

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-46-55>

УДК 622.7: 534

ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Моркун Н.В., Азарян А.А., Грищенко С.М.,
Рубан С.А., Гриценко А.М., Гапоненко А.А.

FORMATION OF AN INFORMATION BASE FOR AUTOMATED CONTROL OF THE WELL DRILLING PROCESS

Morkun N.V., Azaryan A.A., Hryshchenko S., M.,
Ruban S. A., Gritsenko A. M., Gaponenko A.A.

Запропоновано метод інформаційного забезпечення автоматизованого керування процесом буріння свердловин у залізовмісних породах на основі електромагнітного вихрострумowego перетворення зондуючих сигналів. При моделюванні залежностей параметрів вихрострумowego датчика від характеристик досліджуваного середовища використана його трансформаторна модель у вигляді двох котушок з повітряними сердечниками, розташованими одна над одною на певній відстані. Трансформаторна модель вихрострумowego датчика адекватно відображає процеси, що у ньому відбуваються при зміні електропровідності та магнітної проникності досліджуваного зразка. Первинний контур трансформаторної моделі представляє вимірювальну котушку датчика. Досліджуване середовище утворює вторинний контур трансформаторної моделі. Імпеданс вимірювальної котушки залежить від фізико-хімічних та текстурно-структурних властивостей досліджуваного середовища, а також від робочої частоти джерела струму датчика. Дійсна частина імпедансу визначається опором контуру, у якому протікають вихрові струми. Імпеданс датчика та спектральна характеристика вимірюваного сигналу доцільно застосовувати для оцінки характеристик досліджуваного середовища. Для апробації підходу використана експериментальна платформа та комбінований електромагнітний перетворювач. Комбінований зонд розміщується над середовищем, у якому одночасно збуджуються та приймаються ультразвуковий сигнал та сигнал вихрових струмів. Моделювання параметрів комбінованого датчика дозволило визначити і формалізувати зв'язок параметрів вимірювальної котушки датчика з характеристиками досліджуваного середовища.

Виконаний аналіз показав, що використання параметрів вихрострумowego перетворення у наборі з ультразвуковими вимірюваннями покращує результати розпізнавання основних мінералогіко-технологічних різновидів залізовмісних руд експлуатованого родовища. Одержані результати дозволяють підвищити ефективність автоматизованого керування процесом буріння свердловин у процесі видобутку залізовмісних руд із застосуванням інформації про фізико-механічні характеристики та геологічну структуру породи, що буриться.

Ключові слова: буріння, свердловина, керування, автоматизація, характеристики, електромагнітний перетворювач.

Вступ. Оптимізація параметрів буріння є вирішальною методологією для підвищення швидкості проходки (ROP) і служить важливою стратегією для досягнення зниження витрат та підвищення ефективності в буровій техніці. Оптимізація параметрів буріння може проводитися на основі моделі динаміки бурильної колоні та моделі ROP. Тим не менш, залишається помітна прогалина в дослідженнях оптимізації параметрів буріння з використанням багатоелементних методів, що розглядають обидві моделі одночасно. Перспективним підходом є створення комплексної повномасштабної моделі динаміки бурильної колоні поряд з моделлю прогнозування та оптимізації ROP на основі штучних нейронних мереж (ANN). Враховуючи ефективність

передачі енергії, інтенсивність вібрації та різні фактори, що впливають на ROP під час процесу буріння, доцільним є використання багатoelementних методів [1]. Але застосування такого підходу потребує відповідного інформаційного забезпечення.

Вимірювання під час буріння є основним засобом отримання параметрів свердловинного інженерного забезпечення в режимі реального часу. Сучасні одноточкові, двоточкові та багатоточкові інтелектуальні вимірювальні системи бурильної колони можуть забезпечити раннє виявлення газових скорочень, витоків та інших умов [2]. Однак ці методи мають недоліки, такі як висока вартість використання та обмежені можливості стосовно визначення характеристик залізородних порід.

Неруйнівний контроль металовмісних матеріалів, є зростаючою сферою, яка потребує нових сенсорних рішень. Датчики вихрових струмів – це пристрої, здатні безконтактно оцінювати з високою роздільною здатністю будь-яку електропровідну мішень. Висока роздільна здатність і толерантність до забрудненого середовища роблять датчики вихрових струмів незамінними в сучасних промислових операціях. Одним із застосувань датчиків вихрових струмів є вимірювання електропровідності.

Величина електропровідності матеріалу залежить від його хімічного складу і кристалічної будови [3].

У роботі [4] розглянуто теоретичні основи конструювання датчиків вихрових струмів. Такі датчики вимірюють провідність матеріалів шляхом індукції вихрових струмів і спостереження за впливом на вимірювальну котушку датчика, що дозволяє спростити його конструкцію та обіцяє економічну перевагу при реалізації. Опис відповідної моделі реалізовано за допомогою еквівалентної схеми RLC. Розроблена модель перевірена шляхом порівняння з експериментальними спостереженнями. Результат сприяє кращому розумінню фізичних ефектів та параметрів вихрострумового перетворення для використання у майбутніх розробках конструкції датчиків.

У якості вимірюваного параметру при реалізації методу вихрострумового контролю може використовуватися імпеданс котушки датчика, який пов'язаний з електропровідністю та магнітною проникністю зразків [5]. Завдяки наявності залежності між цими змінними, випробування на основі ефекту вихрострумового перетворення дозволяють

виявити пошкодження матеріалів та контролювати стан технологічного процесу [6]. У роботі [7] наведено результати дослідження з випробування твердості для оцінки знеуглецювання сталі. Методи вихрових струмів також використовують варіацію відриву для вимірювання товщини покриття непровідних матеріалів або товщини оксиду провідних матеріалів [8].

Для вивчення впливу геометричної структури вимірювальної котушки на електромагнітні характеристики зонда в процесі вихрострумового контролю у роботі [9] досліджені різні моделі зондової котушки. Ці моделі геометричної структури включають різницю між внутрішнім і зовнішнім радіусами, товщиною та еквівалентним радіусом. Розподіл магнітного поля навколо зонда моделюється та аналізується за різними параметрами, а ефективність вимірювань оцінюється в поєднанні зі швидкістю зміни магнітного поля навколо котушки зонда. Результати моделювання показують, що при ближчому розташуванні збільшення різниці між внутрішнім і зовнішнім радіусами, зменшення товщини та зменшення еквівалентного радіуса є корисними для покращення роздільної здатності вимірювань.

Вихрострумові датчики переміщення (ECDS) широко використовуються для безконтактного вимірювання положення малих переміщень (відривів). Проблеми виникають із більшими переміщеннями, оскільки чутливість ECDS зменшується. Це призводить до більш вираженого впливу змін температури на індуктивність і, як наслідок, збільшення похибки позиціонування. Конструкційні рішення часто покладаються на кілька котушок, відповідні матеріали для опор котушок і компенсаційні заходи для вирішення проблем. У дослідженні [10] представлено ECDS з однією котушкою для великих діапазонів переміщення в середовищах із високими температурами та коливаннями температури. Аналіз базується на моделі датчика, отриманій з моделі еквівалентної схеми (ECM). Ключовою частиною покращення характеристик датчика за змінних температур є температурна компенсація індуктивності чутливої котушки на основі моделі. Виконаний аналіз показує, що ця конструкція ECDS з однією котушкою зберігає похибку положення менше ніж 0,2% повної шкали для зміни температури 100 K для чутливої котушки та 110 K для мішені.

У роботі [11] представлено комплексний аналіз того, як розробити датчик вихрових струмів (ECS) з високою роздільною здатністю та низьким тепловим дрейфом. Для пояснення впливу цільової провідності та робочої частоти на чутливість і стабільність ECS досліджена еквівалентна модель на основі трансформатора. Взаємозв'язки між параметрами ECS і цільовими умовами отримані за допомогою аналізу кінцевих елементів (FEA). Отримані результати доводять, що датчик, працюючий на вищій частоті та з кращою провідністю, має покращені характеристики. Нова високопродуктивна схема синхронної демодуляції на основі моста була розроблена для точного окремого вимірювання крихітних коливань індуктивності та опору котушки датчика. Було виготовлено та випробувано прототип ECS. Результати показують, що загальний шум цього ECS від 0,1 Гц до 100 Гц становив лише 70 μmTms (середньоквадратичне значення), а температурний дрейф менше 3 $\text{nm}/^\circ\text{C}$.

У роботі [12] наведено результати розробки та аналізу вихрострумowego датчика переміщення малого розміру. За результатами моделювання визначено оптимальну структуру обмотки та розміри датчика. Використано лінійний підхід для перетворення сигналу зміщення змінного струму датчика в сигнал постійного струму. Нарешті, запропоновано метод компенсації для пом'якшення температурного дрейфу датчика при різних робочих температурах. Результати експериментів показують, що запропонований датчик має чутливість приблизно 3 μm , робочий температурний діапазон 25–55 $^\circ\text{C}$ і лінійність $\pm 1,025\%$.

Таким чином, метод вихрострумowego контролю є перспективним щодо оперативного вимірювання характеристик рудних матеріалів але можливості та умови його використання при бурінні свердловин потребують додаткових досліджень.

Метою роботи є обґрунтування використання методу електромагнітного вихрострумowego перетворення та принципів побудови засобів визначення фізико-механічних хіміко-мінералогічних характеристик залізної руди на його основі для формування інформаційної бази автоматизованого керування процесом буріння свердловин.

Викладання основного матеріалу. Метод вихрострумowych вимірювань базується на

фундаментальних рівняннях Максвелла на основі яких можна отримати наступний вираз [13]

$$\nabla^2 H - (j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon)H = 0, \quad (1)$$

де H - напруженість магнітного поля; σ - провідність; ϵ - діелектрична проникність; μ - магнітна проникність; ∇ - оператор дивергенції.

Рівняння (1) можна записати у приблизній формі

$$\nabla^2 H - j\omega\mu\sigma H = 0. \quad (2)$$

Тоді можна отримати

$$\nabla^2 E - j\omega\mu\sigma E = 0, \quad (3)$$

$$\nabla^2 J - j\omega\mu\sigma J = 0, \quad (4)$$

де E - напруженість електричного поля; J - густина струму.

Вирази (2)-(4) є теоретичною основою вихрострумовой технології. З рівняння (1) випливає, що формою руху електромагнітного поля є хвиля.

Концентрація індукованого вихрового струму поблизу поверхні досліджуваного провідного матеріалу пов'язана з явищем скін-ефекту. Трансформаторна модель вихрострумowego датчика добре відбиває процеси, що у ньому відбуваються, коли характеристики досліджуваного середовища змінюються [14-16]. Первинний контур трансформаторної моделі, імпеданс якої дорівнює відношенню $Z_c = \frac{U}{I}$, представляє котушку датчика (рис. 1) [15].

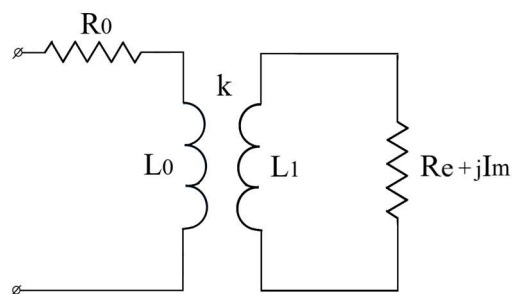


Рис. 1. Трансформаторна модель вихрострумowego датчика

Досліджуване середовище утворює вторинний контур трансформаторної моделі. Дійсна частина імпедансу Re визначається опором контуру, у якому протікають вихрові струми, тобто опір Re пропорційний питомому

опору досліджуваного середовища. Уявний член $j\text{Im}$ є індуктивністю розсіювання контуру. Нарешті, коефіцієнт зв'язку k визначається відстанню між датчиком та досліджуваним середовищем. Коефіцієнт k зменшується із збільшенням відстані.

При моделюванні залежностей параметрів вихрострумового датчика від характеристик досліджуваного середовища зручно використовувати його модель у вигляді двох котушок з повітряними сердечниками, розташованими одна над одною на відстані L_0 [17-19].

На датчик (повітряна котушка C_0) подається синусоїдальний струм $i(t) = I_0 \cos(\omega t)$. Досліджуваний матеріал змодельований у вигляді віртуальної котушки (котушка з повітряним сердечником C_p). Вихровий струм $i_{ind}(t)$ протікає у цій віртуальній котушці з повітряним сердечником C_p . Електричний потенціал на котушках C_0 і C_p визначається як

$$u(t) = R_0 i(t) + L_0 \partial_i i(t) + M \partial_i i_{ind}(t), \quad (5)$$

$$0 = R i_{ind}(t) + L \partial_i i_{ind}(t) + M \partial_i i(t), \quad (6)$$

де R_0 , L_0 , R , L та M - відповідно опір, власна індуктивність датчика (котушка C_0), опір, власна індуктивність віртуальної котушки C_0 , взаємна індуктивність між цими котушками.

З (5) і (6) можна отримати напругу U , прикладену до датчика, як

$$U = (R_0 + j\omega L_0) I_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R + j\omega L} I_0. \quad (7)$$

Імпеданс датчика Z визначається шляхом поділу напруги U на струм джерела I_0

$$Z = R_0 + \frac{R\omega^2 M^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + j \left[\omega L_0 - \frac{L\omega^3 M^2}{R^2 + \omega^2 L^2} \right]. \quad (8)$$

Значення R та L можна розглядати як еквівалентний опір та індуктивність досліджуваного матеріалу. Тоді поверхневий імпеданс Z_s визначається виразом

$$Z_s = R + j\omega L. \quad (9)$$

Імпеданс Z_s залежить від фізико-хімічних та текстурно-структурних властивостей досліджуваного середовища, а також від робочої частоти джерела струму датчика [19].

Рівняння імпедансу датчика (8) можна представити у такому вигляді

$$Z = R_0 + \frac{\text{Re}(Z_s)\omega^2 M^2}{\text{Re}^2(Z_s) + \text{Im}^2(Z_s)} + j \left[\omega L_0 - \frac{\text{Im}(Z_s)\omega^2 M^2}{\text{Re}^2(Z_s) + \text{Im}^2(Z_s)} \right]. \quad (10)$$

При використанні диференціального методу вимірювань вираз (10) дозволяє просто обчислити зміну імпедансу ΔZ , що визначається як різниця між імпедансом датчика, розміщеного над еталонним зразком з відомими характеристиками (Z_1), і імпедансом датчика щодо досліджуваного зразка (Z_2) [17,19]

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = \frac{\text{Re}(Z_{s1})\omega^2 M_1^2}{\text{Re}^2(Z_{s1}) + \text{Im}^2(Z_{s1})} - \frac{\text{Re}(Z_{s2})\omega^2 M_2^2}{\text{Re}^2(Z_{s2}) + \text{Im}^2(Z_{s2})} + j \left[\frac{\text{Im}(Z_{s2})\omega^2 M_2^2}{\text{Re}^2(Z_{s2}) + \text{Im}^2(Z_{s2})} - \frac{\text{Im}(Z_{s1})\omega^2 M_1^2}{\text{Re}^2(Z_{s1}) + \text{Im}^2(Z_{s1})} \right]. \quad (11)$$

Перевагою системи, що реалізує диференціальний метод вимірювань (рис. 2), є у тому, що вона забезпечує автоматичну температурну компенсацію [14].

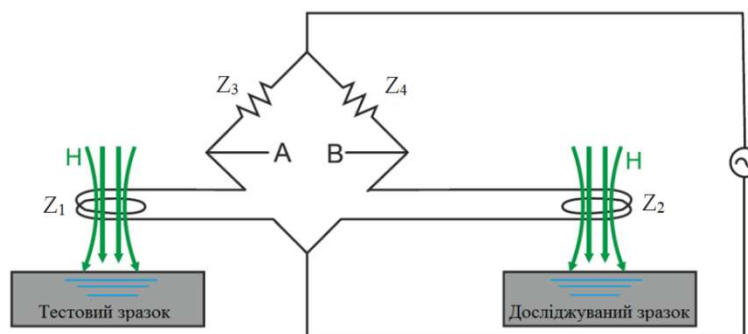


Рис. 2. Схема моделі, що реалізує диференціальний метод вихрострумових вимірювань

Функція збудження імпульсної напруги, що використовується в моделі, може бути виражена як [20]

$$u(t) = \left(1 - e^{\frac{t-d}{a}}\right) \text{step}(t-d) + \left(e^{\frac{t-\tau-d}{a}} - 1\right) \text{step}(t-\tau-d) \quad (0 \leq t \leq T), \quad (12)$$

де a - час наростання, d - час затримки, $\text{step}(t)$ - одинична крокова функція, τ - затримка ширини імпульсу, а T - період.

Щоб отримати частотні компоненти сигналу напруги, швидко перетворення Фур'є (FFT) використовується для перетворення сигналу напруги в часовій області у частотну область

$$\sum_{n=1}^N U(w_n) = \text{FFT}[u(t)], \quad (13)$$

де N - кількість точок вибірки FFT.

Коли котушка збуджується імпульсною напругою, дуже легко виявити зміну струму котушки. Поточну зміну частотної області можна розрахувати за допомогою рівняння [20]

$$\sum_{n=1}^N \Delta I(w_n) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{Z_{air}(w_n)} - \frac{1}{Z_c(w_n)} \right] U(w_n), \quad (14)$$

де $Z_{air}(w_n)$ - повний опір котушки в повітрі; $Z_c(w_n)$ - повний опір котушки в середовищі.

Слід зазначити, що опір і індуктивність котушки в повітрі постійні. Індуктивний опір пропорційний частоті збудження та індуктивності котушки $Z_{air}(w_n)$ можна легко виміряти в реальних експериментах.

Спрощена версія рівняння (14) має вигляд [20]

$$\sum_{n=1}^N \Delta I(w_n) = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta Z(w_n)}{\sum_{n=1}^N [Z_{air}(w_n)[Z_{air}(w_n) + \Delta Z(w_n)]} U(w_n), \quad (15)$$

де $U(w_n)$ обчислюється за допомогою рівняння (13).

Сигнал відповіді РЕС у часовій області можна отримати шляхом застосування операції зворотного перетворення Фур'є (IFFT) до формули (15)

$$\Delta I(t) = \text{IFFT}[\sum_{n=1}^N \Delta I(w_n)]. \quad (16)$$

Для моделювання вихрострумowego датчика застосована платформа та програмні продукти Simscape Matlab/Simulink® [21-23]. На рис. 3 наведена схема моделі для дослідження характеристик вихрострумowego датчика.

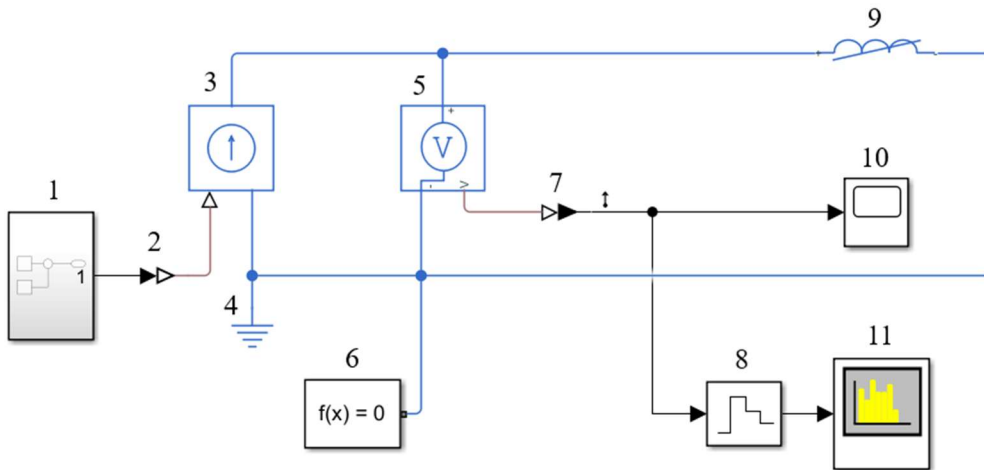


Рис. 3. Схема моделі для дослідження характеристик вихрострумowego датчика:

1 – блок формування параметрів електромагнітних імпульсів; 2 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 – блок Controlled Current Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 4 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 5 – блок Voltage Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 6 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 7 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 8 – блок Zero-Order Hold із бібліотеки Simulink / Discrete; 9 – блок Inductor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 10 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 11 – блок Spectrum Analyzer із бібліотеки DSP System Toolbox / Sinks

Блок 1 формування параметрів електромагнітних імпульсів у просторі Simulink генерує імпульси обраної амплітуди, частоти та форми, які за допомогою блока 2 Simulink-PS Converter та блока 3 Controlled Current Source перетворюють їх у фізичний сигнал у просторі Simscape. Блок 9 Inductor моделює лінійний індуктор, описаний таким рівнянням

$$U = L \frac{dI}{dt}, \quad (17)$$

де U – напруга; L – індуктивність; I – струм; t – час.

Параметри цього блока встановлюються безпосередньо у специфікації блока або програмується у робочому просторі Matlab. Результати моделювання відображаються блоком 5 Voltage Sensor, блоком 10 Scope та блоком 11 Spectrum Analyzer. Необхідне при цьому перетворення сигналів виконується блоком 7 PS-Simulink та блоком 8 Zero-Order Hold.

Наведена на рис. 3 схема дозволяє моделювати параметри вихрострумowego датчика як в часовій, так і в частотній області.

На рис. 4 наведено спектрограму сигналу на вимірювальній котушці вихрострумowego датчика.

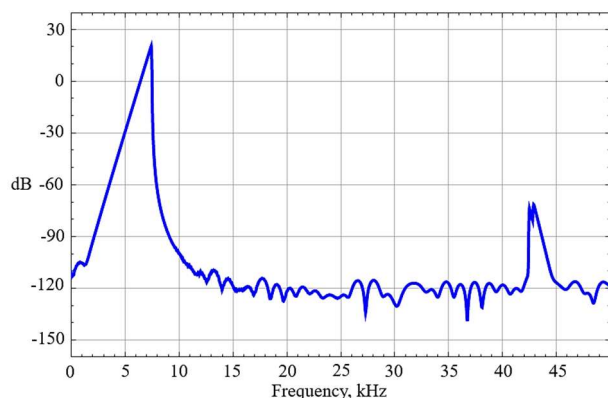


Рис. 4. Спектрограма сигналу на вимірювальній котушці вихрострумowego датчика

Для апробації наведеного вище підходу використано експериментальну платформу та комбінований електромагнітний перетворювач [24,25]. Комбінований зонд розміщується над середовищем, у якому одночасно збуджуються та приймаються ультразвуковий сигнал та сигнал вихрових струмів.

Комбінований перетворювач складається зі спіральної котушки та постійного магніту NdFeB. Котушка виготовлена на основі гнучкої

друкованої плати (FPC) і має діаметр 16 мм та 25 витків. Діаметр магніту 17,5 мм, висота 18 мм, залишковий магнетизм 1,15 Тл. Для збудження та обробки вимірюного сигналу, включаючи обмеження, багатоступінчасте посилення та смугову фільтрацію використана універсальна ультразвукова система з комп'ютерним керуванням RITEC RAM - 5000. Використана система забезпечує імпульсні ультразвукові вимірювання та резонансну спектроскопію. Фазочутливий супергетеродинний приймач здатен виділяти сигнали із шуму, характеризувати досліджувані матеріали шляхом вимірювання затухання, швидкості розповсюдження або резонансних частот, що охоплює діапазон від 50 кГц до 40 МГц. Стробований підсилювач забезпечує високу потужність радіочастотних пакетних імпульсів до 5 кВт, RMS до 7 МГц. Доступна багатоканальна система генератор/приймач із незалежним керуванням шириною пакету, частотою, затримкою та фазою для кожного вихідного сигналу.

Запропонований підхід використаний для модернізації методу визначення мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища [26]. За цим методом у якості інтегративного параметру S , який визначається дисперсією та середніми значеннями інтенсивності прийнятого формаційної бази для ідентифікації мінералогічних різновидів залізної руди застосовуються результати вимірювання швидкості та затухання поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль відповідної частоти, на основі яких обчислюється акустичні добротності зразка гірської породи, та характер ультразвукового сигналу, який пройшов певну відстань у досліджуваному середовищі. Нечітка класифікація цих параметрів, що ґрунтується на аналізі їх властивостей у векторному просторі ознак, дозволяє шляхом мінімізації суми зважених відстаней між аналізованими та зразковими значеннями результатів вимірювань віднести досліджуваний зразок з певним ступенем належності до основних технологічних типів руд експлуатованого родовища. Виконаний аналіз показав, що додавання до зазначеного набору інформативних ознак такого параметра, як імпеданс вихрострумowego датчика, дозволяє на 8-10% покращити результати розпізнавання різновидів руди в умовах зміни її текстурно-структурних особливостей.

Висновки. Аналіз стану досліджень виявив значну кількість наукових праць, присвячених дослідженню закономірностей, математичному й імітаційному моделюванню процесів буріння свердловин при видобутку залізорудної сировини із застосування різних методів оперативного контролю параметрів процесів. Водночас, варто відзначити, що застосування згаданих методів і засобів потребує відповідного математичного апарату, який би дозволив здійснити формалізацію зв'язків між параметрами процесу буріння та характеристиками мінералого-технологічних різновидів залізорудної сировини, що утворюють гірську породу.

Досліджений метод електромагнітного вихрострумowego контролю має низку переваг перед існуючими підходами, що застосовуються для оцінки характеристик гірської породи під час буріння свердловин, і може бути ефективно застосований для покращення якості інформаційного забезпечення та оптимізації цього процесу.

Напрямок подальших досліджень слід вважати визначення експлуатаційних можливостей запропонованого методу вимірювання характеристик залізозмісних руд в процесі буріння свердловин із врахуванням існуючих збурюючих факторів та перешкод у реальних виробничих умовах.

Література

1. Hai W., He Y., Li Y., Shan Y., Wang C., Xue Q. Multi-element drilling parameter optimization based on drillstring dynamics and ROP model. *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol. 244. P. 213460. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213460>.
2. Li M., Wang H., Liao M., Yang Y. Field Measurement and Retrieval Research of Multi-physics Micro-measurement Devices During the Drilling Process in Oil and Gas Wells. In: Zhou, K. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering*. ICCES 2024. Mechanisms and Machine Science. 2024. Vol. 168. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68775-4_65.
3. Rodrigues N., Luis S. Rosado. Development of a miniaturized electrical conductivity gauge based on eddy currents testing. 2016. DOI:10.13140/RG.2.2.23860.17289.
4. Harms J., & Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021. Vol.6, No 1. P. 37. <https://doi.org/10.3390/I3S2021Dresden-10103>.
5. Zergoug M., Lebaili S., Boudjellal H., Benchaala A. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. *NDT & E International*. 2004. Vol. 37, P. 65–72. DOI:10.1016/j.ndteint.2003.09.002
6. García-Martín J., Gómez-Gil J., & Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*. 2011. Vol.11, No 3. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>
7. Mercier D., Lesage J., Decoopman X., Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. *NDT & E International*. 2006. Vol. 39. P. 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.04.005>.
8. Pedersen L.B., Magnusson K.Å., Zhengsheng Y. Eddy current testing of thin layers using co-planar coils. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2013. Vol.12. P.53–64. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00164000005>.
9. Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
10. Gruber G., Schweighofer B., Berger M., Leitner T., Kloesch G., & Wegleiter H. Eddy Current Position Measurement in Harsh Environments: A Temperature Compensation and Calibration Approach. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/s24051483>.
11. Wang H., Liu Y., Li W., Feng Z. Design of Ultraprecise and High Resolution Eddy-Current Displacement Sensor System. Conference: IECON 2014-40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, At: Dallas, TX, USA. DOI:10.1109/IECON.2014.7048828.
12. Wang S.-C., Xie B.-R., & Huang S.-M. Design and Analysis of Small Size Eddy Current Displacement Sensor. *Sensors*. 2022. Vol.22, No. 19. P. 7444. <https://doi.org/10.3390/s22197444>.
13. Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
14. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors* 2011. Vol. 11. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
15. Placko D., Dufour I. Eddy current sensors for nondestructive inspection of graphite composite materials. In *Proceedings of the IEEE Conference of the Industry Applications Society (IAS'92)*, Houston, TX, USA, October 1992. P. 1676-1682.
16. Xu P., Huang S., Zhao W. Differential eddy current testing sensor composed of double gradient winding coils for crack detection. In *Proceedings of the*

- IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2010), Limerick, Ireland, February 2010. P. 59-63.
17. Lakhdari Ala Eddine, Cheriet A., Nacereddine El-Ghoul I. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. *IET Circuits, Devices & Systems*. 2019. Vol.13, No. 1.2, P. 255-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>
 18. Libby H.L. Introduction to electromagnetic nondestructive test methods. Wiley-Interscience, New York, USA, 1971.
 19. Krahenbuhl L., Muller D. Thin layers in electrical engineering-example of shell models in analysing eddy-currents by boundary and finite element methods. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993. Vol. 29, No. 2. P.1450–1455. URL: <https://hal.science/hal-00082820v1/document>.
 20. Xue Z., Fan M., Cao B. and Wen D. A fast numerical method for the analytical model of pulsed eddy current for pipelines. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2020. Vol. 62, No 1. P. 27-33(7). DOI: 10.1784/insi.2020.62.1.27.
 21. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
 22. Thompson S. Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core. [Data set]. *Scholarsphere*. 2024. <https://doi.org/10.26207/3h14-4190>.
 23. Thompson S. 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>.
 24. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. Vol. 21, No. 1.P. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
 25. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. Vol.57, No. 1.P. 88-95.
 26. 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., Vol. 18, No 1.P. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
 244. P. 213460. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213460>.
 2. Li M., Wang H., Liao Ml., Yang Y. Field Measurement and Retrieval Research of Multiphysics Micro-measurement Devices During the Drilling Process in Oil and Gas Wells. In: Zhou, K. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering*. ICCES 2024. Mechanisms and Machine Science. 2024. Vol. 168. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68775-4_65.
 3. Rodrigues N., Luis S. Rosado. Development of a miniaturized electrical conductivity gauge based on eddy currents testing. 2016. DOI:10.13140/RG.2.2.23860.17289.
 4. Harms J., & Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021. Vol.6, No 1. P. 37. <https://doi.org/10.3390/I3S2021Dresden-10103>.
 5. Zergoug M., Lebaili S., Boudjellal H., Benchaala A. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. *NDT & E International*. 2004. Vol. 37, P. 65–72. DOI:10.1016/j.ndteint.2003.09.002
 6. García-Martín J., Gómez-Gil J., & Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*. 2011. Vol.11, No 3. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>
 7. Mercier D., Lesage J., Decoopman X., Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. *NDT & E International*. 2006. Vol. 39. P. 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.04.005>.
 8. Pedersen L.B., Magnusson K.Å., Zhengsheng Y. Eddy current testing of thin layers using co-planar coils. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2013. Vol.12. P.53–64. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s001640000005>.
 9. Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
 10. Gruber G., Schweighofer B., Berger M., Leitner T., Kloesch G., & Wegleiter H. Eddy Current Position Measurement in Harsh Environments: A Temperature Compensation and Calibration Approach. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/s24051483>.
 11. Wang H., Liu Y., Li W., Feng Z. Design of Ultraprecise and High Resolution Eddy-Current Displacement Sensor System. *Conference: IECON 2014-40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, At: Dallas, TX, USA. DOI:10.1109/IECON.2014.7048828.
 12. Wang S.-C., Xie B.-R., & Huang S.-M. Design and Analysis of Small Size Eddy Current Displacement

References

1. Hai W., He Y., Li Y., Shan Y., Wang C., Xue Q. Multi-element drilling parameter optimization based on drillstring dynamics and ROP model. *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol.

- Sensor. Sensors. 2022. Vol.22, No. 19. P. 7444. <https://doi.org/10.3390/s22197444>.
13. Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
 14. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. Sensors 2011. Vol. 11. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
 15. Placko D., Dufour I. Eddy current sensors for nondestructive inspection of graphite composite materials. In Proceedings of the IEEE Conference of the Industry Applications Society (IAS'92), Houston, TX, USA, October 1992. P. 1676-1682.
 16. Xu P., Huang S., Zhao W. Differential eddy current testing sensor composed of double gradient winding coils for crack detection. In Proceedings of the IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2010), Limerick, Ireland, February 2010. P. 59-63.
 17. Lakhdari Ala Eddine, Cheriet A., Nacereddine El-Ghoul I. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. IET Circuits, Devices & Systems. 2019. Vol.13, No. I.2, P. 255-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>
 18. Libby H.L. Introduction to electromagnetic nondestructive test methods. Wiley-Interscience, New York, USA, 1971.
 19. Krahenbuhl L., Muller D. Thin layers in electrical engineering-example of shell models in analysing eddy-currents by boundary and finite element methods. IEEE Transactions on Magnetism, 1993. Vol. 29, No. 2. P.1450-1455. URL: <https://hal.science/hal-00082820v1/document>.
 20. Xue Z., Fan M., Cao B. and Wen D. A fast numerical method for the analytical model of pulsed eddy current for pipelines. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2020. Vol. 62, No 1. P. 27-33(7).
a. DOI: 10.1784/insi.2020.62.1.27.
 21. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
 22. Thompson S. Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core. [Data set]. Scholarsphere. 2024. <https://doi.org/10.26207/3h14-4190>.
 23. Thompson S. MathWorks files for inductor with eddy currents in core.
a. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core>.
 24. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. Journal of Kryvyi Rih National University. 2023. Vol. 21, No. 1.P. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
 25. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. Mining Journal of Kryvyi Rih National University. 2023. Vol.57, No. 1.P. 88-95.
 26. 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., Vol. 18, No 1.P. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
- Morkun N. V., Azaryan A.A., Hryshchenko S. M., Ruban S. A., Gritsenko A. M., Gaponenko A. A. Formation of an information base for automated control of the well drilling process**
- A method of information support for automated control of the process of drilling wells in iron-bearing rocks based on electromagnetic eddy current conversion of sensing signals is proposed. When modeling the dependence of the eddy current sensor parameters on the characteristics of the medium under study, we used its transformer model in the form of two coils with air cores located at a certain distance above each other. The transformer model of the eddy current sensor adequately reflects the processes that occur in it when the electrical conductivity and magnetic permeability of the sample under study change. The primary circuit of the transformer model represents the measuring coil of the sensor. The test medium forms the secondary circuit of the transformer model. The impedance of the measuring coil depends on the physical, chemical, and textural properties of the medium under test, as well as on the operating frequency of the sensor current source. The real part of the impedance is determined by the resistance of the circuit in which eddy currents flow. The sensor impedance and the spectral characteristic of the measured signal can be used to evaluate the characteristics of the medium under study. The experimental platform and combined electromagnetic transducer were used to test the approach. The combined probe is placed above the medium in which the ultrasonic signal and eddy current signal are simultaneously excited and received. Modeling of the parameters of the combined probe allowed us to determine and formalize the relationship between the parameters of the measuring coil of the probe and the characteristics of the medium under study. The analysis has shown that the use of eddy-current transformation parameters in combination with ultrasonic measurements improves the results of recognizing the main mineralogical and technological types of iron-bearing ores of the operated deposit. The obtained results make it possible to increase the efficiency of automated control of the well drilling process in the extraction of iron ores using information*

on the physical and mechanical characteristics and geological structure of the drilled rock.

Keywords: *drilling, well, control, automation, characteristics, electromagnetic converter.*

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

Азарян Альберт Арамаїсович – д-р тех. наук, проф., професор Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), azaryan325@gmail.com

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.наук., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних

технологій і систем, Державний податковий університет (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com

Рубан Сергій Анатолійович – к.тех.наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), aknt@knu.edu.ua

Грищенко Андрій Миколайович – к.тех.наук, доцент, доцент Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), s-grischenko@ukr.net

Гапоненко Альона Анатоліївна – аспірант Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), grischenko.ug@gmail.com Статтю подано 21.07.2025 р.

Стаття подана 04.08.2025.