

8. Williams, J. C. The Segregation of Particulate Materials / J. C. Williams // Powder Technology, 15, 1976. – P. 245.
9. Enstad, G. G. Segregation of Powders and its Minimization in Kalman H. Ed. / Enstad, G. G. // The 2-nd Israel Conference for Conveying and Handling of Particulate Solid. Proceedings. – Jerusalem, 1997. – P. 11 – 52.
10. Shinohara, K. Some Segregation Mechanisms and their Prevention. Proc. Int. Sump. Reliable flow of Particulate Solids / K. Shinohara, G. G. Enstad. – Oslo, 1993. – P. 819.
11. Shinohara, K. Mechanism of Density Segregation of Particles in Filling Vessels / K. Shinohara, S. Miyata // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 23(3). – 1984. – P. 423].
12. Кізева́льте́р Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 296 с
13. Блехман И.И. К теории разделения сыпучих смесей под воздействием колебаний / И.И.Блехман, В.Я.Хайнман // Инженерный журнал «Механика твердого тела». 1968. № 6, С.5-13.
14. Богданович А.В. Сравнительные испытания центробежных концентраторов различных типов / А.В.Богданович, С.В.Петров // Обогащение руд. 2001. № 3. С.38-41.
15. Khakhar, D. V. Radial Segregation of Granular Mixtures in Rotating Cylinders / D. V. Khakhar, J. J. McCarthy, J. M. Ottino // Phys. Fluids. – 1997. – 9. – 3600.
16. Gray, J. Particle-size Segregation and Diffusive Remixing in Shallow Granular Avalanches / J. Gray, V. A. Chu-gunov // Journal of Fluid Mechanics. – 2006. – 569. – P. 365 – 398.
17. Hill, K. M. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // Kona. – 2016. – V. 33. – P. 150 – 168.
18. Gray, J. Theory for Particle Size Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / J. Gray, A. R. Thornton // Proceedings of the Royal Society of London A. – 2005. – 461(2057). – P. 1447 – 1473.
19. Tripathi, A. Density Difference-driven Segregation in a Dense Granular Flow / A. Tripathi, D. V. Khakhar // J. Fluid Mech. – 2013. – 717. – P. 643 – 669.
20. Fan Y. Modelling Size Segregation of Granular Materials: the Roles of Segregation, Advection and Diffusion / Y. Fan, C. P. Schlick, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, R. M. Lueptow // J. Fluid Mech. – 2014. – 741. – P. 252 – 279.
21. Tunuguntla, D. R. A Mixture Theory for Size and Density Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / D. R. Tunuguntla, O. Bokhove, A. R. Thornton // Journal of Fluid Mechanics. – 2014. – 749. – P. 99 – 112.
22. Dolgunin V. N. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles /, A. N. Kudi, A. A. Ukolov, M. A. Tuv // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – 122. – P. 22 – 32.
23. Dolgunin, V. N. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Powder Technology. – 1998. – 56. – P. 211 – 218. 132
24. Dolgunin, V. N. Segregation Kinetics of Particles with Different Roughness and Elasticity under a Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2009. – 43(2). – P. 187 – 196.
25. Fan, Y. Shear-induced Segregation of Particles by Material Density / Y. Fan, K. M. Hill // Phys. Rev. E. – 2015. – 022211.
26. Hill, K. M. Segregation in Dense Sheared Flows: Gravity, Temperature Gradients, and Stress Partitioning / K. M. Hill, D. S. Tan // J. Fluid Mech. – 756. – 2014. – P. 54 – 88.

Рукопис подано до редакції 13.03.2023

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
А. А. ГАПОНЕНКО, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти
Криворізький національний університет

МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ПРАКТИЦІ БЕЗКОНТАКТНИХ НЕРУЙНІВНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Метою дослідження є аналіз методів формування ультразвукових хвиль для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

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

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів та визначенні їх можливої конфігурації для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Практичне значення полягає в тому, що використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів запропонованої конструкції дозволить створити вимірювальну систему для мінералогічного аналізу феромагнітних руд для функціонування якої не потрібен контакт з досліджуванним середовищем.

Результати. У практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли п'єзoeлектричні та електромагнітні перетворювачі (ЕМАГ). Ці перетворювачі можуть працювати, як у режимі генерації ультразвуку, так і як його детектор, відрізняються порівняно невеликим споживанням енергії та малими габаритами, перекривають широкий частотний діапазон і здатні формувати різні види ультразвукових хвиль. Вимірювальні системи з ЕМАГ мають усі переваги ультразвукових вимірювань у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю. Як і з п'єзoeлект-

ричними датчиками, за допомогою ЕМАТ можуть бути реалізовані різні методи вимірювань: ехо-імпульсні, з тангажем, наскрізною передачею та ін. Порівняльна характеристика та аналіз різних методів генерації та прийому ультразвуку дозволяють зробити висновок про те, що при реалізації акустичних вимірювань характеристик феромагнітної руди доцільно використовувати електромагнітні перетворювачі ЕМАТ з високоенергетичною імпульсною системою збудження без статичного магнітного зміщення. Це дозволить проводити вимірювання без фізичного контакту між перетворювачем та випробуваним зразком та простіше генерувати різні типи ультразвукових хвиль. Для спрощення налаштування геометрії вимірювального каналу та збільшення його функціональних можливостей, ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, електромагнітний перетворювач, руда, аналіз.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Методи ультразвукового контролю використовуються у багатьох галузях науки і техніки. В практиці неруйнівного контролю ультразвук знайшов широке застосування для дефектоскопії різних виробів та контролю їх геометричних параметрів: вимірювання товщини сталевого прокату, виробничий та експлуатаційний контроль зварних швів труб, трубопроводів, компонентів та агрегатів у машинобудуванні, огляд залізничних колій та ін. [1]. Ультразвук незамінний у різноманітних біомедичних застосуваннях [2]. Також ультразвукові вимірювання активно застосовуються для визначення характеристик твердих, рідких і газоподібних матеріалів [3,4]. Ефективність та якість ультразвукових вимірювань багато в чому визначаються методом генерації та прийому ультразвукових хвиль. Це особливо стосується таких складних гетерогенних структур, якими є руда та супутні породи. Наявність інформації про фізико-механічні та хіміко-мінералогічні характеристики руди дозволяє ефективно управляти технологічним процесом її підготовки до металургійного переділу [5]. Вирішенню цієї проблеми присвячено велику кількість досліджень, але поки результати жодного з них не набули широкого практичного поширення.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі різні методи генерації ультразвуку, що відрізняються видом перетворюваної енергії: аеродинамічні (перетворюють енергію газових потоків), гідродинамічні (перетворюють енергію струменя рідини), електромеханічні (використовують енергію коливань різних механічних пристроїв), теплові (перетворюють енергію теплового удару), електророзрядні (перетворюють енергію електричного розряду в рідині), вибухові (перетворюють енергію вибуху) та ін [6]. Останнім часом відзначається великий прогрес у розробці лазерних та різноманітних оптичних систем на їх основі [7]. Однак у практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли електроакустичні перетворювачі: п'єзoeлектричні, електростатичні та електромагнітні (рис. 1) [8,9].

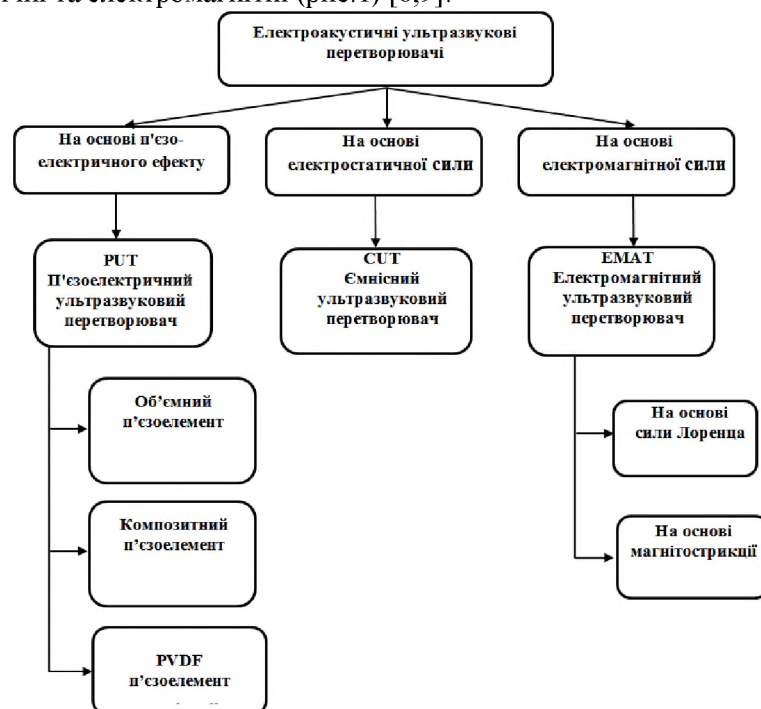


Рис.1. Електроакустичні перетворювачі

Ці перетворювачі можуть працювати, як в режимі генерації ультразвуку, так і як його детектор, відрізняються порівняно невеликим споживанням енергії і малими габаритами, перекривають широкий частотний діапазон і здатні формувати різні види ультразвукових хвиль [10].

Постановка завдання: обґрунтування використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів та визначення їх можливої конфігурації для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Викладення матеріалу і результати. У режимі генерації ультразвуку електроакустичні перетворювачі перетворюють електричну енергію на акустичну. Перетворення енергії не відбувається безпосередньо. Електрична енергія в першу чергу перетворюється на механічну, а потім механічна енергія перетворюється на акустичну. При цьому акустична енергія є особливою областю механічної енергії. Той самий принцип здійснюється і при зворотному перетворенні, коли перетворювачі працюють в режимі прийому ультразвукового сигналу: спочатку акустична енергія перетворюється на механічну, а потім механічна енергія перетворюється на електричну. Наведені перетворення визначає діаграму спрямованості ультразвукового перетворювача та його ефективність [11].

Ультразвукові перетворювачі, що ґрунтуються на п'єзоелектричному принципі, в даний час є найбільш застосовуваними в різних сферах науки і техніки. Основний їх елемент, який виготовляється з п'єзоелектричних матеріалів, має електричну поляризацію при механічній напрузі або деформації. Ця властивість (прямий п'єзоелектричний ефект) використовується для прийому ультразвукових сигналів. В результаті зворотного п'єзоелектричного ефекту п'єзоелектрики деформуються за дією прикладеної напруги і ця їхня властивість використовується для генерації ультразвуку.

До перетворювачів на основі п'єзоелектричного ефекту відносяться: ультразвукові перетворювачі з одним об'ємним п'єзоелементом (мономорфні) або складові; композитні ультразвукові перетворювачі; ультразвукові перетворювачі PVDF.

На рис. 2а наведена конструкція класичного п'єзоелектричного перетворювача Ланжевена з болтовим кріпленням (BLT) на основі об'ємних (дискових) п'єзоелементів [12].

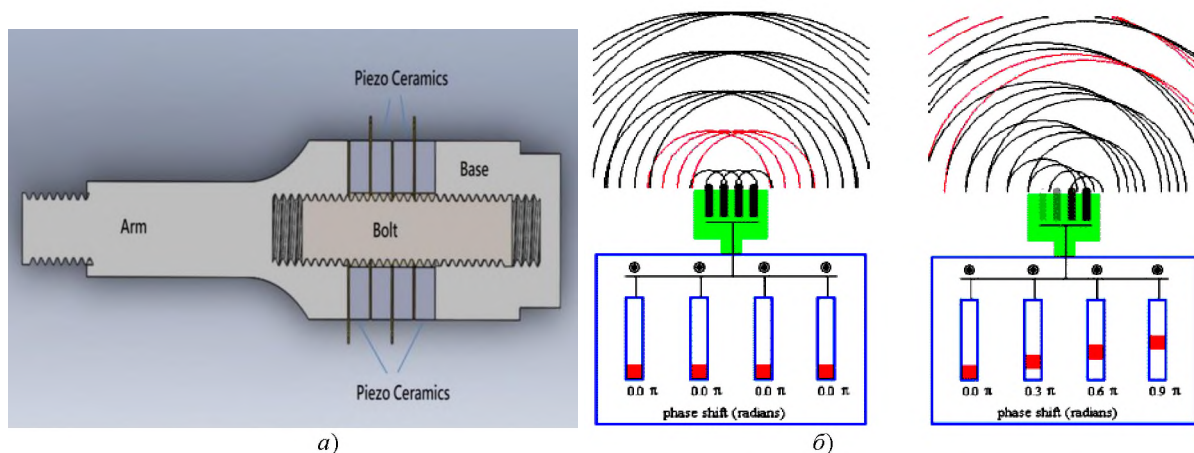


Рис. 2. Перетворювачі на основі об'ємних п'єзоелементів: *а* - перетворювач Ланжевена з болтовим кріпленням (BLT); *б* - принцип роботи складеного п'єзоперетворювача на основі технології фазованих решіток

Перетворювач Ланжевена (BLT) складається із двох металевих блоків, скріплених між собою болтом. П'єзокераміка здатна витримувати стиск (але не розтяг), тому може нормально працювати навіть за високої сили стиснення, створюваної болтовим з'єднанням. Існують різні варіанти конструкції подібних перетворювачів з одним п'єзоелементом або набором із них. В цілому, BLT мають такі позитивні якості:

- висока ефективність електромеханічного перетворення;
- можуть бути виготовлені з різної п'єзокераміки для одержання цільової резонансної частоти та амплітуди;
- можуть використовувати до 8 п'єзокерамічних елементів для збільшення вихідної амплітуди;

болт, що застосовується в BLT, також можна використовувати для точного налаштування загальної резонансної частоти перетворювача і амплітуди генерованого ультразвуку.

Такі властивості роблять BLT звичайним джерелом ультразвуку.

Рис. 2б ілюструє принцип роботи складового п'єзоперетворювача, що використовує технологію фазованих решіток [13]. Ультразвукові промені керуються шляхом регулювання часу затримки активації кожного елемента перетворювача. Закономірності впливу часу затримки на процеси випромінювання та прийому ультразвуку знаходяться в пам'яті регулятора часу затримки, який зсуває імпульси збудження під час передачі та сигнали відбитих хвиль у процесі їх прийому.

Алгоритм затримки, стосовно кожного елемента перетворювача, розташованого в точці $x = (x_n, y_m)$ променю під кутом до певної траєкторії, з фокальною точкою F у матеріалі, що характеризується швидкістю поширення c , визначаються різницею часу поширення [14]

$$\Delta\tau_{nm}(x; F) = (|F - x_0| - |F - x|) / c, \quad (1)$$

де x_0 - центральне положення перетворювача матриці.

Фокус F виражається кутом падіння (зенітним кутом) θ і кутами повороту (азимутальними кутами) ϕ

$$F = (F_1, F_2, F_3) = (R \sin \theta \cos \phi, R \sin \theta \sin \phi, R \cos \theta). \quad (2)$$

Тому вираз, що визначає запізнення $\Delta\tau_{nm}$ має вигляд

$$\Delta\tau_{nm}(x; F) = R \left[1 - \sqrt{(\sin \theta \cos \phi - x_n/R)^2 + (\sin \theta \sin \phi - y_m/R)^2 + \cos^2 \theta} \right] / c. \quad (3)$$

Для перетворювачів з лінійною решіткою рівняння (3) спрощується

$$\Delta\tau_{nm}(x; F) = R \left[1 - \sqrt{(\sin \theta - x_n/R)^2 + \cos^2 \theta} \right]. \quad (4)$$

При кінцевому обмеженні фокусної відстані R рівняння (3) та (4) матимуть такий вигляд

$$\Delta\tau_{nm}(x; \theta, \phi) = x_n \sin \theta \cos \phi / c + y_m \sin \theta \sin \phi / c. \quad (5)$$

$$\Delta\tau_n(x; \theta) = x_n \sin \theta / c. \quad (6)$$

Наведені вирази дозволяють сформулювати управління елементами матричного перетворювача обраної конфігурації таким чином, щоб регулювати інтенсивність та змінювати просторові координати ультразвукового впливу із заданими параметрами на середовище, що досліджується.

П'єзоелектрична кераміка на основі цирконату-титанату свинцю (PZT) - функціональний матеріал, який широко використовується у виробництві ультразвукових перетворювачів, завдяки високому коефіцієнту електромеханічного зв'язку, широкому діапазону діелектричної проникності, низьким механічним втратам, простоті виготовлення та низькій вартості [15,16]. Однак через високий акустичний імпеданс чистої PZT їх поперечний зв'язок в режимі резонансу товщини великий, смуга пропускання вузька, і тому перетворювач, виготовлений з неї має суттєві обмеження у сфері застосування. Ці недоліки значною мірою усуваються шляхом змішування чистої п'єзоелектричної кераміки PZT з полімерами та створення, таким чином, п'єзоелектричних композитів. П'єзокомпозити стали кращим матеріалом для багатьох високоефективних ультразвукових перетворювачів з того часу, як вони були винайдені Р.Е. Newnham та Л.Е. Cross наприкінці 1970-х. П'єзоелектричні композити складаються з матеріалів п'єзоелектричної керамічної фази PZT та матеріалів полімерної фази з певною зв'язністю, об'ємом, вагою та просторовим геометричним розподілом (рис. 3) [17]. Зв'язність визначається кількістю вимірів, через які матеріал є безперервним. Зазвичай перша цифра відноситься до п'єзоелектрично активної фази. Відомі композити зі зв'язністю: 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 1-3, 2-2, 2-3 та 3-3. З них, 1-3 п'єзоелектричні композити є найбільш широко досліджуваними та застосовуваними.

П'єзокомпозити мають такі переваги у порівнянні зі стандартною об'ємною п'єзокерамікою: нижчий акустичний імпеданс, від 5 MРауl до 27 MРауl; високі коефіцієнти зв'язку, від 0,61 до 0,75; висока пропускна спроможність [18]. Недоліки п'єзокомпозитів порівняно з об'ємними п'єзокерамічними компонентами, як правило, полягають у більш високій вартості та часто обмеженому діапазоні робочих температур. Використання різних технологій дозволяє виробляти 1-3 композити для частот від 80 кГц до 10 МГц, з коефіцієнтом заповнення від 15% до 80% і розмірами до 100 мм на 100 мм.

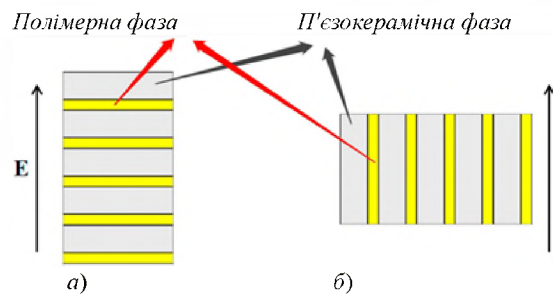


Рис. 3. Структура п'єзоелектричних композитів: *а* – послідовна; *б* – паралельна

Якщо для перетворювачів, що працюють у рідких контактних середовищах, потрібна широка смуга пропускання або фокусуюча дія, то як матеріал перетворювача доцільно розглядати п'єзоелектричні плівки з полівініліденфториду (PVDF). Використовуючи прості методи з'єднання, можна легко виготовити перетво-

ривачі, що працюють у діапазоні 1-100 МГц, з плоскими та/або криволінійними поверхнями. Вища чутливість порівняно з перетворювачем, що складається з однієї п'єзоелектричної плівки, досягається за рахунок використання методів кореляції з багатшаровими версіями перетворювачів з PVDF з кодуванням Баркера [19].

У роботі [20] наводяться результати моделювання накопичувача енергії та п'єзоелектричного наногенератора (PENG) на основі мікрomodифікованого полівініліденфториду (PVDF) та його сополімеру полі(вініліден-трифторетилен) (P(VDF-TrFE)) з помітним збільшенням виходу по струму. Нижня форма кантилевера має довжину 800 мкм, ширину 200 мкм і висоту 10 мкм. У площині 18 рядів та 4 стовпці циліндрів, як показано на рис. 4а. Нижня частина конструкції з'єднується із землею, а верхня поверхня циліндрів з'єднується із електричним контуром. Таким чином, PENG сприймається як джерело змінного струму (рис. 4б).

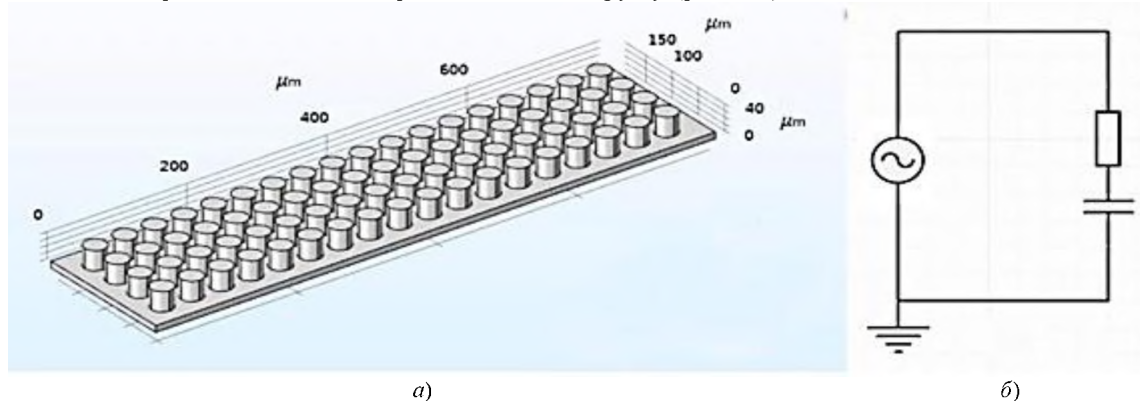


Рис. 4. П'єзоелектричний наногенератор PENG: *а* - схема поверхнево-модифікованої циліндричної структури PENG; *б* - принципова електрична схема PENG

Іншою групою поширених електроакустичних перетворювачів є ультразвукові перетворювачі, що базуються на електростатичному принципі. Вони складаються із двох електродів, звернених один до одного (рис.5) [21]. При цьому один електрод фіксується і не може рухатися чи згинатися. Протилежний електрод виготовляється тонким та може деформуватися. Це може бути або тонка фольга, що діє як мембрана, або тонка пластина, що згинається. Ці пристрої часто називають ємнісними ультразвуковими перетворювачами (CUT). Між їх електродами знаходиться повітря чи вакуум для електричної ізоляції. На відміну від ультразвукових перетворювачів, заснованих на п'єзоелектричному принципі, таких як мономорфні, складові або композитні, ємнісний перетворювач працює з використанням високої напруги зміщення постійного струму.

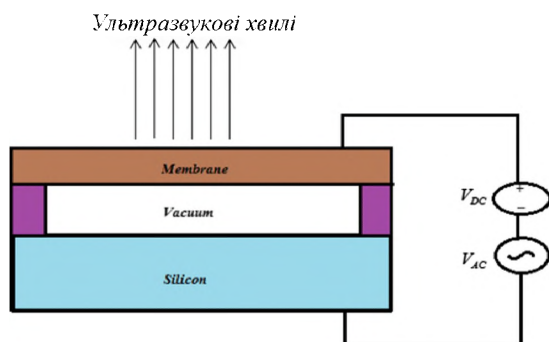


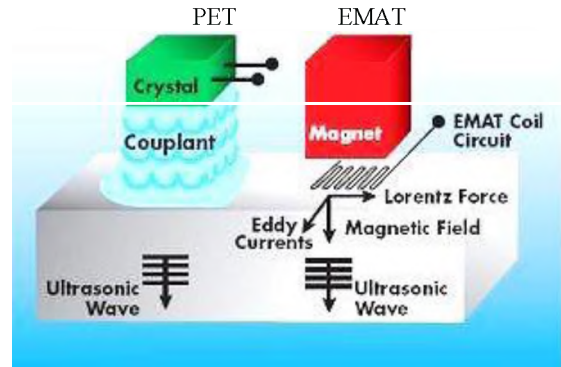
Рис.5. Конструкція електростатичного ультразвукового перетворювача

У роботі [22] показано, що використання мембрани з нітриду кремнію може збільшити сигнал, що передається на 28% і чутливість приймача на 33% у порівнянні зі звичайною полікремніевою мембраною. Моделювання з полімерною мембраною показало максимальне збільшення прогину мембрани до 67% при частоті

приблизно 6,5 МГц у порівнянні з нітридом. Крім того, оптимальна частота зв'язку механічного імпедансу полімеру була знижена до 3,7 МГц.

Електромагнітні акустичні перетворювачі (ЕМАТ) використовуються для безконтактної генерації та прийому акустичних хвиль у провідних та/або магнітострикційних (феромагнітних) матеріалах (рис. 6) [23]. На відміну від п'єзоелектричних перетворювачів ЕМАТ не потребує прямого контакту з поверхнею матеріалу, характеристики якого досліджуються.

Рис. 6. Принцип дії електромагнітного акустичного перетворювача ЕМАТ у порівнянні з п'єзоелектричним перетворювачем РЕТ



Перетворювач ЕМАТ складається з двох основних компонентів: магніту (постійного або електромагніту) та електричної котушки. Магніт створює магнітне поле зміщення (статичне або квазістатичне). На котушку подається електричний сигнал із частотою в діапазоні від 20 до 10 МГц. Залежно від розв'язуваної задачі, сигнал може бути безперервним або імпульсним. Таким чином, електрична котушка також формує змінне магнітне поле. Ультразвукові хвилі генеруються в контрольованому матеріалі за рахунок взаємодії двох прикладених магнітних полів.

Існує два основних механізми електромагнітної генерації ультразвукових хвиль: сила Лоренца у провідних матеріалах та магнітострикція у матеріалах, що мають цю властивість (рис. 7) [24]. Можлива також об'єднана дія цих факторів.

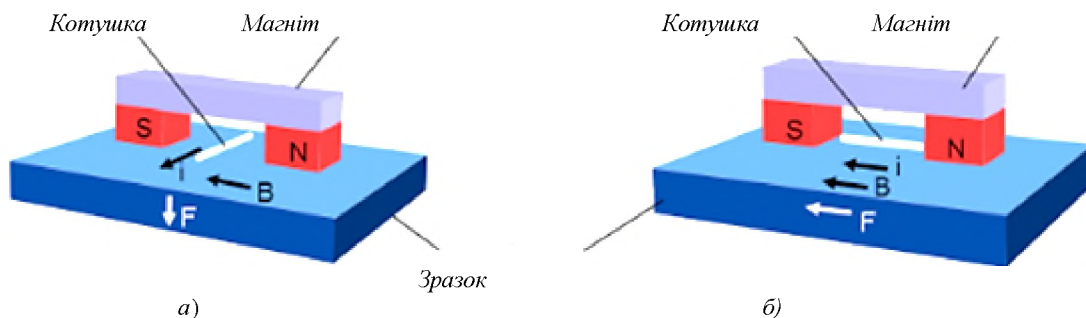


Рис. 7. Основні механізми електромагнітної генерації ультразвукових хвиль: а - сила Лоренца; б - магнітострикція

Котушка, що розташована біля поверхні досліджуваного провідного середовища, випромінює електромагнітний сигнал, який на глибині скін-шару δ , індукуює вихрові струми та пов'язані з ними електричні поля. Статичне або квазістатичне магнітне поле порушує баланс, що склався, породжуючи силу Лоренца, що діє на електрони. Це сила визначається наступним виразом [25]

$$F_L = J_e \times B, \quad (7)$$

де F_L - сила Лоренца у провідному матеріалі; J_e - щільність вихрових струмів; B - динамічна щільність магнітного потоку.

За рахунок сили Лоренца відбувається деформація зразка, що досліджується, і, як наслідок, формуються пружні хвилі.

Коли ЕМАТ використовується з феромагнітним середовищем, пружна деформація матеріалу відбувається на основі магнітострикції. Домени Вейсса феромагнетиків взаємодіють із зовнішнім змінним магнітним полем. Вони можуть зміщуватися та обертатися залежно від зовнішнього магнітного поля. Через цей рух розмір матеріалу змінюється в діапазоні від 10 мкм до 2 мм на метр у матеріалів із високою магнітострикцією [26]. Напруженість магнітного поля H та магнітострикційна сила F_M пов'язані залежністю

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

де N^T - магнітна матриця зворотного тиску.

В обох розглянутих випадках і під дією сили Лоренца F_L , і під дією магнітострикційної сили F_M досліджуване середовище є обов'язковою складовою електромагнітного акустичного перетворювача.

Залежно від конструкції та орієнтації котушок та магнітів ЕМАТ може формувати у досліджуваному зразку різні типи хвиль: об'ємні поздовжні (нормальні або кутові), поперечні (SH) з горизонтальною та вертикальною поляризацією, поверхневі хвилі Релея, хвилі Лемба у пластинах та інші види об'ємних та хвилеводних мод (рис. 8) [27].

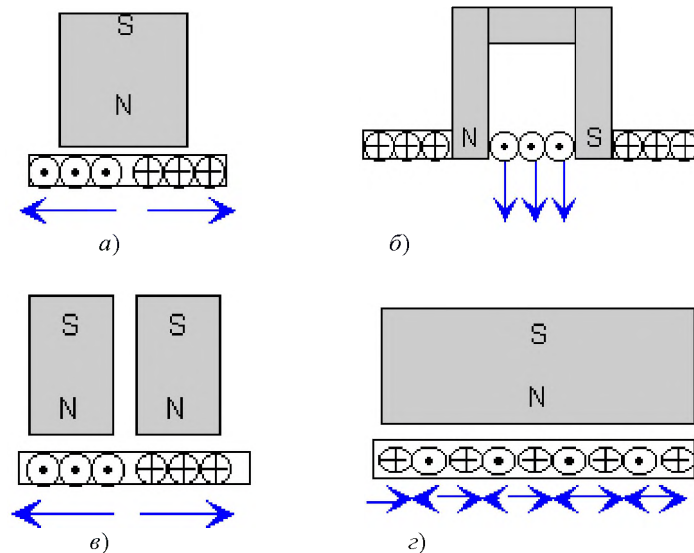


Рис. 8. Ультразвукові хвилі, що формуються ЕМАТ: *a* - радіально поляризовані поперечні хвилі; *б* - поздовжні хвилі; *в* - поверхнево поляризовані поперечні хвилі; *г* - вертикально поляризовані поперечні хвилі, поздовжні або хвилі Релея

У звичайних електромагнітних акустичних перетворювачах ЕМАТ є статичне магнітне поле, створюване постійними магнітами. Магніт збільшує розмір ЕМАТ, а його магнітна сила може притягувати магнітні предмети, що знаходяться поблизу. Це може призвести до механічного пошкодження датчика та досліджуваних об'єктів. У роботі [25] пропонується високоенергетична система акустичного збудження ЕМАТ без статичного магнітного зміщення, що не містить постійних магнітів. Імпульсна потужність збудження високої енергії формується за допомогою коливального контуру LC . Максимальна амплітуда струму може досягати 1700 А, що набагато більше струму у звичайних ЕМАТ. Така конструкція дозволила значно збільшити інтенсивність ультразвукового сигналу, що генерується, а розмір ЕМАТ значно зменшити. Пропонована високоенергетична імпульсна котушка збудження використовується для формування хвилі Лемба моди A_0 . Результати моделювання та експерименту показали, що порівняно із звичайними ЕМАТ використання високоенергетичного імпульсного електромагнітного акустичного перетворювача з меандровою котушкою дозволяє збільшити відстань до об'єкта, що досліджується, а сформовані сигнали мають високе відношення сигнал/шум. Запропонована структура ЕМАТ використовується для точного визначення розташування дефектів у феромагнітних матеріалах і не допускає притягування сторонніх магнітних предметів.

Так само як і п'єзоелектричні перетворювачі, ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток. Діаграму далекого поля перетворювача можна зробити більш цілеспрямованою, просто впливаючи на ваговий коефіцієнт амплітуди збудження кожного елемента масиву. Це дозволяє ефективно керувати орієнтацією, поляризацією та фокусуванням генерованого ультразвукового променя. Керування можна здійснювати, впливаючи на конфігурацію статичного намагнічування і збудження, а також змінюючи геометричні характеристики котушки. Однак важливішим є те, що просторове управління орієнтацією і фокусуванням променя, що формується, може виконуватися електронним способом шляхом впливу на фази і амплітуди елементів решітки в котушці. Для цього обмотки ЕМАТ повинні бути розділені на контури, що окремо керуються, які управляються таким же чином, як і розглянуті раніше п'єзоелектричні перетворювачі [28].

Висновки та напрямки подальших досліджень. У практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли п'єзоелектричні та електромагнітні перетворювачі. Системи з ЕМАТ мають усі переваги ультразвукових вимірювань у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю. Як і з п'єзоелектричними датчиками, за допомогою ЕМАТ можуть бути реалізовані різні методи вимірювань: ехо-імпульсні, з тангажем, наскрізною передачею та ін.

Порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами ЕМАТ мають такі переваги:

фізичний контакт (контактна рідина) між перетворювачем та досліджуваним зразком не потрібен;

ЕМАТ менш чутливий до стану поверхні об'єкта, що досліджується;

простіше конструкція вимірювального каналу, зважаючи на менші обмеження на геометрію введення-виведення ультразвукового променя;

легше генерувати хвилі SH-типу (об'ємні та спрямовані поперечні хвилі), а також інші типи ультразвукових хвиль.

Недоліки ЕМАТ порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами можна резюмувати так:

менша ефективність перетворення, тому необхідні складніші методи обробки сигналів, щоб виділити сигнал з шуму;

область застосування обмежена провідними та/або магнітними середовищами;

ЕМАТ, що зазвичай використовуються (з постійними магнітами), більше за розміром, тому фазовані решітки з ЕМАТ складніше виготовляти;

постійні магнітні ЕМАТ можуть притягувати сторонні магнітні предмети.

Порівняльна характеристика та аналіз різних методів генерації та прийому ультразвуку дозволяють зробити висновок про те, що при реалізації акустичних вимірювань характеристик феромагнітної руди доцільно використовувати електромагнітні перетворювачі ЕМАТ з високоенергетичною імпульсною системою збудження без статичного магнітного зміщення. Для спрощення налаштування геометрії вимірювального каналу ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток. Така конфігурація ЕМАТ дозволяє усунути наведені вище його недоліки порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами та повною мірою скористатися їх перевагами.

Напрямок подальших досліджень слід вважати розробку конструкції та моделювання ультразвукового вимірювального каналу на основі високоенергетичного імпульсного ЕМАТ, а також його апробацію із зразками залізної руди з різними характеристиками.

Список літератури

1. **Ramazan Demirli, Moeness G. Amin, XizhongShen, Yimin D. Zhang.** Ultrasonic Flaw Detection and Imaging through Reverberant Layers via Subspace Analysis and Projection. - *Advances in Acoustics and Vibration* Volume 2012, Article ID 957379, 10 pages. doi:10.1155/2012/957379.
2. **Lashkari B, Jan L, Mandelis A.** Application of backscattered ultrasound and photoacoustic signals to evaluate bone collagen and minerals. *Quant Imaging Med Surg* 2015;5(1):46-56. doi: 10.3978/j.issn.2223-4292.2014.11.11.
3. **Zborovjanz M.** Identification of minerals during drilling process via acoustic signal. *Metallurgy and foundry* 4/2001, Vol. 26. Krakow, Poland, 2001.
4. **Моркун Н.В., Тронь В.В., Сердюк О.Ю., Гапоненко А.А., Грищенко С.М., Бобров Є.Ю.** Визначення параметрів пульпи у робочій камері магнітного сепаратора на основі оцінки процесу розповсюдження хвиль Лемба // *Гірничий вісник*. – Кривий Ріг, 2022. Вип. 110. С. 172-177.
5. **Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В., Сердюк О.Ю., Гапоненко І.А., Гапоненко А.А.** Вимірювання параметрів процесу магнітної сепарації на основі методів ультразвукового контролю. – *Вісник Криворізького національного університету*. – 2021, випуск 52, С. 10-15. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-10-15.
6. **Гершгал Д.А., Фридман В.М.** Ультразвукова апаратура промислового призначення. - *Енергія*, 1967, 263 с.
7. **Feiming Qian, Guangzhen Xing, Ping Yang, Pengcheng Hu, Limin Zou1, Triantafillos Koukoulas.** Laser-induced ultrasonic measurements for the detection and reconstruction of surface defects. - *Acta Acustica* 2021, 5, 38. <https://doi.org/10.1051/aacus/2021031>.
8. **Моркун В.С., Кравченко О.М.** Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації, – *Кривий Ріг: Гірничий вісник*. 2020. Вип. 107. С. 3-10.
9. **Моркун В.С., Пікільняк А.В.** Дослідження динаміки газових бульбашок у процесі флотації рудної пульпи, *Гірничий вісник*. – Кривий Ріг: 2020. Вип. 107. С.48-53.
10. **Моркун В.С., Моркун Н.В., Сердюк О.Ю.** Використання високоенергетичного ультразвуку для оцінки параметрів процесу осадження часток твердої фази пульпи // *Вісник Криворізького національного університету: зб. наук праць*. – 2019. – Вип. 48. – С. 3-7.
11. **G. Sessler R. Lerch and D. Wolf.** *Technische Akustik*. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-23430-2.
12. <https://www.unictron.com/ultrasonic-transducers/piezoelectric-technologies/bolt-clamped-langevin-transducer>.

13. <https://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/v51/v51.htm>.
14. **K. Nakahata, N. Kono.** 3-D Modelings of an Ultrasonic Phased Array Transducer and Its Radiation Properties in Solid. - Materials Science, Physics, 2012. DOI: [10.5772/29954](https://doi.org/10.5772/29954).
15. **Fischer, J.; Herzog, T.; Walter, S.** Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI—Design and fabrication of a 5 MHz ultrasonic phased array probe with curved transducer. *SPIE Proc.* **2013**, *8763*, 87632M.
16. **Costa, D.J.; Buiochi, F.; Elvira, L.** Graded piezocomposite for the construction of air-coupled ultrasound transducer. In Proceedings of the Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, USA, 3–6 September 2014.
17. **Oiguo Huang, Hongwei Wang, Shaohua Hao, Chao Zhong, Likun Wang.** Design and Fabrication of a High-Frequency Single-Directional Planar Underwater Ultrasound Transducer - *Sensors* 2019, *19*(19), 4336; <https://doi.org/10.3390/s19194336>.
18. <https://www.smart-material.com/13CompOverviewV2.html>
19. **M. Platte** (1987) PVDF ultrasonic transducers, *Ferroelectrics*, *75*:1, 327-337, DOI: 10.1080/00150198708008983
20. **Yizhi Liu, Ziyu Huang, Chen Liu.** Improved Design via Simulation of Micro-Modified PVDF and Its Copolymer Energy Harvester with High Electrical Outputs. - *Sensors (Basel)*. 2020 Oct; *20*(20): 5834.
21. **Reshmi Maity, Kalpana Gogoi, Niladri Pratap Maity.** Micro-electro-mechanical-system based capacitive ultrasonic transducer as an efficient immersion sensor. - *Microsystem Technologies* 2019, *25*(4):1-8. DOI: 10.1007/s00542-019-04384-5.
22. **Ming-Wei Chang, M. et al.** Polymer-based Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUT) for Micro Surgical Imaging Applications. - *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* (2006): 61-65.
23. https://www.wikiwand.com/en/Electromagnetic_acoustic_transducer#Codes_and_standards
24. <https://www.rosen-group.com/global/company/explore/we-can/technologies/measurement/emat.html>
25. **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.
26. 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. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8974>.
27. <https://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=144>
28. **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>

Рукопис подано до редакції 18.03.2023

УДК 336.67.1

А.М. ТУРИЛО, д-р екон. наук, проф., Р.В. КОРОЛЕНКО, канд. екон. наук, доц.,
С.В. СВЯТЕНКО, ст. викладач
Криворізький національний університет

ФІНАНСОВИЙ РЕЗУЛЬТАТ: СУТНІСТЬ І ОЦІНКА ЙОГО ІННОВАЦІЙНОЇ СКЛАДОВОЇ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ КРИВБАСУ З ПОЗИЦІЇ ЗМІСТУ ФІНАНСОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Мета. Метою є дослідження категорії «фінансовий результат підприємства» з позиції її сутності відносно змісту фінансової діяльності, яка визначена в національних стандартах бухгалтерського обліку і розробка на цій основі теоретико-методичних підходів щодо оцінювання інноваційно-якісної складової отриманого на підприємстві фінансового результату.

Методи дослідження. Результати і наукові положення, наведені у статті отримані з використанням певних методів (різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження): узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичний, порівняння й аналогії, економіко-математичний тощо.

Наукова новизна. Досліджено сутність фінансового результату підприємства з позиції його ув'язки зі змістом категорії «фінансова діяльність підприємства», що визначена в національних стандартах бухгалтерського обліку.

Вперше запропоновано і розроблено теоретико-методичні підходи до визначення величини інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства від його фінансової діяльності.

Практична значимість. Представлений матеріал виступає значним методичним підґрунтям у процесі комплексного аналізу, оцінки, планування й управління фінансовою діяльністю підприємства.

Запропонована в роботі методика дозволяє оцінити фінансовий результат підприємства, по-перше, суто з фінансових позицій, а по-друге, розрахувати в загальній величині фінансового результату підприємства його інноваційно-якісну складову.

Результати. Ключовим результатом виконаного авторами дослідження є методика, що дозволяє оцінити інноваційно-якісні чинники відносно фінансової діяльності підприємства шляхом виявлення їх впливу на загальну величину фінансового результату підприємства.