as an integral part of the proposed method are considered.

In eddy-current monitoring devices, an AC-driven excitation coil induces an eddy current in the sample through electromagnetic coupling. In turn, the circulation of the eddy current induces a secondary magnetic field. This field will change if the electrical conductivity and magnetic permeability of the sample change. The change in the field is detected by a sensing device, which is either a coil or a magnetic sensor.

The magnetic vector potential and magnetic flux density are calculated using the distributed current source (DCS) method. DCS takes into account eddy currents and magnetization using bulk and surface current sources, which provides closed-form solutions for eddy currents, magnetic flux density, and electromotive force.

The impedance is an important parameter characterizing the frequency response of eddy current sensors. A technology has been investigated that allows, using an optimization procedure for a limited number of segments of the Foster network, to calculate the impedance of the eddy current sensor coil, its resistive and inductive components, and to determine the frequency at which these components are equal to each other. These parameters are characteristic features of the properties of ferromagnetic minerals, in particular, mineralogical and technological types of iron ore. For the practical implementation of this approach, it is proposed to apply the method of intelligent recognition using an adaptive neuro-fuzzy system.

Keywords: *electromagnetic transducer, physical parameters, modeling, eddy currents.*

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Олійник Тетяна Антоліївна – д-р техн. наук, проф., завідувачка кафедри збагачення корисних копалин і хімії Криворізького національного університету (Кривий Ріг), zkkh@knu.edu.ua

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Стаття подана 03.03.2025.