

6. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента. Механика XXI века. 2009. №8.
7. Яцун Е.И., Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Павлов Е.В. Совершенствование инструментального обеспечения процессов точения конструктивно сложных деталей. СТИН. 2017, №9. С.23-28.
8. Захаренко П. В. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвёрдых материалов. // Захаренко П. В., Волкогон В. М., Бочко А. В. и др. К., 1991;
9. Шульженко А. А. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора. // Шульженко А. А., Божко С. А., Соколов А. Н. и др. К., 1993;
10. Новиков Н. В. Киборит: получение, структура, свойства, применение // Новиков Н. В., Шульженко А. А., Беженар Н. П. и др. СМ. 2001. № 2;
11. J. Barry, G. Akdogan, P. Smyth et al. Application areas for PCBN materials // Industrial Diamond Rev. 2006. Vol. 66, № 3;
12. Беженар Н. П. Кубический нитрид бора, материалы на его основе // Неорг. материаловедение. Материалы и технологии. К., 2008. Т. 2, кн. 1;
13. Алієв І. С., Беженар М. П., Бейгельзімер Я. Ю. та ін. Наукоємні технології одержання матеріалів та виробів, включно наноструктурних, з новим рівнем показників якості // Фізика и техника высоких давлений. 2011. Т. 21, спецвып.;
14. Туркевич В. З., Беженар Н. П., Петруша И. А. Сверхтвёрдые композиционные материалы на основе кубического нитрида бора // Физ.-тех. пробл. современ. материаловедения. К., 2013. Т. 2.
15. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ.навч. закладів] / М.П.Мазур, Ю.М.Внуков, В.Л.Доброскок, В.О.Залога, Ю.К.Новосьолов, Ф.Я.Якубов; під заг. ред. М.П.Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ 2000, 2001. – С.422.

Рукопис подано до редакції 24.04.2023

УДК 622.7: 534

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет
Н.В. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Львівський національний університет ім. Івана Франка
С.М. ГРИЩЕНКО, канд. пед. наук, ст. дослідник, Державний податковий університет
І.А. ГАПОНЕНКО, канд. техн. наук, наук. співробітник,
А.А. ГАПОНЕНКО, Є.Ю. БОБРОВ, аспіранти, Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Метою дослідження є моделювання процесів електромагнітного акустичного перетворення для конструювання безконтактного із досліджуванним середовищем ультразвукового вимірювального каналу.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає у дослідженні механізмів електромагнітного акустичного перетворення для формування ультразвукових пружних хвиль.

Практичне значення полягає в обґрунтуванні застосування електромагнітних акустичних перетворювачів для визначення фізико-механічних властивостей феромагнітної гірської породи.

Результати. У феромагнітних провідних матеріалах одночасно присутні три механізми акустичного перетворення: сила Лоренца, магнітострикційна сила і сила намагнічування. Звичайний електромагнітний акустичний перетворювач складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля та деякого обсягу досліджуваної середовища, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань його частинок. Конструкція та конфігурація зазначених джерел визначають режими перетворення для формування різних типів хвиль, таких як поздовжні та поперечні об'ємні хвилі, збуджувані перпендикулярно поверхні зразка похилі поперечні хвилі та спрямовані моди (включаючи складні для збудження горизонтальної поляризації). Амплітуда та частота пружних ультразвукових коливань, сформованих електромагнітним способом, при розповсюдженні їх у гірському масиві залежить від вмісту та структури розподілу феромагнітного компонента, фізико-механічних характеристик та стану досліджуваної середовища, тобто мінералогічних структурно-текстурних особливостей порід, що його складають. Цей процес обумовлений поглинанням та розсіюванням енергії ультразвукових хвиль і відповідно несе інформацію щодо середовища розповсюдження. Моделювання зазначеної процедури вимірювань відбувалось у два етапи: спочатку визначалися особливості формування магнітного поля у феромагнітній гірській породі під впливом електромагнітного імпульсу, а потім імітувалася генерація ультразвукових сигналів у досліджуваній середовищі та вплив на їх характеристики випадкових збурень. Запропонований підхід дозволяє дослідити метод неруйнівного безконтактного вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Ключові слова: електромагнітний акустичний перетворювач, моделювання, руда, феромагнітний компонент.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Електромагнітні акустичні перетворювачі (ЕМАП) збуджують і приймають акустичні хвилі з застосуванням електромагнітного зв'язку із досліджуваним середовищем і широко використовуються в галузі неруйнівного контролю різних виробів [1-4]. ЕМАП мають суттєві переваги перед п'єзоелектричними перетворювачами: контроль ведеться через повітряний зазор без застосування контактної рідини; відсутня механічне зношування поверхонь перетворювача; на результати вимірів мало впливають нерівності поверхні об'єкта контролю. Ці якості ЕМАП дозволяють розглядати їх як перспективні елементи ультразвукових вимірювальних каналів для визначення характеристик феромагнітних гірських порід. Однак для розробки конструкції реальної вимірювальної системи необхідно виконати її моделювання та оцінити можливі варіанти алгоритму функціонування.

Аналіз досліджень і публікацій. Звичайний електромагнітний акустичний перетворювач складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля і деякого обсягу досліджуваного середовища, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань його частинок. Конструкція та конфігурація зазначених джерел визначають режими перетворення для формування різних типів хвиль, таких як поздовжні та поперечні об'ємні хвилі, збуджувані перпендикулярно поверхні зразка похилі поперечні хвилі та спрямовані моди (включаючи складні для збудження горизонтальної поляризації) [5].

У роботі [6] розглянуто проблеми, що виникають у промислових задачах, для яких ЕМАП вважаються найкращим рішенням. Наголошується, що з'явилися нові підходи за чотирма основними напрямками: моніторинг поведінки дислокацій на місці, визначення анізотропних пружних постійних, картування точкової пружності (RUM) та еволюція акустичної нелінійності.

У роботі [7] розглянуто теоретичні аспекти конструювання електромагнітних ультразвукових перетворень. Наведено модель електромагнітних ультразвукових хвилеводів, описано механізм впливу спрямованих хвиль на дефекти досліджуваного середовища, проаналізовано методи електромагнітної ультразвукової товщинометрії, хвилеводної дефектоскопії та засоби виявлення тріщин газопроводів.

Повністю аналітичний метод, що поєднує електромагнітне та ультразвукове моделювання для дослідження масиву електромагнітних акустичних перетворювачів (ЕМАП) представлений у роботі [8]. Аналітичне рішення задачі про вихрові струми для меандрової котушки, що використовується в ЕМАП, адаптоване до класичного рішення W.E. Deeds і C.V. Dodd, яке спочатку призначалося для круглих котушок. Рішення, отримане внаслідок цієї нової адаптації, використовує екстраполяцію великого радіуса і демонструє кілька переваг порівняно з методом кінцевих елементів (МКЕ), особливо у високочастотному режимі. Розрахована щільність сили Лоренца потім використовується у ультразвуковому моделюванні для визначення розподілу поверхневих хвиль. Отримані результати полегшують оптимізацію конструкції ЕМАП.

Існуючі розробки в галузі електромагнітного акустичного перетворення зосереджені в основному на дефектоскопії та оцінці якості металевих виробів і для визначення можливості їх використання для неконтактного вимірювання характеристик гірських феромагнітних порід необхідні додаткові дослідження.

Постановка завдання. Завданням дослідження є моделювання процесів електромагнітного акустичного перетворення для конструювання безконтактного із контрольованим середовищем ультразвукового вимірювального каналу та обґрунтуванні можливості його використання в процедурі визначення характеристик залізної руди.

Викладення матеріалу і результати. У феромагнітних провідних матеріалах одночасно присутні три механізми акустичного перетворення: сила Лоренца, магнітострикційна сила і сила намагнічування.

Механізм перетворення сили Лоренца у феромагнітних середовищах аналогічний тому, що відбувається в неферомагнітних провідних матеріалах [9], але через різні електромагнітні параметри матеріалів величина сили Лоренца різна. Рис.1 ілюструє процес генерації ультразвукових хвиль на основі сили Лоренца [10]. Повна напруженість магнітного поля в середовищі є

суперпозицією змінного магнітного поля та статичного магнітного поля постійного магніту [11]. Високочастотний змінний струм J_c у котушці створює змінне електричне поле, яке генерує в досліджуваному середовищі індукційний струм. Індуковані вихори формують сили Лоренца F_L у середовищі під дією статичного магнітного поля зміщення B_s постійного магніту. Залежно від фізико-механічних характеристик середовища це викликає його пружну деформацію та періодичну вібрацію частинок з яких воно складається. Вібрація поширюється у середовищі у вигляді ультразвукових хвиль.

Процес збудження ультразвукових хвиль на основі сили Лоренца можна описати наступною системою рівнянь [10]

$$\begin{cases} \nabla \times H_d = J_c; \\ B_d = \mu H_d; \\ \nabla \times E_e = -\partial B_d / \partial t; \\ J_e = \gamma E_e, \end{cases} \quad (1)$$

де H_d – напруженість змінного магнітного поля; B_d – магнітна індукція змінного магнітного поля; μ – відносна магнітна проникність середовища; E_e – напруженість електричного поля, створюваного індукцією змінного магнітного поля; γ – електропровідність середовища; J_e – густина вихрових струмів у середовищі.

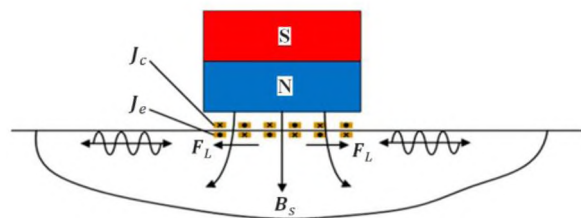


Рис. 1. Принципова схема механізму електромагнітної генерації ультразвукової хвилі на основі сили Лоренца

Таким чином, сила Лоренца F_L в середовищі визначається векторною сумою статичної сили Лоренца F_s і динамічної сили Лоренца F_d [10]

$$F_L = F_d + F_s = J_e \times B_d + J_e \times B_s. \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що сила Лоренца F_L тісно пов'язана із щільністю вихрових струмів, інтенсивністю магнітної індукції змінного магнітного поля та напруженістю статичного магнітного поля. Збільшення сили Лоренца збільшує амплітуду пружних коливань частки досліджуваного середовища.

Аналітичні рішення для кільцевої котушки над шаруватим провідником запропоновано у [12,13]. Основними рівняннями для розрахунку індукованого вихрового струму є

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= -\mu J_c + \mu \gamma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu \zeta \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \mu \nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times A), \\ E_e &= -j\omega A, \end{aligned} \quad (3)$$

де A – векторний потенціал; μ , γ і ζ – проникність, провідність і діелектрична проникність середовища відповідно; J_c – густина прикладеного струму, ω – кутова частота змінного струму, E_e – напруженість електричного поля.

Аналітичне рішення для розрахунку векторного потенціалу має такий вигляд [13]

$$\begin{aligned} A(r, z) &= M \int_0^\infty \frac{1}{a^2} \left(\int_{r_1}^{r_2} x J_1(x) dx \right) J_1(ar) (e^{-al} - e^{-a(l+h)}) \frac{e^{a_1 z}}{a+a_1} da, \\ M &= \mu_0 N J_c; \\ a_1 &= \sqrt{a^2 + j\omega \mu_1 \gamma}, \end{aligned} \quad (4)$$

де N – витки котушки, a та x – змінні інтегрування, $J_1(x)$ та $J_1(ar)$ – функції Бесселя першого роду, μ_0 і μ_1 – проникність повітря та досліджуваного середовища відповідно, l , h , d , r_1 , r_2 – геометричні параметри вимірювального каналу.

Магнітострикційна сила та сила намагнічування змінюються нелінійно з прикладеним магнітним полем.

Під дією змінного магнітного поля акустичні хвилі порушуються механічними коливаннями, які викликаються періодичним розтягуванням та стисненням матеріалу. Сила намагнічування F_M створюється змінним магнітним полем відповідно до виразу [14]

$$F_M = \mu_0 M \nabla H, \quad (5)$$

де μ_0 – магнітна проникність у вакуумі, M – вектор намагніченості.

Електромагнітне перетворення у феромагнітних матеріалах також включає магніто-стрикційний ефект. Для феромагнітних матеріалів магнітострикційна залежність може бути виражена як [14]

$$T_{\sigma} = C_{\epsilon} G_{\epsilon} - N^T H, \quad (6)$$

$$B = D_M^T T_{\sigma} + \mu_0 K_{\mu}^T H, \quad (7)$$

де G_{ϵ} - матриця деформації, T_{σ} - матриця тензора напруг, K_{μ}^T - матриця оборотної магнітної проникності матеріалу, μ_0 - магнітна проникність вакууму, H - динамічна напруженість магнітного поля, B - магнітна індукція, D_M^T - п'єзoeлектрична матриця жорсткості, C_{ϵ} - матриця жорсткості, N^T - магнітна матриця зворотного тиску.

Рівняння (6) описує прямий магнітострикційний ефект, тобто механічну деформацію (зміщення), викликану прикладеним магнітним полем. Рівняння (7) описує зворотний магнітострикційний ефект, тобто зміну щільності магнітного потоку і електричного сигналу, що реєструється датчиком під дією механічної деформації. Напруженість магнітного поля H та магнітострикційна сила f_M пов'язані залежністю [14]

$$f_M = -\nabla_t(N^T H). \quad (8)$$

Таким чином, механізм формування ультразвукових хвиль у феромагнетику під дією електромагнітного імпульсу може бути представлений у вигляді суми трьох доданків

$$F = F_M + F_L + f_M. \quad (9)$$

Перший доданок у виразі (9) - сила намагнічування, друге - сила Лоренца, а третє - магнітострикційна сила. Однак у більшості випадків F_M можна знехтувати, оскільки ця сила відносно мала.

Зазначені механізми електромагнітного формування ультразвукових пружних хвиль у феромагнітному середовищі використовуються при розробленні електромагнітних акустичних перетворювачів (ЕМАП).

Формування пружних коливань представляють набором рівнянь у частинних похідних, що описують деформування матеріалу та навантаження внутрішнім напруженням [13, 15, 16]

$$\rho(x) \frac{\partial v_i}{\partial t}(x, t) = \sum_{j=1}^d \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}(x, t) + f_i(x, t); \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \sum_{j=1}^d \sum_{k=1}^d c_{ijkl}(x) \frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \theta_{ij}(x, t), \quad (11)$$

де ρ - масова щільність, c_{ijkl} - 4-й тензор жорсткості досліджуваного зразка; f_i та θ_{ij} є джерелом сили та джерелом швидкості тензора деформації відповідно.

Параметрами, які потрібно обчислити, є швидкість v_i та тензор напруги T_{ij} . Рівняння (10) є другим законом Ньютона: коли до тестового зразка прикладається сила, виникають напруга та деформація, а також зміщення частинок. Рівняння (11), засноване на законі Гука, описує співвідношення тензора швидкості напружень і тензора швидкості деформації, коли відбувається деформація.

Ці процеси добре відображає модель Баттерворта - Ван Дайка (BvD), в якій присутні основні параметри ультразвукових перетворювачів [17,18]. Модель використовує аналогію механічних та електричних параметрів ультразвукового перетворювача (табл.1).

З урахуванням цієї аналогії для моделювання ультразвукового перетворювача зручно використовувати теорію електричних кіл (рис. 2) [17-19].

Таблиця 1

Аналогія механічних та електричних параметрів ультразвукового перетворювача [19, 20-22]

Механічний параметр	Символ механічний		Символ електричний	Електричний параметр
Маса	m	$\leftrightarrow$	L	Індуктивність
Демпфування	d	$\leftrightarrow$	R	Індуктивність
Постійна пружності	c	$\leftrightarrow$	$1/C$	1/Ємність
Сила	F_0	$\leftrightarrow$	V_0	Напруга
Переміщення	x	$\leftrightarrow$	Q	Заряд
Швидкість	$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = v$	$\leftrightarrow$	$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = i$	Струм
Прискорення	$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = a$	$\leftrightarrow$	$\ddot{Q} = \frac{d^2Q}{dt^2} = \frac{di}{dt}$	Швидкість зміни струму

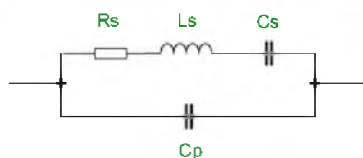


Рис. 2. Модель ультразвукового перетворювача Баттерворта - Ван Дайка (BvD)

На рис. 2 наведені: послідовно з'єднані R_s , L_s , C_s – механічна (акустична) гілка, що описує сам перетворювач, C_p – паралельна електрична гілка, яка описує електричні з'єднання [17, 18].

Комплексний імпеданс перетворювача визначається виразом

$$Z = R + jX, \quad (12)$$

де R - активний опір, X - реактивний опір.

Імпеданс гілки Z_s із послідовно з'єднаними R_s , L_s , C_s обчислюється за формулою

$$Z_s = R_s + j \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right), \quad (13)$$

де ω - кутова частота, R_s - резистор, L_s - індуктивність, C_s - ємність послідовної гілки моделі BvD (рис. 2).

Імпеданс паралельної гілки Z_p визначається ємністю C_p

$$Z_p = \frac{1}{j\omega C_p}. \quad (14)$$

Об'єднання рівняння 12 з рівняннями 13 та 14 дає

$$Z = \left[\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right) - jR_s \right] / \left[j\omega R_s C_p + j \left(\omega^2 L_s C_p - \frac{C_p}{C_s} - 1 \right) \right]. \quad (15)$$

При роботі ультразвукового перетворювача в режимі генерації на його резонансній частоті він підключається до джерела збудження з низьким імпедансом, наприклад, до генератора сигналів. При цьому паралельна ємність C_p і тим самим ультразвуковий перетворювач замикається накоротко. На резонансній частоті короткого замикання f_s величина імпедансу мінімальна, ультразвуковий перетворювач споживає максимальну енергію і формує максимальне механічне зміщення. Резонансна частота короткого замикання f_s розраховується за формулою [19,23]

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}}. \quad (16)$$

При роботі ультразвукового перетворювача на резонансній частоті в режимі прийому його підключають до високоомного входу підсилювача. Таким чином, ультразвуковий перетворювач працює як розімкнений ланцюг при високому імпедансі, що відповідає імпедансу підсилювача. Резонансна частота холостого ходу f_0 розраховується за формулою [19,23]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s \frac{C_s C_p}{C_s + C_p}}}. \quad (17)$$

Обидва рівняння (16) і (17) для більшості ультразвукових перетворювачів дають хороші наближення щодо їх резонансів f_s та f_0 [19].

Амплітуда та частота сформованих пружних ультразвукових коливань при розповсюдженні їх у досліджуваному середовищі залежить від вмісту і структури розподілу феромагнітного компонента в гірській породі, фізико-механічних характеристик і стану гірського масиву, тобто мінералогічних структурно-текстурних особливостей порід, що його складають. Цей процес обумовлений поглинанням і розсіюванням енергії ультразвукових хвиль і відповідно несе інформацію стосовно середовища розповсюдження.

Параметри пружних коливань (амплітуда і частота), прийнятих приймальним ЕМАП, вимірюються впродовж фіксованого проміжку часу. Величина цього проміжку визначається заздалегідь в процесі лабораторних досліджень таким чином, щоб вона була найкоротшою, але при цьому забезпечувала отримання достатньої інформації для визначення основних характеристикних ознак гірських порід.

Моделювання зазначеної процедури вимірювань відбувалась у два етапи: спочатку визначались особливості формування магнітного поля у феромагнітній гірській породі під впливом електромагнітного імпульсу, а потім імітувалось генерація ультразвукових сигналів у досліджуваному середовищі, та вплив на їх характеристики випадкових збурень.

Магнітне поле, створюване ЕМАП, моделювалось за допомогою програмного пакета Femm [24]. На рис. 3 показані результати вирішення методом кінцевих елементів осесиметричної задачі формування магнітного поля частотою 220 кГц у середовищі, характеристики якого

відповідають гірській породі, що включає феромагнітний компонент. Отримане рішення включає 5631 вузлів, 10915 елементів.

На рис. 4 наведена залежність величини магнітної індукції B від відстані l сердечника магнітної системи перетворювача до поверхні досліджуваного середовища.

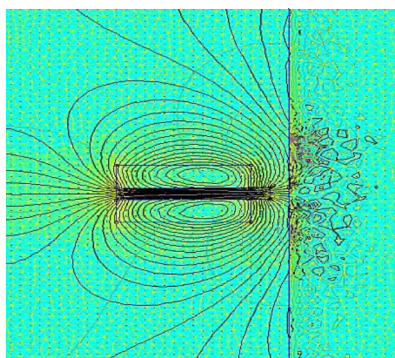


Рис. 3. Результати моделювання магнітного поля, створюваного ЕМАП у досліджуваному середовищі: осесиметричне рішення, частота 220 кГц

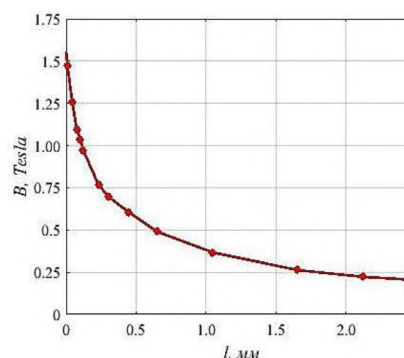
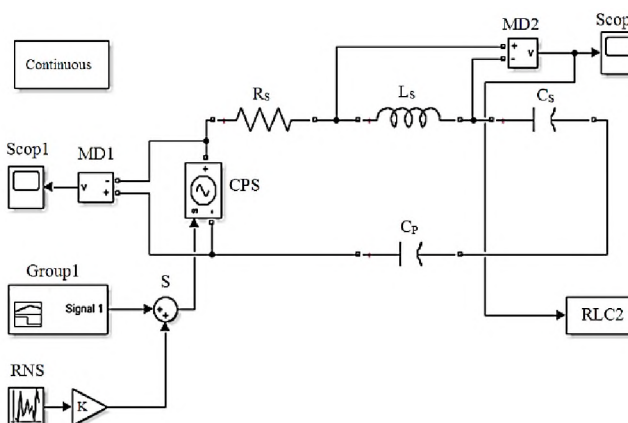


Рис. 4. Залежність величини магнітної індукції B від відстані l сердечника електромагніту до досліджуваного середовища

Моделювання процедури формування ультразвукових хвиль проводилось із застосуванням графічного інтерфейсу Powergui FFT Analysis Tool програмного пакету Simulink/Matlab [25]. На рис. 5 наведена схема, яка досліджувалась в процесі моделювання (відповідає моделі ультразвукового перетворювача Баттерворта - Ван Дайка (BvD)).

Рис. 5. Блок-схема моделі RLC2: Scop1, Scop2 - осцилографи, Group1 - конструктор сигналів, CPS - керуване джерело живлення, RNS - джерело випадкового шуму, MD1, MD2 - вимірювальні пристрої, R_s - резистор, L_s - індуктивність, C_s , C_p - ємності, K - масштабуючий блок, RLC2 - вихід моделі у робочу область Matlab

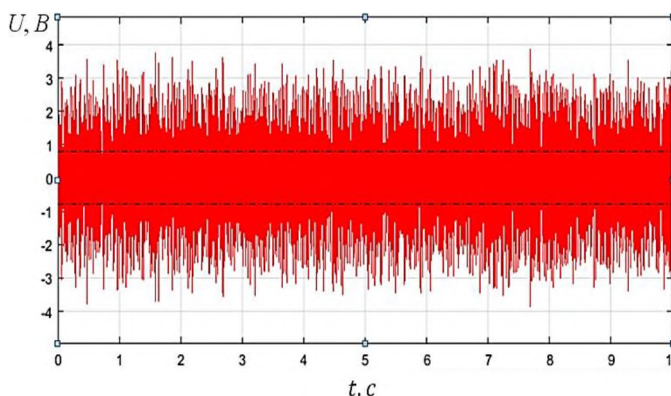


На сформований сигнал частотою 220 кГц накладався випадковий шум різної інтенсивності, проводилась обробка сигналу методом швидкого перетворення Фур'є (FFT) і застосовувались різноманітні методи аналізу отриманих результатів. На рис. 6 наведена реалізація одного із вимірювань на екрані Scop2 (штрихові лінії виділяють середньоквадратичне значення (std) сигналу).

Наявність зазначених особливостей гірського масиву призводить до модуляції ультразвукового сигналу, який в ньому розповсюджується. Формування частот, які відрізняються від частоти основного вхідного сигналу, є результатом спотворення форми сигналу у часовій області після певної відстані поширення. Ультразвукова хвиля перетворюється через нелінійність середовища розповсюдження, і за рахунок цього формуються інші частоти у її спектрі.

Рис. 6. Вигляд аналізованого сигналу на екрані Scop2

Для кількісної оцінки нелінійних спотворень сигналу, що пройшов через досліджуване середовище, обчислювався коефіцієнт нелінійних спотворень THD (Total Harmonic Distorsions) – величина, що визначається ставленням середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік U_n сигналу до напруги першої гармоніки U_1 (основної або фундаментальної)



$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (18)$$

Виконаний розрахунок THD включає всі інтергармоніки аналізованого сигналу. Вплив змін інтенсивності випадкового шуму на обчислене повне гармонійне спотворення аналізованого сигналу характеризують дані, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати моделювання впливу змін інтенсивності випадкового шуму на характеристики вихідного сигналу моделі

Параметр	min	max	mean	median	mode	std	range	THD
$K = 1.00$	-3.8627	3.8631	2.2780e-05	-1.9145e-04	-3.8627	0.7935	7.7260	53.82
$K = 0.75$	-2.8965	2.8965	3.0076e-05	2.2771e-04	-2.8965	0.5953	5.7930	53.06
$K = 0.50$	-2.0002	1.9788	1.8948e-05	-2.0719e-04	-2.0002	0.3980	3.9790	46.37
$K = 0.25$	-1.4970	1.3871	-1.0172e-05	1.3191e-04	-1.4970	0.2037	2.8841	45.20

Таким чином, модель електромагнітного акустичного перетворювача дозволяє надати кількісну оцінку впливу нелінійного спотворення сформованого ультразвукового сигналу та випадкового шуму на результати вимірювань.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Запропонований підхід щодо моделювання формування ультразвукових хвиль у феромагнітному провідному середовищі на основі електромагнітного акустичного перетворювача дозволяє дослідити метод неруйнівного безконтактного вимірювання характеристик гірських порід із відповідними властивостями. Сукупність результатів вимірювань параметрів аналізованого сигналу характеризує як лінійні, так і нелінійні характеристики середовища, що моделюється. Для реалізації цього методу акустичного перетворення не потрібна наявність проміжної рідини, чи спеціальних пристроїв для введення пружних коливань у гірський масив, що сприяє розширенню сфери його застосування.

Напрямок подальших досліджень є розробка, моделювання та обґрунтування методу розпізнавання технолого-мінералогічних характеристик феромагнітних гірських порід залізрудного родовища із застосуванням ультразвукового вимірювального каналу на основі електромагнітних акустичних перетворювачів.

Список літератури

1. Furuya Y., Torizuka S., Takeuchi E., Bacher-Höchst M., Kuntz, M. Ultrasonic fatigue testing on notched and smooth specimens of ultrafine-grained steel. *Mater. Des.* 2012, 37, 515–520.
2. Clough M., Fleming M., Dixon S. Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound. *NDT E Int.* 2017, 86, 20–27.
3. Trushkevych O., Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system. *Ultrasonics* 2019, 107, 102140:1–102140:9.
4. Thring C.B., Fan Y., Edwards R.S. Focused Rayleigh wave EMAT for characterisation of surface-breaking defects. *NDT E Int.* 2016, 81, 20–27.
5. Aliouane S., Hassam M., Badidi Bouda A., Benchaala A. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). Design Evaluation of their Performances. <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn591/idn591.htm>.
6. Masahiko Hirao, Hirotugu Ogi. Electromagnetic Acoustic Transducers. - *Springer Series in Measurement Science and Technology* (SSMST), 2017. – 380 p. DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4.
7. Huang Songling, Li Weibin, Wang Qing. *Electromagnetic ultrasonic guided waves*. CERN Document Server. - 2016-01-01.
8. Yuedong Xie, Liyuan Yin, Rodriguez G. Sergio, Wuliang Yin. A wholly analytical method for the simulation of an electromagnetic acoustic transducer array - *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. - August 2016, 51(4):375-389. DOI: 10.3233/JAE-150137.
9. Hirao M., Ogi H. EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements; Springer: Boston, MA, USA, 2003; pp. 39–67.
10. Lan J., Zhang J., Jia X., Gao R. Optimization Design of Surface Wave Electromagnetic Acoustic Transducers Based on Simulation Analysis and Orthogonal Test Method. *Sensors*. 2022; 22(2):524. <https://doi.org/10.3390/s22020524>.
11. Li Y., Liu Z., Miao Y., Yuan W., Liu Z. Study of a spiral-coil EMAT for rail subsurface inspection. *Ultrasonics*, 2020, 108, 106169.
12. C. V. Dodd, W. E. Deeds, Analytical solutions to eddy current probe-coil problems, *Journal of Applied Physics*, vol. 39, no. 6, pp. 2829–2838, 1968.
13. Yuedong Xie, Sergio Rodriguez, Wenbo Zhang, Zenghua Liu, Wuliang Yin. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. - *Journal of Sensors*. Volume 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5451821>.
14. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin, Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. - *Appl. Sci.* 2020, 10, 5534; doi:10.3390/app10165534.
15. E. Bossy. SimSonic Suite User's Guide for SimSonic3D, 2012.

16. **J. Virieux.** P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, vol. 51, no.4, pp. 889–901, 1986.
17. **S. Butterworth.** On Electrically-maintained Vibrations. In: *Proceedings of the Physical Society of London*. Vol. 27. 1914, pp. 410–424.
18. **K. S. Van Dyke.** The Piezo-Electric Resonator and Its Equivalent Network. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 16.6 (June 1928), pp. 742–764. ISSN: 0731-5996. DOI: 10.1109/JRPROC.1928.221466.
19. Luftgekoppelte Ultraschallwandler für die industrielle Anwendung. Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation von Alexander Unger aus Cottbus: 19. Juni 2019, Darmstadt - D 17. URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-89745.
20. **G. Sessler, R. Lerch, D. Wolf.** Technische Akustik. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-23430-2.
21. **W. P. Mason.** Electromechanical Transducers and Wave Filters. 2nd ed. D. van Nostrand Company, Inc., 1942. URL: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.13601>.
22. **H. F. Olson.** Acoustical Engineering. 1st ed. D. van Nostrand Company, Inc., 1957. URL: http://cyrille.pinton.free.fr/electroac/lectures_utiles/son/Olson.pdf.
23. **W. Weißgerber.** Elektrotechnik für Ingenieure 2. 6th ed. Vieweg, 2007. ISBN: 978-3-8348-0191-3.
24. **Meeker D.** Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
25. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>.

Рукопис подано до редакції 24.04.2023

УДК: 624.131.1:69.04

О.О. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., В.О. ЯРОШЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ІНЖЕНЕРНА ГЕОЛОГІЯ ТА ГЕОТЕХНІКА В КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ, СПОРУД ТА КОМУНІКАЦІЙ

Мета. Метою статті є ознайомлення з організацією і складом робіт при інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукуваннях, основними задачами передпроектних інженерно-геологічних вишукувань, інженерно-геологічної розвідки, а також зі складом та змістом типових звітів з інженерних досліджень.

Методи дослідження. Аналіз літературних джерел щодо питання інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукувань. Вивчення нормативних документів, державних будівельних норм з огляду питання інженерних вишукувань.

Наукова новизна полягає в: узагальненні та структуруванні інформації щодо організації та складу робіт при інженерно-геологічних, геотехнічних вишукуваннях та надання її широкому загалу; описі основних задач рекогносцирувальних маршрутних обстежень, як основних робіт які передують початку будь-якого об'єкту будівництва; узагальненні та структуруванні інформації щодо основних характеристик ґрунтів та їх розрахунків; описі методів визначення основ, підвалів та фундаментів.

Практична значимість. В даній статті приведені й структуровані матеріали стосовно інженерно-геологічних, геотехнічних робіт, аналізу нормативних документів стосовно даного питання, що можуть слугувати основою для розробки превентивних методів та засобів зменшення шкоди при просіданні земної поверхні, а також інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів тощо.

Результати. За результатами опрацювання літературних науково-дослідницьких джерел і нормативних документів було вивчено та описано: як стійкість порід впливає на процес будівництва; ведення передпроектних робіт; проведення досліджень. Детально описано для чого потрібні рекогносцирувальні маршрутні обстеження. Вказано, що таке геофізичні дослідження, яку роль вони виконують та приведення діючих державних будівельних норм з їх видів та об'ємів робіт. В результаті виявлено, що геофізичні роботи повинні йти завжди на випередження усіх інших інженерно-геологічних робіт. Описано основні фізичні розрахункові характеристики ґрунтів.

Вказана підбірка методів та їх принципи, за якими можна визначати процеси осідання основ, підвалів та фундаментів. Описана методика розрахунку осідання основ наближеним методом, запропонована професором І. О. Розенфельдом.

Ключові слова: інженерна геологія, будівництво, зсуви, обвал, просідання поверхні, ґрунт, вишукування, геотехнічні роботи, стійкість, землетрус.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В результаті розробки родовищ корисних копалин впливають серйозні порушення балансу в природі, зокрема порушення стійкості земної поверхні. При будь-якому виді розробки родовищ – відкритому чи шах-