

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-43-51>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ОЗНАК МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Моркун Н.В., Лорія М.Г., Грищенко С.М., Олійник Т.А.

MODELLING THE PROCEDURE FOR DETERMINING THE CHARACTERISTIC FEATURES OF MINERALOGICAL VARIETIES OF IRON ORE IN THE PROCESS OF DRILLING WELLS

Morkun N.V., Loria M.G., Hryshchenko S.M., Oliynyk T.A.

Буріння свердловин є найбільш поширеною та ресурсоемною технологічною операцією при видобутку корисних копалин. Економічна ефективність цієї операції напряму залежить від якості автоматизованого керування процесом, що, в свою чергу, визначається повнотою його інформаційного забезпечення. Головним чинником, що впливає на результати процесу буріння є відповідність швидкості проходки свердловин та сформованих при цьому керуючих дій фізико-механічним характеристикам гірської породи або її мінералогічним різновидам. Запропоновано метод підвищення ефективності процедури визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин на основі симуляції перетворення зонduючого електромагнітного сигналу у досліджуваному середовищі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®. Використаний підхід заснований на використанні електромагнітного перетворювача, який генерує зонduючий імпульс у залізовмісній гірській породі, що має певні електричні та магнітні властивості. В результаті у досліджуваному середовищі формуються вихрові струми, які створюють індуковане магнітне поле, впливаючи на такі параметри, як напруга на вимірювальній котушці або її імпеданс. Електромагнітні властивості матеріалу середовища впливають на розподіл цих індукованих вихрових струмів, що змінює параметри вимірювальної котушки порівняно із зразковим матеріалом. В процесі моделювання визначались параметри сигналу, вимірюного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища.

При цьому імітувались зміни співвідношення мінералів у складі різновидів залізної руди. Аналіз отриманих результатів показує сильну їх залежність від вмісту магнетиту у досліджуваному середовищі. Це ускладнює розпізнавання різновидів залізної руди, які включають інші слабوماгнітні мінерали з малою електричною провідністю. Для отримання задовільних результатів цієї процедури необхідно долучати додаткові характеристичні ознаки фізичних властивостей предмету розпізнавання, до яких, в першу чергу, слід віднести параметри розповсюдження ультразвукових хвиль, що утворюються при формуванні електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі.

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

Вступ. У світі відомо кілька тисяч родовищ залізної руди, що поширені в різних регіонах за різних геологічних умов і в різних геологічних формаціях. Залізні руди зустрічаються в найрізноманітніших геологічних середовищах у магматичних, метаморфічних або осадових породах, або як продукти вивітрювання різних первинних залізовмісних матеріалів. При видобутку залізної руди використовуються відповідні технології, обладнання та методи видобутку відповідно до умов родовищ. Протягом останніх кількох десятиліть технології буріння стрімко розвивалися, і в останні роки з'явилося кілька інноваційних

рішень для вирішення ключових проблем у гірничодобувній промисловості. Автоматизовані бурові установки стали критично важливою інновацією та рушійною силою технологічного прогресу в сучасному гірничому підприємстві. Автоматизована система керування (АСК) буровою установкою оптимізує аналітичні рішення, виводячи їх з-під контролю операторів та зменшуючи ризик людської помилки, яка може серйозно вплинути на весь процес буріння [1].

Запорукою ефективності АСК є якісна інформаційна база, що забезпечує формування керуючих дій відповідно до фізико-механічних характеристик гірської породи або її мінералогічних різновидів та стану бурового устаткування. Важливим етапом формування такої інформаційної бази є визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин. Для вирішення цієї задачі можуть бути використані різноманітні ефекти безконтактної взаємодії електромагнітного поля з досліджуваним середовищем.

У роботі [2] досліджено зразки матеріалів та їх станів за допомогою багаточастотного вихрострумовевого аналізу з високою просторовою роздільною здатністю. Такий аналіз, виконаний з використанням різних частот збудження, показав, що локальний розподіл сигналу залежить від геометрії та матеріалу зразків. Було показано, що зі збільшенням частоти різниця значень, отриманих для різних станів матеріалу, збільшується, що дозволяє надійно ідентифікувати різні стани.

Сучасне виробниче обладнання базується на результатах контролю якості, а також на параметрах процесу. У роботі [3] представлено нову систему датчиків на основі вихрових струмів, яка виконує безконтактне вимірювання магнітної анізотропії заготовки та реалізує розділення та корекцію ефектів нахилу. Принцип вимірювання демонструється на прикладі двох зразків з різними значеннями магнітної анізотропії, викликаними холодним формуванням. Обидва зразки аналізуються під різними кутами нахилу між віссю датчика та поверхнею заготовки. У цій роботі демонструється цифрова обробка сигналів отриманих вихідних даних для диференціації впливу нахилу та анізотропії з використанням попередніх результатів як прикладу двох підготовлених зразків.

У роботі [4] досліджувалася можливість виявлення механічно введених розривів за допомогою різних магнітних датчиків без намагнічування тестованого об'єкта сильним зовнішнім полем. У цьому дослідженні використовувалися диференціальні датчики (що вимірюють різницю значень поля на рівні нанотесл) та абсолютні датчики (що дозволяють вимірювати модуль вектора магнітного поля або його компоненти на рівні мікротесл). Кожен результат вимірювання, отриманий від датчиків, дозволяв виявляти розриви в лінії.

У статті [5] представлено метод зондування на основі вихрових струмів (ЕС) з обертовим сфокусованим полем, який використовує переваги фокусування магнітним полем та обертовим магнітним полем для виявлення дефектів довільної орієнтації. Результати експериментів показали, що зонд має здатність виявляти дефекти з будь-якою орієнтацією, зберігаючи при цьому ту саму чутливість, а глибину дефекту можна кількісно оцінити за допомогою амплітуди сигналу. Порівняно з існуючими зондами обертового поля, представлений зонд не потребує додаткового налаштування збудження або об'єднання даних. Водночас, завдяки своєму фокусувальному ефекту, він може генерувати сильне обертове магнітне поле в місці дефекту зі слабким фоновим шумом, що забезпечує велике співвідношення сигнал/шум.

У роботі [6] наведено принцип роботи датчика вихрових струмів та запропоновано метод виготовлення зонда. Загальний план проектування схеми обробки отриманої інформації було розроблено шляхом аналізу характеристик вихідного сигналу зонда. Зміна вихідного сигналу зонда була перетворена на імпульси різної ширини, а потім разом з опорним сигналом подавалася на цифровий фазовий дискримінатор. Вихідний сигнал цифрового фазового дискримінатора оброблявся фільтром низьких частот для отримання постійної складової. Нарешті, сигнал був посилений та скомпенсований для зменшення впливу температури. Детально описано критерії вибору частоти збуджувального сигналу та конструкцію схеми формування сигналу, а також конструкцію схеми температурної компенсації на основі цифрового потенціометра з вбудованим датчиком температури.

У феромагнітних матеріалах ключовими складовими загальних енергетичних втрат є втрати на гістерезис та вихрові струми. У

процесі проектування електромагнітних пристроїв вигідно мати точну та обчислювально недорогу модель, як це продемонстрував Hornik T. (2025) [7]. Класичні експериментальні підходи до вивчення магнітних втрат відзначаються високою трудомісткістю, значними фінансовими витратами та обмеженістю у відтворенні різноманітних режимів роботи. До того ж, вони не завжди забезпечують оперативне коригування параметрів для пошуку оптимальних рішень.

Ghoni R. та інші (2014) [8] проаналізував технічно характеристику дефектів на основі методу вихрових струмів. Розширення можливостей контролю зроблено за допомогою зондів, а комп'ютерні технології моделювання та аналізу дозволили визначити глибокі дефекти у металевих конструкціях і виконати оцінювання стану поверхні матеріалу.

Meng B. та ін. (2025) [9] запропонували рішення в часовій області для коаксіального збудження, приймальних котушок та датчиків Холла, що взаємодіють з вихровим полем в області, де вводяться сторонні металеві предмети, використовуючи підхід контролю вихрового струму. Вплив ефекту відриву на властивості класифікації та ідентифікації сторонніх металевих предметів ретельно досліджується. Результати моделювання та експериментів показують, що сигнали системи виявлення сторонніх металевих предметів, оброблені алгоритмом придушення шуму, дозволяють класифікувати та ідентифікувати положення падіння, розмір, провідність та магнітну проникність сторонніх металевих предметів на основі точки відриву, пікового значення, часу до піку та ефективного проміжку часу.

Таким чином, різноманітні ефекти, що виникають при взаємодії електромагнітного поля з феромагнітним середовищем є перспективним напрямом щодо визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин. Вихрострумові методи - ідеальне рішення для визначення властивостей різноманітних матеріалів, але з огляду на сучасні вимоги до підвищення енергоефективності та зменшення витрат, виникає необхідність у якісному їх моделюванні.

Метою роботи є підвищення ефективності процедури визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин на основі симуляції

перетворення зондуючого електромагнітного сигналу у досліджуваному середовищі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®.

Викладання основного матеріалу.

Принцип дії електромагнітного перетворювача (ЕМП) полягає у застосуванні імпульсного зондуючого сигналу, який вводиться у збуджувальну котушку, розташовану на поверхні випробуваного середовища [10]. Це збудження генерує змінне магнітне поле в середині котушки, яке, у свою чергу, індукуює вихрові струми на поверхні досліджуваного матеріалу. Вихрові струми створюють індуковане магнітне поле, яке протидіє змінам початкового змінного магнітного поля, впливаючи на такі параметри, як напруга на вимірювальній котушці або її імпеданс. Характеристики матеріалу середовища впливають на розподіл цих індукованих вихрових струмів, що змінює параметри вимірювальної котушки порівняно із зразковим матеріалом. Зазначені зміни можуть бути використані у якості характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища.

Зміну напруги ΔU на вимірювальній котушці можна виразити наступним чином [10]

$$\Delta U = \sum_{i=1}^N j\omega \int \Delta B \cdot ds = \sum_{i=1}^N j\omega \oint \Delta A \cdot dl \quad (1)$$

де N - кількість витків котушки; $\omega = 2\pi f$; f - частота сигналу збудження; ΔB та ΔA - зміни інтенсивності магнітної індукції та магнітного векторного потенціалу відповідно.

Це рівняння показує, що зміна напруги прямо пропорційна кількості витків котушки та частоті сигналу збудження. Імпульсні вихрові струми демонструють явище, відоме як скін-ефект, відповідно до якого розподіл індукованих вихрових струмів нерівномірний і швидко зменшується з глибиною.

Ще одним наслідком формування імпульсного зондуючого електромагнітного сигналу у феромагнітній гірській породі є генерація пружних хвиль. Цей еластодинамічний процес описується набором диференціальних рівнянь у частинних похідних, що визначають, як матеріал деформується і піддається внутрішньому напруженню [11,12]

$$\rho(x) \frac{\partial v_i}{\partial t}(x, t) = \sum_{j=1}^d \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}(x, t) + f_i(x, t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^d \sum_{k=1}^d c_{ijkl}(x) \frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \boldsymbol{\theta}_{ij}(x, t) \quad (3)$$

де ρ – щільність маси, а c_{ijkl} – 4-й тензор жорсткості досліджуваного зразка; $\mathbf{f}_i$ та $\boldsymbol{\theta}_{ij}$ – джерело сили і джерело тензорної швидкості деформації відповідно.

Параметрами, що підлягають обчисленню, є швидкість $\mathbf{v}_i$ і тензор напружень $\mathbf{T}_i$. Рівняння (2) є другим законом Ньютона: коли до досліджуваного зразка прикладається сила, виникає напруга і деформація, а також зміщення частинок. Рівняння (3), засноване на законі Гука, описує співвідношення швидкості тензора напружень і швидкості тензора деформацій при виникненні деформації [13].

Як доведено у роботі [14], параметри розповсюдження пружних ультразвукових хвиль у гірській породі несуть інформацію стосовно її фізичних характеристик, зокрема, щільності, гранулометричного складу, наявності порожнеч та ін.

У свою чергу електромагнітні властивості залізної руди можуть бути охарактеризовані такими параметрами як магнітна сприйнятливість, електрична провідність та діелектрична проникність. Відносна магнітна проникність μ_r показує, у скільки разів магнітна індукція у речовині відрізняється від магнітної індукції у вакуумі за однакових умов

$$\mu_r = B/B_0 \quad (4)$$

де B – магнітна індукція в середовищі, B_0 – магнітна індукція у вакуумі.

Магнітні властивості часто виражаються через магнітну сприйнятливість χ , яка пов'язана із відносною проникністю μ_r

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (5)$$

Абсолютна магнітна проникність становить

$$\mu = \mu_r / \mu_0 \quad (6)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму.

Електрична провідність чисельно дорівнює оберненій величині електричного опору R середовища. Питома провідність σ залежить від матеріалу, довжини L , площі поперечного перерізу S та оберненої величини питомого опору ρ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R \cdot S} \quad (7)$$

Відносна діелектрична проникність (діелектрична стала) середовища ϵ характеризує поляризаційні властивості середовища. Вона показує у скільки разів сила взаємодії між зарядами в середовищі менша, ніж у вакуумі.

Електромагнітні властивості різновидів залізної руди сильно залежать від конкретної мінералогії (наприклад, магнетит, гематит, сидерит), співвідношення мінералогічних складових, структурно-текстурних особливостей та фізичних умов, за яких вони вимірюються. Тому числові значення відповідних параметрів зазвичай представлені у вигляді діапазонів, а не окремих фіксованих точок. У Таблиці 1 наведена магнітна сприйнятливість, електрична провідність та діелектрична проникність деяких мінералів, які є основними утворюючими залізних руд Криворізького басейну.

Таблиця 1

Електромагнітні властивості основних утворюючих мінералів залізних руд Криворізького басейну

Мінерали	Хімічна формула	Магнітна сприйнятливість, од. SI	Електрична провідність, S/m	Діелектрична проникність
Магнетит	Fe_3O_4	8,8-25	100 - 0, 1	33 - 81
Гематит	$(\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3)$	$(1,3 - 13) \cdot 10^{-3}$	10 - 0,01	1 - 25
Сидерит	FeCO_3	$(2,7 - 7,5) \cdot 10^{-3}$	1 - 0, 001	0.1 - 5,2

З наведеного можна зробити висновок, що магнетит вирізняється сильним магнетизмом та відносно високою електропровідністю порівняно з гематитом та сидеритом, які є слабкими магнітами та поганими провідниками електрики. Присутність води, домішок та інших мінералів може суттєво змінити ці властивості в природних родовищах залізної руди.

Лабораторні методи вимірювання електромагнітних властивостей гранульованих матеріалів на частотах від герців до мегагерців зазвичай базуються на аналізі еквівалентної схеми, що виконується за допомогою LCR-метрів [15]. Провідність та діелектрична проникність отримують шляхом вимірювання величини та фази електричного імпедансу смісної комірки, заповненої досліджуваним

матеріалом. Аналогічно, магнітна проникність та відповідні втрати отримують шляхом вимірювання імпедансу соленоїда, повністю вбудованого в матеріал.

Загальна густина струму J_{tot} , що протікає через матеріал у ємнісній комірці, складається з членів провідності та зміщення. Ці два параметри можна поєднати шляхом введення комплексної діелектричної проникності як [15,16]

$$J_{tot} = J_c + J_d = jw\epsilon_0\epsilon^*E \quad (8)$$

де E – електричне поле, w – кутова частота, ϵ_0 – діелектрична проникність у вакуумі ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), а ϵ^* – відносна комплексна діелектрична проникність, визначена як

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j\left(\frac{\sigma}{w\epsilon_0} + \epsilon_d''\right) \quad (9)$$

Дійсна частина ϵ^* пов'язана з поляризованістю, тоді як уявна частина включає ефект втрат постійної провідності (σ) та дисипацію, пов'язану з процесом поляризації (ϵ_d''). Зазвичай, на робочих частотах <1 МГц член ϵ_d'' є незначним відносно $\frac{\sigma}{w\epsilon_0}$, а уявна частина (9) зводиться до $\frac{\sigma}{w\epsilon_0}$ [16].

Магнітні властивості матеріалу характеризуються відносною комплексною магнітною проникністю μ^* , яка пов'язує магнітне поле H з щільністю потоку B як [17]

$$B = \mu_0\mu^*H \quad (10)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність у вакуумі.

Відносну комплексну проникність можна визначити як

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' \quad (11)$$

Дійсна частина у виразі (11) відображає намагніченість матеріалу, тоді як уявна частина враховує всі магнітні втрати, включаючи гістерезис, втрати на вихрові струми (особливо залежні від провідності) та релаксацію доменних стінок [15,17].

З наведеного можна зробити висновок, що у сукупності параметри формування та розповсюдження зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітній залізвмісній гірській породі є

характеристичними ознаками процесу і можуть бути використані для розпізнавання її мінералогічних різновидів [18,19]

Для моделювання цієї процедури в процесі буріння свердловин використані можливості розширення Simscape® програмного продукту Simulink® /MATLAB®.

Еквівалентна електрична схема електромагнітного перетворювача (рис. 1) представлена у вигляді неідеального двообмоткового трансформатора [20].

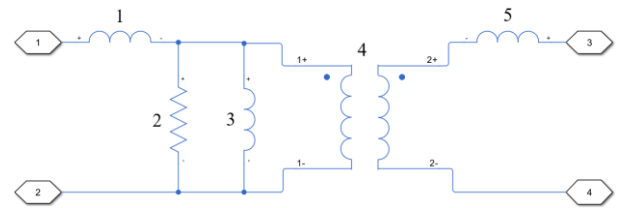


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема електромагнітного перетворювача: 1 та 5 – власна індуктивність первинної та вторинної обмоток відповідно; 2 – взаємний опір між двома обмотками, спричинений втратами на вихрові струми; 3 – взаємна індуктивність між двома обмотками; 4 – ідеальний трансформатор

На рис. 2 наведена схема моделювання процедури формування зонduючого імпульсу у феромагнітній гірській породі та визначення його характеристик із врахуванням змін електричних та магнітних властивостей досліджуваного середовища.

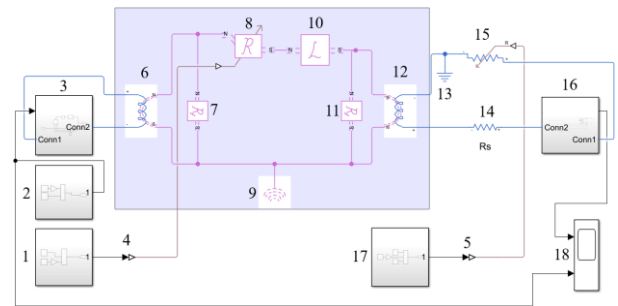


Рис. 2. Схема моделювання процедури формування зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі та визначення його характеристик

У наведеній моделі використані наступні блоки Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 – блок Subsystem 1; 2 – блок Subsystem 2; 3 – блок Subsystem 3; 4,5 – блоки Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 – блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 7 – блок Fundamental Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic

Elements; 8 – блок Variable Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 9 – блок Magnetic Reference із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 10 – блок Eddy Current із бібліотеки Simscape / Electrical / Passive; 11 – блок Fundamental Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 12 – блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 13 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 14 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 15 – блок Variable Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 16 – блок Subsystem 4; 17 – блок Subsystem 5; 18 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

Блок Subsystem 1 формує сигнал із змінними параметрами, який симулює динамічні зміни магнітних характеристик гірської породи із стохастичною складовою.

Блок Subsystem 2 генерує імпульсний синусоїдальний сигнал заданої амплітуди та частоти.

В блоці Subsystem 3 формується зондуєчий електромагнітний імпульс та відстежуються його електричні параметри (рис. 3).

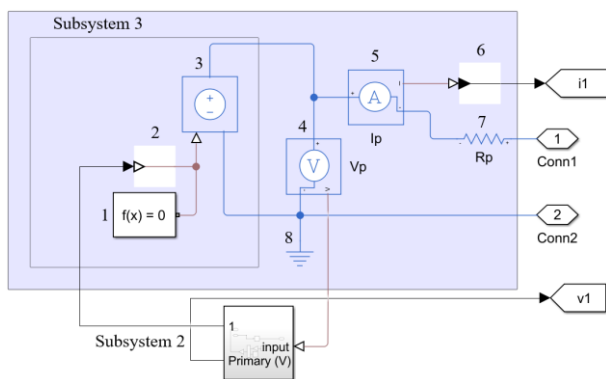


Рис. 3. Схема формування зондуєчого електромагнітного імпульсу у феромагнітній залізовмісній гірській породі: V_p – напруга на первинній обмотці; I_p – струм у первинній обмотці; R_p – електричний опір первинної обмотки.

У наведеній на рис. 3 моделі використані наступні блоки розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 4 – блок

Voltage Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 5 – блок Current Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 6 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 7 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements.

Блок Subsystem 4 використовується для відстеження параметрів сигналів на вторинній (вимірювальній) обмотці електромагнітного перетворювача. Завдяки наявності різноманітних сенсорів блок дозволяє вимірювати як електричні, так і магнітні характеристики перетворення зондуєчого сигналу.

В блоці Subsystem 5 формується сигнал, що імітує зміни електричних властивостей гірської породи.

Для симуляції змін електричних та магнітних властивостей гірської породи використані блоки Variable Reluctance та Variable Resistor (відповідно блоки 8 та 15 на рис. 2).

Блок Variable Reluctance моделює змінний магнітний опір, тобто компонент, який протистоїть магнітному потоку. Відношення магніторушійної сили на компоненті до результуючого потоку, який протікає через компонент, є постійним, а значення співвідношення визначається як опір. Опір залежить від геометрії ділянки, що моделюється. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = \Phi \cdot \mathfrak{R} \quad (12)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{g}{\mu_0 \mu_r A} \quad (13)$$

де MMF – магніторушійна сила на компоненті; Φ – потік через компонент; $\mathfrak{R}$ – опір; g – товщина ділянки, що моделюється; μ_0 – константа проникності; μ_r – відносна проникність матеріалу; A – площа поперечного перерізу секції, що моделюється.

Блок Variable Resistor моделює лінійний змінний резистор, що описується наступним рівнянням

$$V = I \cdot R \quad (14)$$

де V – напруга; I – струм; R – опір.

На рис. 4 наведено приклад сформованих за допомогою дослідженої моделі (рис. 2) сигналів: a – зондуєчий імпульс на виході блоку Subsystem 2 (один пакет із заповненням

синусоїдальними коливаннями частотою 60 кГц та повторенням з частотою 2,5 кГц); *б* – сигнал на виході блоку Subsystem 1, що імітує зміни магнітних властивостей гірської породи (зростання магнітного опору із Slope = 1 та стохастичною складовою); *в* – сигнал на виході блоку Subsystem 5, що імітує стрибкоподібні зміни електричної провідності гірської породи, також із стохастичною складовою.

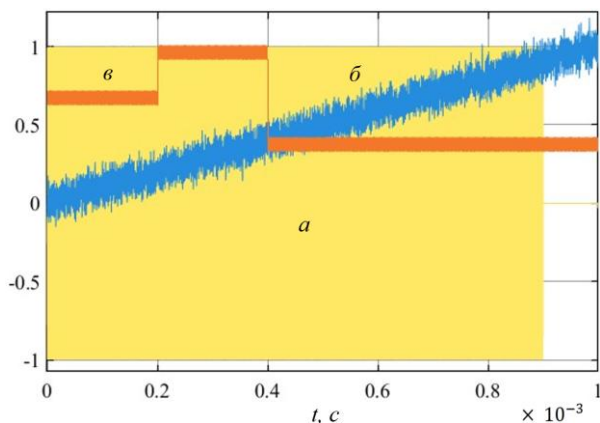


Рис. 4. Приклад сформованих за допомогою дослідженої моделі сигналів (нормалізовані значення амплітуди): *a* – первинний прямокутний імпульс із заповненням синусоїдальними коливаннями; *б* – сигнал, що імітує зміни магнітних властивостей гірської породи (Slope = 1); *в* – сигнал, що імітує стрибкоподібні зміни електричної провідності гірської породи

На рис. 5 наведено реакцію дослідженої моделі (струм у вторинній обмотці електромагнітного перетворювача) на відповідні імітовані зміни магнітних та електричних властивостей гірської породи.

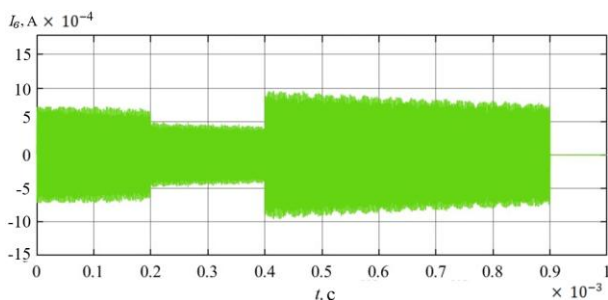


Рис. 5. Реакція дослідженої моделі ЕМП на зміни магнітних та електричних властивостей гірської породи

У Таблиці 2 наведено параметри сигналу, виміряного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища. При цьому імітувались зміни співвідношення

мінералів у складі різновидів *R* залізної руди, електромагнітні властивості яких наведено у Таблиці 1.

Таблиця 2

Параметри сигналу, виміряного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища, при зміні його характеристик

Різновид залізної руди	Параметр			
	A_{max}	A_{min}	Peak to peak	RMS
R_1	8.983e-4	-8.986e-4	17.97e-4	2.342e-4
R_2	10.31e-4	-10.57e-4	20.88e-4	3.121e-4
R_3	8.309e-4	-8.403e-4	16.71e-4	2.437e-4
R_4	3.976e-4	-4.037e-4	8.013e-4	1.004e-4
R_5	10.02e-4	-10.26e-4	20.28e-4	2.489e-4

У таблиці 2 прийнято наступні позначення: A_{max} – максимальне позитивне значення амплітуди; A_{min} – максимальне негативне значення амплітуди; Peak to peak – амплітуда сигналу від максимально позитивного до максимально негативного значення; RMS – середньоквадратичне значення амплітуди. Аналіз отриманих результатів показує сильну їх залежність від вмісту магнетиту у досліджуваному середовищі, що ускладнює розпізнавання різновидів залізної руди, які включають інші слабомагнітні мінерали з малою електричною провідністю. Тобто для отримання задовільних результатів цієї процедури необхідно долучати додаткові характеристичні ознаки фізичних властивостей предмету розпізнавання, до яких, в першу чергу, слід віднести параметри розповсюдження ультразвукових хвиль, що утворюються при формуванні електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі [14,18,19].

Висновки. Запропоновано метод підвищення ефективності процедури визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин на основі симуляції перетворення зонduючого електромагнітного сигналу у досліджуваному середовищі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®. Використаний підхід заснований на використанні електромагнітного перетворювача, який генерує зонduючий

імпульс у залізовмісній гірській породі, що має певні електричні та магнітні властивості. В результаті у досліджуваному середовищі формуються вихрові стуми, які створюють індуковане магнітне поле, впливаючи на такі параметри, як напруга на вимірювальній котушці або її імпеданс. Електромагнітні властивості матеріалу середовища впливають на розподіл цих індукованих вихрових струмів, що змінює параметри вимірювальної котушки порівняно із зразковим матеріалом. Електромагнітні властивості залізної руди можуть бути охарактеризовані такими параметрами як магнітна сприйнятливість, електрична провідність та діелектрична проникність.

Також під дією імпульсного зонduючого електромагнітного сигналу у феромагнітній гірській породі відбувається генерація пружних хвиль. Параметри розповсюдження пружних ультразвукових хвиль у гірській породі несуть інформацію стосовно її фізичних характеристик, зокрема, щільності, гранулометричного складу, наявності порожнеч та ін.

В процесі моделювання визначались параметри сигналу, вимірюного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища. Електромагнітні властивості різновидів залізної руди сильно залежать від конкретної мінералогії (наприклад, магнетит, гематит, сидерит), співвідношення мінералогічних складових, структурно-текстурних особливостей та фізичних умов, за яких вони вимірюються. Під час моделювання імітувались зміни співвідношення основних мінералів у складі різновидів залізної руди. Аналіз отриманих результатів показує сильну їх залежність від вмісту магнетиту у досліджуваному середовищі. Це ускладнює розпізнавання різновидів залізної руди, які включають інші слабomagнітні мінерали з малою електричною провідністю.

Напрямок подальших досліджень слід вважати визначення додаткових характеристичних ознак фізичних властивостей мінералогічних різновидів залізної руди для підвищення якості їх розпізнавання, до яких, в першу чергу, слід віднести параметри розповсюдження ультразвукових хвиль, що утворюються при формування електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі.

Література

1. Davey R. (2023, November 23). Drilling Deeper: Innovations in Mining Drill Rigs and Techniques. AZoMining. Retrieved on November 23, 2025 from <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1772>
2. Bobrov I., Epp J. (2023). Microscaled Multi-frequency Eddy Current Analysis for High Throughput Characterization of Steel Micro-samples. *J Nondestruct Evaluation*, 42, 23. <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00930-4>.
3. Wendler F., Munjal R., Waqas M., Laue R., Härtel S., Awiszus B., & Kanoun O. (2021). Eddy Current Sensor System for Tilting Independent In-Process Measurement of Magnetic Anisotropy. *Sensors*, 21(8), 2652. <https://doi.org/10.3390/s21082652>
4. Roskosz M., Mazurek P., Kwaśniewski J., & Wu J. (2023). Use of Different Types of Magnetic Field Sensors in Diagnosing the State of Ferromagnetic Elements Based on Residual Magnetic Field Measurements. *Sensors*, 23(14), 6365. <https://doi.org/10.3390/s23146365>.
5. Xu Z., Wang X., and Deng Y. (2020). Rotating Focused Field Eddy-Current Sensing for Arbitrary Orientation Defects Detection in Carbon Steel. *Sensors*, 20(8), 2345. <https://doi.org/10.3390/s20082345>.
6. Xu Z., Feng Y., Liu Y., Shi F., Ge Y., Liu H., Cao W., Zhou H., Geng S., and Lin W. (2024). Single-Ended Eddy Current Micro-Displacement Sensor with High Precision Based on Temperature Compensation. *Micromachines*, 15(3), 366. <https://doi.org/10.3390/mi15030366>.
7. Hornik T. (2025). Accuracy of magnetic loss models for electrical machines: FEM vs analytical methods. *Electrical Engineering*, 107. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03085-9>.
8. Ghoni R., Dollah M., Sulaiman A. and Ibrahim F. M. (2014). Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 182496, 11. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/182496>
9. Meng B., Zhuang Z., Ma J., and Zhao S. (2025). Study on the effect of pulsed eddy current lift-off characteristics for feeding metallic foreign objects detection in coal mine crushers. *Scientific Reports*, 15, 23775. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08185-x>.
10. Zheng X., Huang J., and Luo N. (2024). Enhanced Nondestructive Testing Using Pulsed Eddy Current and Electromagnetic Ultrasonic Techniques. *Applied Sciences*, 14(15), 6488. <https://doi.org/10.3390/app14156488>.
11. Bossy E. (2012). SimSonic Suite User's Guide for SimSonic3D.
12. Virieux J. (1986). P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, 51, 4, 889–901. <https://doi.org/10.1190/1.1442147>.

13. Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z., Yin W. (2016). Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. *Journal of Sensors*, 5451821, 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5451821>.
14. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., and Bobrov Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
15. Pettinelli E., Vannaroni G., Cereti A., Pisani A. R., Paolucci F., D. Del Vento, Dolfi D., Riccioli S., Bella F. (2005). Laboratory investigations into the electromagnetic properties of magnetite/silica mixtures as Martian soil simulants. *Journal of geophysical research*, 110, E04013. <https://doi.org/10.1029/2004JE002375>.
16. Guèguen Y. and Palciauskas V. (1994), *Introduction to the Physics of Rocks*, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J.
17. Klein K., and Santamarina J. C. (2000). Ferromagnetic inclusions in geomaterials: Implications, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(2), 167–179.
18. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A. and Bobrov Ye. (2023). Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 21(1), 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
19. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., and Bobrov Ye. (2023). Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, 57(1), 88-95.
20. Eddy Current. <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/eddycurrent.html>.

Morkun N.V., Loria M.G., Hryshchenko S.M., Oliynyk T.A. Modelling the procedure for determining the characteristic features of mineralogical varieties of iron ore in the process of drilling wells

Well drilling is the most common and resource-intensive technological operation in the extraction of minerals. The economic efficiency of this operation directly depends on the quality of automated process control, which, in turn, is determined by the completeness of its information support. The main factor affecting the results of the drilling process is the correspondence of the speed of well penetration and the resulting control actions to the physical and mechanical characteristics of

the rock or its mineralogical varieties. A method is proposed to improve the efficiency of the procedure for determining the characteristic features of mineralogical varieties of iron ore in the process of drilling wells based on the simulation of the conversion of a probing electromagnetic signal in the studied environment using Simscape® physical modeling blocks for Simulink®/MATLAB®. The approach used is based on the use of an electromagnetic transducer that generates a probing pulse in iron-bearing rock with certain electrical and magnetic properties. As a result, eddy currents are formed in the studied medium, which create an induced magnetic field, affecting parameters such as the voltage on the measuring coil or its impedance. The electromagnetic properties of the medium material affect the distribution of these induced eddy currents, which changes the parameters of the measuring coil compared to the reference material. During the modeling process, the parameters of the signal measured on the secondary winding of the electromagnetic transducer were determined when the characteristics of the studied medium changed. At the same time, changes in the ratio of minerals in the composition of iron ore varieties were simulated. Analysis of the results obtained shows their strong dependence on the magnetite content in the studied medium. This complicates the recognition of iron ore varieties that include other weakly magnetic minerals with low electrical conductivity. To obtain satisfactory results from this procedure, it is necessary to include additional characteristic features of the physical properties of the object being recognized, which primarily include the parameters of the propagation of ultrasonic waves formed during the formation of an electromagnetic pulse in ferromagnetic rock.

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

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

Лорія Марина Геннадіївна – д-р техн. наук, проф., професор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua.

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.наук., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Державний податковий університет (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com.

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