

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-81-91>

УДК 622.7: 534

## РОЗПІЗНАВАННЯ МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ БЕЗКОНТАКТНИХ НЕРУЙНІВНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Моркун Н.В., Грищенко С.М., Мацуї А.М., Олійник Т.А.

## RECOGNITION OF MINERALOGICAL VARIETIES OF IRON ORE USING NON- CONTACT NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT METHODS

Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Matsui A.M., Oliinyk T.A.

Методи вихрострумових та ультразвукових вимірювань поєднує можливість їх одночасного ефективного застосування шляхом електромагнітного перетворення єдиного зондуємого сигналу в процесі досліджень фізико-механічних та хіміко-мінералогічних характеристик рудних матеріалів. Визначення та обґрунтування характеристичних ознак зазначеного перетворення імпульсного електромагнітного сигналу у феромагнітному середовищі є ключовою задачею для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Для вирішення цієї задачі виконано аналіз міжнародного досвіду у галузі безконтактного неруйнівного контролю характеристик матеріалів, використано комп'ютерне моделювання та інтелектуальні методи аналізу та класифікації результатів вимірювань. За результатами досліджень запропоновано використання комбінованого електромагнітного перетворювача для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди шляхом безконтактних неруйнівних вимірювань. Комбінований перетворювач за рахунок дії електромагнітного поля формує вихрові струми у досліджуваному середовищі та реалізує перетворення електромагнітних сигналів на пружні коливання феромагнітної гірської породи. Параметри вторинного магнітного поля, сформованого вихровими струмами, амплітуда і частота пружних акустичних коливань, залежать від вмісту і структури розподілу феромагнітного компонента в гірській породі, фізико-механічних характеристик і стану гірського масиву. Змодельований вплив вихрових струмів на результати перетворення шляхом генерації магніторушійної сили, яка протидіє змінам магнітного потоку. При цьому враховуються

паразитні ефекти, використовуючи елементи, що моделюють послідовний опір магнітного потоку та паралельну проникність його розсіювання. Сформований зондуєчий електромагнітний сигнал має періодичний імпульсний синусоїдальний характер. Спеціальний керований сигнал моделює змінні характеристики (магнітний опір із врахуванням вихрових струмів) досліджуваного середовища. Таким чином, електромагнітний перетворювач формує вихрострумовий сигнал та пружні коливання безпосередньо в зоні вимірювання характеристик феромагнітних порід гірського масиву. Оскільки при цьому відсутні будь-які проміжні елементи передачі зондуємого сигналу в середовищі, то і відсутні похибки вимірювань його характеристик, обумовлені цими факторами. Визначені параметри зондуємого електромагнітного імпульсу та його спектральні характеристики використані для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Застосування результатів вихрострумового перетворення додатково до ультразвукових вимірювань дозволило підвищити якість розпізнавання до 93-94.5 %.

**Ключові слова:** руда, різновиди, електромагнітне перетворення, моделювання, автоматизація, буріння.

**Вступ.** Постійно зростаюче енергоспоживання в усьому світі прискорило дослідження в напрямку розробки і застосування енергоефективних технологій у різних галузях промисловості. Вирішення цієї проблеми неможливо без впровадження безконтактних методів неруйнівного контролю

характеристик матеріалів, що використовуються і перероблюються, та стану технологічного обладнання. Саме до таких, в першу чергу, відносяться методи ультразвукових та вихрострумів вимірювань. Ці методи поєднують можливість їх одночасного застосування у процесі досліджень феромагнітних матеріалів шляхом використання єдиного електромагнітного зондуючого сигналу. В свою чергу, така їх особливість значне полегшує застосування для автоматизації технологічних процесів і виробництв.

Rodriguez-Sotelo J.C. та ін. [1] довели, що електричні, магнітні та теплові ефекти під дією електромагнітного випромінювання притаманні для всіх видів феромагнітних матеріалів. Датчики вихрових струмів є незамінними в сучасних промислових операціях для визначення та подолання впливу зазначених ефектів на енергоефективність електротехнічного обладнання. Harms J., and Ken T. A. [2] розробили модель, яка сприяє кращому розумінню фізичних ефектів та параметрів вихрострумів перетворення. Автори проаналізували теорію, що лежить в основі використовуваних датчиків вихрових струмів, запропонували новий опис моделі на основі рівнянь Максвелла та реалізували її за допомогою еквівалентної електричної схеми.

Mótee R. [3] розглядав класичні вихрові струми, які враховують лише питомий опір та товщину сталевих пластин ламінованого матеріалу, але результати вихрострумів перетворення також пов'язані з такими властивостями матеріалу, як текстура, розмір кристалічного зерна, тип сплаву та орієнтація кристалічної анізотропії.

Meng B. та ін. [4] на основі методу вихрострумів контролю запропонували рішення в часовій області для коаксіального збудження, приймальних котушок та датчиків Холла, що взаємодіють з полем вихрових струмів в області, в яку подаються сторонні металеві предмети. Детально проаналізовано вплив ефекту відриву на характеристику класифікації та ідентифікації сторонніх металевих предметів. Результати моделювання та експериментів показують, що сигнали системи виявлення металевих сторонніх предметів, оброблені алгоритмом шумозаглушення, дозволяють класифікувати та ідентифікувати положення падіння, розмір, провідність та магнітну проникність металевих сторонніх предметів на основі точки відриву,

пікового значення, часу до піку та ефективного часового діапазону.

В роботах Bishop C.M. та Bishop H. [4], Shukla K. та ін. [6], Hellier, C. [7], продемонстровано інноваційні підходи щодо неруйнівного контролю різноманітних матеріалів і конструкцій. Thon A. та ін. [8] зазначають, що все більшої популярності завдяки своїй безконтактній природі набувають електромагнітні акустичні перетворювачі (EMAT). Зокрема, вони можуть бути використані для вибіркового збудження та виявлення високопорядкових мод ультразвукових хвиль. Електромагнітні акустичні перетворювачі, що генерують крутильні та поздовжні спрямовані хвилі, ретельно досліджені для трубопровідних конструкцій у роботі Wang Z. та ін. [9] Розроблений перетворювач, заснований на механізмі вихрострумів перетворення, містить віялоподібні магнітні полюси та двошарову котушку. Побудовано модель для дослідження генерації та поширення хвиль від перетворювача. Bao L. та ін. [10] дослідили магнітострикційний плівковий електромагнітний акустичний перетворювач, що складається з постійного магніту, котушки та магнітострикційної плівки на основі феромагнітику ( $Fe_3O_4$ ), прикріпленої до зразка, яку можна використовувати на деталях складної форми або з нерівними чи шорсткими поверхнями.

Визначення характеристик рудних матеріалів із застосуванням ультразвукових вимірювань детально розглянуто у роботах [11-13]. Далі буде розглянуто метод вихрострумів контролю як складова комбінованого методу, який дозволяє поєднати переваги обох підходів.

Вихрострумові методи - це ідеальне рішення для визначення характеристик матеріалів, але з огляду на сучасні вимоги до підвищення енергоефективності та зменшення виробничих втрат, виникає необхідність в їх ефективному і точному моделюванні. Класичні експериментальні підходи до вивчення механізму вихрострумів перетворення відзначаються високою трудомісткістю, значними фінансовими витратами та обмеженими можливостями у відтворенні різноманітних режимів роботи. До того ж, вони не завжди дозволяють оперативне коригування параметрів для пошуку оптимальних рішень.

У роботах [14-16], запропоновано сучасні моделі машинного навчання (ML) для вирішення різноманітних задач дефектоскопії.

Sun F. та інші [17] запропонували нову залишкову мережу CCRNet для поліпшення можливостей інтелектуальної оцінки результатів вихрострумової дефектоскопії, що характеризується кращою роздільною здатністю зображення, більш точною оцінкою та якістю у виявленні дефектів. У цій роботі продемонстровано затухання імпульсних вихрових струмів із глибиною дифузії. Досліджений процес зменшує результуючі зміни сигналу, що ускладнює надійну та точну оцінку глибоко розташованих дефектів.

Morkun V. та ін. [13] запропонували застосовувати алгоритми нечіткої класифікації та нейро-нечіткі мережі для визначення мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Робиться висновок, що для підвищення точності розпізнавання потрібно використовувати більше характеристичних ознак предмету розпізнавання різної фізичної природи.

Таким чином, застосування комбінованого методу вимірювань параметрів ультразвукових та вихрострумових вимірювань є перспективним підходом, щодо підвищення ефективності та якості визначення характеристик рудних матеріалів та розпізнавання їх мінералогічних різновидів. Однак, маючи на увазі різноманітність фізико-механічних властивостей та текстурно-структурних особливостей зразків руди, необхідні додаткові дослідження для виявлення взаємозв'язків характеристик руди з параметрами вихрострумового перетворення сформованих в них електромагнітних сигналів.

**Метою дослідження** є визначення та обґрунтування на основі комп'ютерного моделювання характеристичних ознак вихрострумового перетворення імпульсного електромагнітного сигналу у феромагнітному середовищі для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди.

**Викладання основного матеріалу.** Метод вихрострумових вимірювань базується на фундаментальних рівняннях Максвела

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

де  $H$  - напруженість магнітного поля;  $\sigma$  - провідність;  $\varepsilon$  - діелектрична проникність;  $\mu$  - магнітна проникність;  $\nabla$  - оператор дивергенції.

Основні принципи вихрострумового контролю проілюстровано рис. 1 [18].

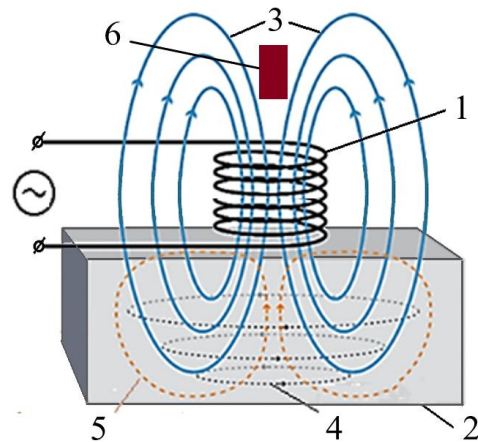


Рис. 1. Основні принципи вихрострумового контролю:

- 1 – котушка збудження; 2 – досліджуваний матеріал;
- 3 – первинне магнітне поле; 4 – вихрові струми;
- 5 – вторинне магнітне поле; 6 – сенсор [18]

Коли в котушку збудження 1 подається змінний струм, вона створює первинне магнітне поле 3, яке індукуює вихрові струми 4 в досліджуваному матеріалі 2. Ці струми, у свою чергу, генерують власне вторинне магнітне поле 5. Задачею вихрострумового контролю є визначення параметрів зазначеного вторинного магнітного поля. Ці параметри вказують на властивості матеріалу (електропровідність, магнітна проникність), наявність дефектів (тріщин, порожнеч), що перешкоджають течії вихрових струмів, та ін. Вони вимірюються за допомогою окремого сенсору 6, другої (приймальної) котушки або шляхом вимірювання параметрів струму, що протікає в котушці збудження.

При реалізації вихрострумових вимірювань велике значення мають проникнення та щільність вихрових струмів. Проникнення обмежене через скін-ефект, який призводить до глибини. Глибина, на якій щільність зменшується до  $1/e$  від експоненціального зменшення щільності з щільності на поверхні, характеризує глибину скін-проникнення  $\delta$  та визначається виразом

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}, \quad (2)$$

де  $\delta$  – глибина скін-слоя (м),  $\mu$  – магнітна проникність (Гн/м),  $\sigma$  – електропровідність (См/м) та  $\omega$  – кутова частота (рад/с).

Вираз (2) показує, що глибина проникнення залежить від частоти збудження. Чим нижча частота, тим глибше проникнення і навпаки. У порівнянні з одночастотним (лише одна частота збудження) більш інформативним є імпульсний метод вихрострумового контролю. У цьому випадку форма хвилі збудження визначається як у роботі [19]

$$f(t) = \begin{cases} A, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (3)$$

де  $A$  – амплітуда імпульсу, а  $T$  – ширина імпульсу.

Перетворення Фур'є дозволяє визначити частотні складові імпульсної хвилі

$$F(\omega) = \frac{2 \sin \omega T/2}{\omega} . \quad (4)$$

Для визначення характеристик феромагнітних порід гірського масиву використовується перетворювач електромагнітного типу. Він є розподіленою структурою, що складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля і деякого обсягу феромагнітного компонента гірської породи, де і відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля. На рис. 2 наведена загальна схема комбінованого електромагнітного акустичного та вихрострумового перетворювача ЕМАТ.

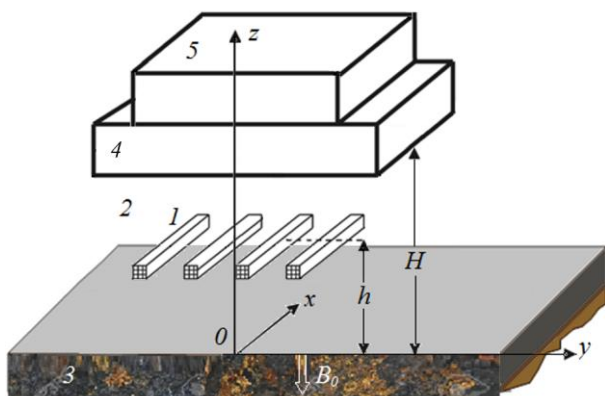


Рис. 2. Електромагнітний перетворювач:  
1 – струмопроводи котушки збудження;  
2 – повітряне середовище; 3 – об'єкт контролю;  
4 – екран; 5 – однополюсний магніт;  
 $B_0$  – вектор індукції магнітного поля

Котушка індуктує вихрові струми  $\mathbf{J}$  в поверхневих шарах випробувального матеріалу, а взаємодія між статичним магнітним полем  $\mathbf{B}$  і вихровими струмами  $\mathbf{J}$  створює густину сили Лоренца  $\mathbf{F}$ , яка в свою чергу генерує ультразвукові хвилі, що поширюються в досліджуваному зразку у роботі авторів Хіе У. та ін. [20]

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

Dodd C.V. та Deeds W.E. [21] запропонували аналітичні рішення для круглої котушки над шаруватим провідником. Для розрахунку індукованого вихрового струму у цьому випадку запропоновані наступні рівняння

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{I} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \mu \nabla \left( \frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A}, \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (8)$$

де  $\mathbf{A}$  – векторний потенціал;  $\mu$ ,  $\sigma$  та  $\varepsilon$  – проникність, провідність та діелектрична проникність матеріалу, відповідно;  $\mathbf{I}$  – щільність прикладеного струму;  $\omega$  – кутова частота прикладеного змінного струму;  $\mathbf{E}$  – електричне поле;  $\mathbf{J}$  – індукований вихровий струм.

На основі розрахунку вихрових струмів із застосуванням виразів (6)-(8) визначається векторний потенціал [21]

$$\mathbf{A}(r, z) = \mathbf{M} \int_0^\infty \frac{1}{a^2} \left( \int_{ar_1}^{ar_2} x J_1(x) dx \right) J_1(ar) (e^{-al} - e^{-a(l+h)}) \frac{e^{a_1 z}}{a+a_1} da, \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = \mu_0 N \mathbf{I}, \quad (10)$$

$$a_1 = \sqrt{a^2 + j\omega \mu_1 \sigma}, \quad (11)$$

де  $N$  – витки котушки;  $a$  та  $x$  – змінні інтегрування;  $J_1(ar)$  та  $J_1(x)$  – функції Бесселя першого роду;  $\mu_0$  та  $\mu_1$  – проникність повітря та досліджуваного матеріалу відповідно.

Ланцюжок перетворень електромагнітних сигналів у досліджуваному феромагнітному середовищі наведено на рис. 3 [22]

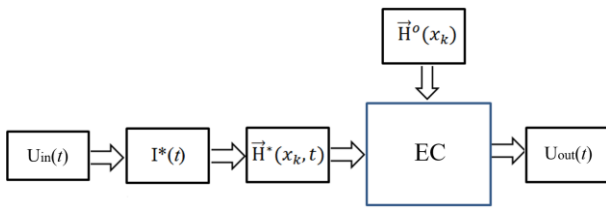


Рис. 3. Ланцюжок перетворень електромагнітних сигналів у досліджуваному феромагнітному середовищі [22]

На рис. 3 прийнято наступні позначення:  $U_{in}(t)$  - різниця електричних потенціалів на електричному вході (на клеммах електричного контуру) перетворювача ЕМАТ;  $I^*(t)$  - електричний струм, що змінюється в часі  $t$  в електричному контурі перетворювача;  $\vec{H}^*(x_k, t)$  - вектор напруженості змінного магнітного поля, яке створюється електричним контуром перетворювача в точці з координатами  $x_k$  у фізичній системі координат;  $\vec{H}^o(x_k)$  - вектор напруженості постійного поля підмагнічування, який визначає структуру матриці п'єзомагнітних констант і характер напружено-деформованого стану середовища в точці з координатами  $x_k$ ; EC – характеристики досліджуваного середовища в області існування змінного та постійного магнітних полів;  $U_{out}(t)$  – вихідний сигнал перетворення.

До характеристик досліджуваного середовища EC відносяться:  $c_{ijkl}^H$  - компонент тензора модулів пружності, що експериментально визначаються в режимі сталості напруженості магнітного поля;  $\rho_0$  - щільність середовища;  $r_{nm}$  - компонент тензора електричної провідності середи;  $m_{pqkl}$  - компонент тензора магнітострикційних констант;  $\mu_{rs}^E$  - компонент тензора магнітної проникності, що експериментально визначається в режимі сталості деформацій при заданому рівні напруженості поля підмагнічування [22-24].

У режимі збудження ЕМАТ за рахунок дії електромагнітного поля формує вихрові струми у досліджуваному середовищі та реалізує перетворення електромагнітних сигналів на пружні коливання феромагнітної гірської породи. У певній точці феромагнетику з координатами  $x_k$  формується постійне магнітне поле з напруженістю  $\vec{H}^o(x_k)$  та змінне (внаслідок впливу електромагнітного імпульсу певної амплітуди, тривалості та частоти) з напруженістю  $\vec{H}^*(x_k, t)$  у момент часу  $t$ . Романюк М.І. (2015), Сучков Г. М. та інш. (2012)

довели, що в сфері існування магнітних полів  $\vec{H}^o(x_k)$  та  $\vec{H}^*(x_k, t)$  у феромагнетику формуються деформації. Енергія у зоні формування деформацій передається далі пружними хвилями. Параметри вторинного магнітного поля, амплітуда і частота пружних акустичних коливань, що склалися, залежить від вмісту і структури розподілу феромагнітного компонента в гірській породі, фізико-механічних характеристик і стану гірського масиву.

Таким чином, ЕМАТ формує вихрострумний сигнал та пружні коливання безпосередньо в зоні вимірювання характеристик феромагнітних порід гірського масиву. Оскільки при цьому відсутні будь-які проміжні елементи передачі зондуючого сигналу в середовище, то і відсутні похибки процедури вимірювань його характеристик, обумовлені цими факторами.

**Результати та обговорення.** Для моделювання процесів електромагнітного вихрострумного перетворення у залізовмісній гірській породі використані блоки фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®. Блоки в бібліотеці Simscape фактично представляють фізичні компоненти, отже, складні багатодоменні моделі можна побудувати без необхідності виводити математичні рівняння на основі фізичних принципів. На рис. 4 наведена Simscape модель відтворення вихрових струмів у гірській породі за допомогою електромагнітного імпульсу.

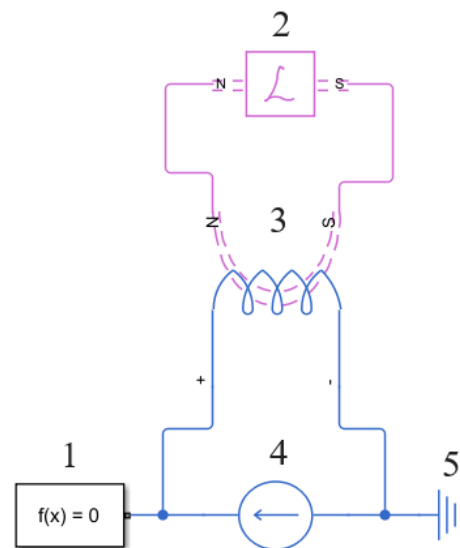


Рис. 4. Схема моделі відтворення вихрових струмів у гірській породі за допомогою електромагнітного імпульсу

У наведеній моделі використані наступні блоки Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок Eddy Current із бібліотеки Simscape / Electrical / Passive; 3 - блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 4 - блок Current Source із бібліотеки Simscape / Electrical / Sources; 5 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements.

Блок Solver Configuration (конфігурації розв'язувача) визначає параметри розв'язувача, які потрібні моделі перед початком моделювання. Блок (Electrical Reference) являє собою електричне заземлення.

Блок Current Source - джерело струму з додатковими компонентами постійного струму, змінного струму та шуму). Задає гармонічний струм живлення індуктора (амплітуду та частоту). Використовується для збудження магнітного поля у котушці. Струм, що протікає через джерело від – до + виводу, визначається за формулою

$$i = i_{DC} + i_{AC} \sin(2\pi ft + \phi) + i_N, \quad (12)$$

де  $i_{DC}$  – це стаціонарний компонент постійного струму;  $i_{AC}$  – амплітуда змінної складової струму;  $f$  – частота змінної складової;  $\phi$  – фазовий зсув змінної складової;  $i_N$  – струм шуму.

Блок Current Source генерує гауссовий шум, використовуючи джерело випадкових чисел PS у бібліотеці Simscape™ Foundation. Шумова складова визначається за формулою

$$i_N = \sqrt{\frac{P_i N(0,1)}{2 \sqrt{h}}}, \quad (13)$$

де  $P_i$  - спектральна щільність потужності одностороннього шуму для навантаження 1 Ом, в  $A^2/Гц$ ;  $N$  - гаусове випадкове число з нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням, що дорівнює одиниці;  $h$  – інтервал дискретизації.

Блок Electromagnetic Converter забезпечує загальний інтерфейс між електричною та магнітною областями моделі. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = N \cdot I, \quad (14)$$

$$V = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (15)$$

де  $MMF$  - магніторушійна сила на магнітних портах;  $\Phi$  - потік через магнітні порти;  $I$  - струм через електричні порти;  $V$  - напруга на електричних портах;  $N$  - кількість витків електричної обмотки;  $t$  - час моделювання.

Блок Eddy Current моделює вплив вихрових струмів, генеруючи магніторушійну силу (ММФ), яка протидіє змінам магнітного потоку. Крім того, блок моделює паразитні ефекти, використовуючи послідовний опір магнітного потоку та паралельну проникність розсіювання, а також теплові ефекти, використовуючи додатковий тепловий порт  $H$ .

Еквівалентна магнітна схема блоку Eddy Current, включаючи шлях вихрових струмів та паралельний шлях розсіювання, наведено на рис. 5 у Simscape® для Simulink®/MATLAB® та Eddy Current.

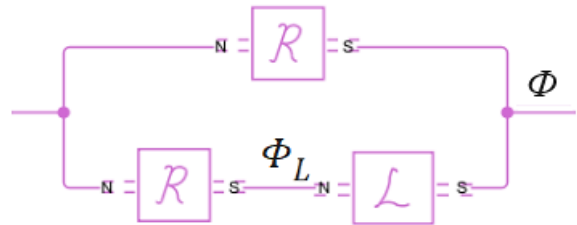


Рис. 5. Еквівалентна магнітна схема блоку Eddy Current:  $\Phi$  – загальний потік на клеммах;  $\Phi_L$  – потік через петлю вихрових струмів [25]

Блок Eddy Current обчислює ММФ терміналу  $\mathcal{F}$  та потік  $\Phi$  як

$$\mathcal{F} = G_{eddy} \frac{d\Phi_L}{dt} + \mathcal{R}\Phi_L, \quad (16)$$

$$\Phi = \mathcal{F}\mathcal{P} + \Phi_L, \quad (17)$$

де  $G_{eddy}$  – провідність петлі вихрових струмів;  $\mathcal{R}$  - паразитний послідовний опір шляху вихрових струмів;  $\mathcal{P}$  - паралельна проникність.

Оскільки паразитний послідовний опір та паралельна проникність не мають втрат, загальна розсіювана потужність на блоці становить

$$P_{diss} = G_{eddy} \left( \frac{d\Phi_L}{dt} \right)^2. \quad (18)$$

Наведений підхід використаний для моделювання вихрострумового перетворення електромагнітного імпульсу у залізвмісній гірській породі. Схема моделі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення

Simscape® для Simulink® /MATLAB® наведено на рис. 6.

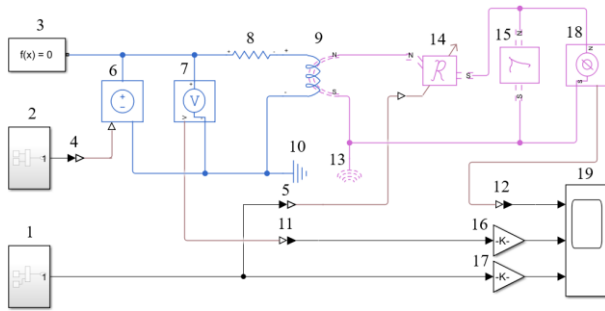


Рис. 6. Схема моделі вихрострумowego перетворення електромагнітного імпульсу у залізвмісній гірській породі

У наведеній моделі використані наступні блоки Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 – блок Subsystem 1; 2 – блок Subsystem 2; 3 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 4,5 – блоки Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 7 – блок Voltage Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 8 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 9 - блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 10 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 11,12 - блоки PS-Simulink Converter; 13 – блок Magnetic Reference із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 14 – блок Variable Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 15 – блок Eddy Current із бібліотеки Simscape / Electrical / Passive; 16,17 – блоки Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 18 – блок Flux Sensor із бібліотеки Simscape / Magnetic Sensors; 19 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

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

Блок Subsystem 2 формує зондуєчий періодичний імпульсний синусоїдальний сигнал заданої амплітуди та частоти.

Блок Controlled Voltage Source являє собою ідеальне джерело напруги, достатньо потужне для підтримки заданої напруги на своїх клеммах незалежно від струму, що протікає через джерело. Вихідна напруга  $V$

$$V = V_S, \quad (19)$$

де  $V_S$  - числове значення, що відображається на фізичному сигнальному порту.

Блок Voltage Sensor являє собою ідеальний датчик напруги, тобто пристрій, який перетворює напругу, виміряну між двома точками електричного кола, у фізичний сигнал, пропорційний напрузі.

Блок резистора моделює лінійний резистор, що описується наступним рівнянням

$$V = I \cdot R, \quad (20)$$

де  $V$  – напруга;  $I$  – струм;  $R$  – опір.

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

$$MMF = \Phi \cdot \mathfrak{R}, \quad (21)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{g}{\mu_0 \mu_r A}, \quad (22)$$

де  $MMF$  - магніторушійна сила на компоненті;  $\Phi$  - потік через компонент;  $\mathfrak{R}$  - опір;  $g$  - товщина ділянки, що моделюється;  $\mu_0$  - константа проникності;  $\mu_r$  - відносна проникність матеріалу;  $A$  - площа поперечного перерізу секції, що моделюється.

Блок Flux Sensor являє собою ідеальний датчик потоку, тобто пристрій, який перетворює потік, виміряний у будь-якій магнітній гілці, на фізичний сигнал, пропорційний потоку.

Блок Gain множить вхідне значення на константу (коефіцієнт посилення). Блок Scope відображають сигнали у часовій області. Блок Simulink-PS Converter перетворює вхідний сигнал Simulink® на фізичний сигнал. Блок PS-Simulink Converter виконує зворотне перетворення.

На рис. 7 наведено результати моделювання вихрострумowego перетворення електромагнітного імпульсу у залізвмісній гірській породі.

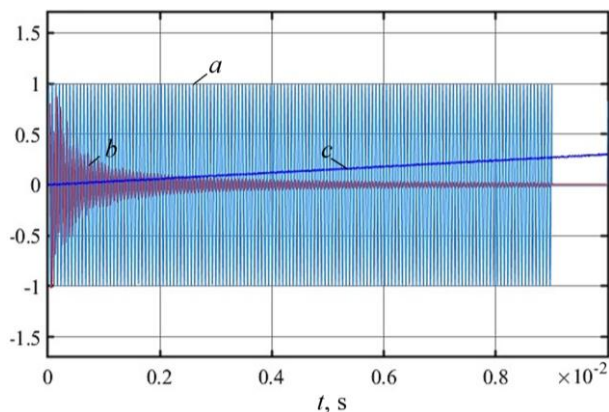


Рис. 7. Результати моделювання вихрострумowego перетворення електромагнітного імпульсу у залізовмісній гірській породі: *a* – зонduючий електромагнітний сигнал, В; *b* – сигнал, сформований у досліджуваному середовищі,  $\times 10^{-4}$ В; *c* – сигнал, що моделює змінний магнітний опір досліджуваного середовища, В

Зонduючий електромагнітний сигнал має періодичний імпульсний синусоїдальний характер. На рис. 4 наведено вигляд одного імпульсу (*a*) з частотою заповнення 60 кГц. Магнітний опір блоку Variable Reluctance збільшується на 30%, починаючи з початкового значення, за допомогою керуючого сигналу (*c*) із стохастичною складовою, що формується блоком Subsystem 1. Сигнал (*c*) відтворює змінні характеристики (магнітний опір із врахуванням вихрових струмів) досліджуваного середовища.

У табл. 1 наведено виміряні параметри сигналу *b* при варіаціях характеристик досліджуваного середовища, які імітувалися ухилом зміни (slope) сигналу *c* (рис. 4). При цьому параметри зонduючого електромагнітного сигналу не змінювались.

Таблиця 1

**Параметри сигналу, сформованого у досліджуваному середовищі, при зміні його характеристик**

Параметр	$A_{max}$	$A_{min}$	Peak to peak	Mean	RMS
$S = 0.1$	8.56e-5	-10.81e-5	1.94e-4	4.142e-8	1.757e-5
$S = 0.3$	8.74e-5	-10.16e-5	1.89e-4	2.431e-8	1.027e-5
$S = 0.5$	8.49e-5	-9.149e-5	1.76e-4	1.913e-8	0.849e-5

У табл. 1 прийнято наступні позначення: *S* (slope) – ухил зміни сигналу *c* впродовж зонduючого імпульсу відносно первинного значення;  $A_{max}$  – максимальне позитивне значення амплітуди;  $A_{min}$  – максимальне негативне значення амплітуди; Peak to peak – амплітуда сигналу від максимально позитивного до максимально негативного значення; Mean –

середнє значення амплітуди; RMS – середньоквадратичне значення амплітуди.

Таким чином, варіації характеристик досліджуваного середовища (його магнітних властивостей) призводять до адекватної зміни параметрів вимірюваного сигналу. Найбільш прийнятним для подальшого практичного застосування визначено середньоквадратичне значення амплітуди зонduючого електромагнітного імпульсу, сформованого у залізовмісній гірській породі.

**Висновки.** Наведені результати моделювання доводять, що параметри вихрострумowego перетворення зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітному середовищі, являють собою його важливі характеристичні ознаки. Середньоквадратичні значення амплітуди зонduючого електромагнітного імпульсу у залізовмісній гірській породі та його спектральні характеристики використані для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища в процесі автоматизованого буріння свердловин відповідно до методу, наведеного у роботі [13]. Застосування зазначених результатів вихрострумowego перетворення додатково до ультразвукових вимірювань дозволило підвищити якість розпізнавання до 93-94,5 %.

#### Література

- Rodriguez-Sotelo J.C., Quintero J.D., and Herrera-Ruiz G. Magnetic core loss modeling in electrical machines: A comprehensive review. *Micromachines*. 2022, vol.13(3). 418. <https://doi.org/10.3390/mi13030418>.
- Harms J. and Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021, vol. 6(1), pp. 37. <https://doi.org/10.3390/I3S2021Dresden-10103>
- Mörée R. *Modelling of iron losses in electric al machines: State-of-the-art and future trends*. Doctoral Thesis, Uppsala University. 2024.
- Meng B., Zhuang Z., Ma J. and Zhao S. Study on the effect of pulsed eddy current lift-off characteristics for feeding metallic foreign objects detection in coal mine crushers. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, 23775. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08185-x>.
- Bishop C.M., & Bishop H. *Deep Learning: Foundations and Concepts*. Springer Nature. 2023, 656 p. ISBN 978-3-031-45468-4 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45468-4>.

6. Shukla K., Di Leoni P.C., Blackshire J., Sparkman D., and Karniadakis G.E. Physics-informed neural network for ultrasound nondestructive quantification of surface breaking cracks. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020, vol. 39, pp.1-20. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03596>.
7. Hellier C. *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 3E. Third edition. New York, N.Y.: McGraw-Hill Education. 2020. ISBN-13 978-1260441437.
8. Thon A., Painchaud-April G., Le Duff A., and Bélanger P. Development of a linear array electromagnetic acoustic transducer for shear horizontal guided wave inspection. *NDT & E International*. 2023, vol. 136, 102807. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102807>.
9. Wang Z., Wang S., Wang Q., Zhao W. and Huang S. Development of a Helical Lamb Wave Electromagnetic Acoustic Transducer for Pipeline Inspection. *In IEEE Sensors Journal*. 2020, vol. 20(17), pp. 9715-9723, doi: 10.1109/JSEN.2020.2990795.
10. Bao L., Li, Z., Dixon, S., Yang Yu, Y., and Guofu Zhai G. Development of a magnetostrictive Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-film electromagnetic acoustic transducer. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023, vol. 361, 16, 114593. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114593>
11. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., and Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. vol. 57(1), pp.88-95.
12. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A. and Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023, vol. 21(1), pp. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
13. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., and Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. vol. 18(3), pp. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
14. Munir N., Park J., Kim H.-J., Song S.-J., and Kang S.-S. Performance enhancement of convolutional neural network for ultrasonic flaw classification by adopting autoencoder. *Ndt & E International*. 2020, vol. 111, article number 102218. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102218>.
15. Niyirora R., Masengesho W. Ji, E., Munyaneza J., Niyonyungu F., and Nyirandayisabye R. Intelligent damage diagnosis in bridges using vibration-based monitoring approaches and machine learning: a systematic review. *Results in Engineering*. 2022, 16, article number 100761. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100761>.
16. Ghafoor I., Peter W.T., Munir W.T., and Trappey A.J. Non-contact detection of railhead defects and their classification by using convolutional neural network. *Optik. (Stuttg)*. 2022, vol. 253, article number 168607. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168607>.
17. Sun F., Fan M., Cao B., Ye B., Lu G., and Li W. Cross-Correlation Inspired Residual Network for Pulsed Eddy Current Imaging and Detecting of Subsurface Defects. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023, vol. 70(12), pp.12860 - 12871, DOI: 10.1109/TIE.2023.3239862.
18. Stawicki O., Ahlbrink R., and Schröer K. *Shallow internal corrosion sensor technology for heavy pipe wall inspection*. 2009. URL: <https://www.researchgate.net/publication/23767050>.
19. Sophian A., Tian G. and Fan M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineerin*. 2017, 30, pp. 500–514. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>.
20. Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z. and Yin W. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. *Journal of Sensors*. 2016, vol. 5451821, 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5451821>.
21. Dodd C. V. and Deeds W. E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems, *Journal of Applied Physics*. 1968, vol. 39(6), pp. 2829–2838. <https://doi.org/10.1063/1.1656680>, 2-s2.0-36849096720.
22. Петрищев О.М., Сучков Г.М., Плесецов С.Ю. *Теорія і практика електромагнітно-акустичного контролю*. Частина 1. Теоретичні основи розрахунку і проектування електроакустичних перетворювачів електромагнітного типу: монографія: Вид. центр НТУ «ХП». 2019, 555 с.
23. Романюк М.І. *Теоретичні основи розрахунку ультразвукових трактів пристроїв контролю поверхні металопрокату*. Київ. 2015.
24. Сучков Г. М., Хащина С. В., Петрищев О. Н. *Розвиток концепцій створення ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу. Режим збудження*. Частина 1. Технічна діагностика та неруйнівний контроль., №1. № 1. (с. 23-28). Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. 2012.
25. Eddy Current. URL: <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/eddycurrent.html>.
26. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.

## References

- Rodriguez-Sotelo J.C., Quintero J.D., and Herrera-Ruiz G. Magnetic core loss modeling in electrical machines: A comprehensive review. *Micromachines*. 2022, vol.13(3). 418. <https://doi.org/10.3390/mi13030418>.
- Harms J. and Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021, vol. 6(1), pp. 37. <https://doi.org/10.3390/13S2021Dresden-10103>
- Mörée R. *Modelling of iron losses in electric al machines: State-of-the-art and future trends*. Doctoral Thesis, Uppsala University. 2024.
- Meng B., Zhuang Z., Ma J. and Zhao S. Study on the effect of pulsed eddy current lift-off characteristics for feeding metallic foreign objects detection in coal mine crushers. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, 23775. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08185-x>.
- Bishop C.M., & Bishop H. *Deep Learning: Foundations and Concepts*. Springer Nature. 2023, 656 p. ISBN 978-3-031-45468-4 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45468-4>.
- Shukla K., Di Leoni P.C., Blackshire J., Sparkman D., and Karniadakis G.E. Physics-informed neural network for ultrasound nondestructive quantification of surface breaking cracks. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020, vol. 39, pp.1-20. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03596>.
- Hellier C. *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 3E. Third edition. New York, N.Y.: McGraw-Hill Education. 2020. ISBN-13 978-1260441437.
- Thon A., Painchaud-April G., Le Duff A., and Bélanger P. Development of a linear array electromagnetic acoustic transducer for shear horizontal guided wave inspection. *NDT & E International*. 2023, vol. 136, 102807. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102807>.
- Wang Z., Wang S., Wang Q., Zhao W. and Huang S. Development of a Helical Lamb Wave Electromagnetic Acoustic Transducer for Pipeline Inspection. In *IEEE Sensors Journal*. 2020, vol. 20(17), pp. 9715-9723, doi: 10.1109/JSEN.2020.2990795.
- Bao L., Li, Z., Dixon, S., Yang Yu, Y., and Guofu Zhai G. Development of a magnetostrictive Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-film electromagnetic acoustic transducer. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023, vol. 361, 16, 114593. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114593>
- Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., and Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. vol. 57(1), pp.88-95.
- Morkun V., Morkun N., Gaponenko A. and Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023, vol. 21(1), pp. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
- Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., and Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. vol. 18(3), pp. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
- Munir N., Park J., Kim H.-J., Song S.-J., and Kang S.-S. Performance enhancement of convolutional neural network for ultrasonic flaw classification by adopting autoencoder. *Ndt & E International*. 2020, vol. 111, article number 102218. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102218>.
- Niyirora R., Masengesho W. Ji, E., Munyaneza J., Niyonyungu F., and Nyirandayisabye R. Intelligent damage diagnosis in bridges using vibration-based monitoring approaches and machine learning: a systematic review. *Results in Engineering*. 2022, 16, article number 100761. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100761>.
- Ghafoor I., Peter W.T., Munir W.T., and Trappey A.J. Non-contact detection of railhead defects and their classification by using convolutional neural network. *Optik. (Stuttg)*. 2022, vol. 253, article number 168607. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168607>.
- Sun F., Fan M., Cao B., Ye B., Lu G., and Li W. Cross-Correlation Inspired Residual Network for Pulsed Eddy Current Imaging and Detecting of Subsurface Defects. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023, vol. 70(12), pp.12860 - 12871, DOI: 10.1109/TIE.2023.3239862.
- Stawicki O., Ahlbrink R., and Schröer K. *Shallow internal corrosion sensor technology for heavy pipe wall inspection*. 2009. URL: <https://www.researchgate.net/publication/23767050>.
- Sophian A., Tian G. and Fan M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineerin*. 2017, 30, pp. 500–514. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>.
- Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z. and Yin W. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. *Journal of Sensors*. 2016, vol. 5451821, 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5451821>.
- Dodd C. V. and Deeds W. E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems, *Journal of Applied Physics*. 1968, vol. 39(6), pp. 2829–2838. <https://doi.org/10.1063/1.1656680>, 2-s2.0-36849096720.
- Petryshchev O.M., Suchkov H.M., Plesnetsov S.Iu. Teoriia i praktyka elektromahnitno-akustychnoho

- контролю. Chastyna I. Teoretychni osnovy rozrakhunku i proektuvannia elektroakustychnykh peretvoriuvachiv elektromahnitnoho typu: monohrafiia: Vyd. tsentr NTU «KhPI». 2019, 555 с.
23. Romaniuk M.I. Teoretychni osnovy rozrakhunku ultrazvukovykh traktiv prystroiv kontroliu poverkhni metaloprokatu. Kyiv. 2015.
  24. Suchkov H. M., Khashchyna S. V., Petryshchev O. N. Rozvytok kontseptsii stvorennia ultrazvukovykh peretvoriuvachiv elektromahnitnoho typu. Rezhym zbudzhennia. Chastyna I. Tekhnichna diahnostyka ta neruiniivnyi kontrol., №1. № 1. (с. 23-28). Instytut elektrozvariuvannia im. Ye.O. Patona NAN Ukrainy. 2012.
  25. Eddy Current. URL: <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/eddycurrent.html>.
  26. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.

**Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Matsui A. M., Oliinyk T.A. Recognition of mineralogical varieties of iron ore using non-contact non-destructive measurement methods**

*Eddy current and ultrasonic measurement methods combine the possibility of their simultaneous effective application through electromagnetic conversion of a single probing signal in the process of researching the physical, mechanical, chemical, and mineralogical characteristics of ore materials. The determination and justification of the characteristic features of this conversion of a pulsed electromagnetic signal in a ferromagnetic medium is a key task for recognizing the mineralogical varieties of iron ore in the studied deposit. To solve this problem, an analysis of international experience in the field of non-contact non-destructive testing of material characteristics was performed, using computer modeling and intelligent methods of analysis and classification of measurement results. Based on the research results, it is proposed to use a combined electromagnetic converter for recognizing mineralogical varieties of iron ore by means of non-contact non-destructive measurements. The combined transducer uses an electromagnetic field to generate eddy currents in the environment under study and converts electromagnetic signals into elastic vibrations of ferromagnetic rock. The parameters of the secondary magnetic field formed by eddy currents, the amplitude and frequency of elastic acoustic vibrations depend on the content and distribution structure of the*

*ferromagnetic component in the rock, the physical and mechanical characteristics and the state of the rock mass. The modeled effect of eddy currents on the results of conversion by generating a magnetomotive force that counteracts changes in magnetic flux. In this case, parasitic effects are taken into account using elements that simulate the series resistance of magnetic flux and the parallel permeability of its scattering. The formed probing electromagnetic signal has a periodic pulsed sinusoidal character. A special controlled signal simulates the variable characteristics (magnetic resistance taking into account eddy currents) of the environment under study. Thus, the electromagnetic transducer generates an eddy current signal and elastic vibrations directly in the area where the characteristics of ferromagnetic rocks of the mountain massif are measured. Since there are no intermediate elements for transmitting the probing signal into the medium, there are no measurement errors in its characteristics caused by these factors. The determined parameters of the probing electromagnetic pulse and its spectral characteristics are used to recognize the mineralogical varieties of iron ore in the studied deposit. The application of the results of eddy current conversion in addition to ultrasonic measurements made it possible to increase the recognition quality to 93-94.5%.*

**Keywords:** ore; varieties; electromagnetic conversion; modeling; automation; drilling.

**Моркун Наталя Володимирівна** – доктор технічних наук, професор, професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), [nmorkun@gmail.com](mailto:nmorkun@gmail.com).

**Грищенко Світлана Миколаївна** – кандидат педагогічних наук, старший дослідник Державний податковий університет (Ірпінь), [smgrischenko@gmail.com](mailto:smgrischenko@gmail.com)

**Мацуй Анатолій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет (Кропивницький), [matsuiam@kntu.kr.ua](mailto:matsuiam@kntu.kr.ua)

**Олійник Тетяна Анатоліївна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри збагачення корисних копалин, Криворізький національний університет (Кривий Ріг), [zkkh@knu.edu.ua](mailto:zkkh@knu.edu.ua).

Стаття подана 11.12.2025.