

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-61-69>

УДК 622.7: 534

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ РУДНОЇ ПУЛЬПИ НА ПАРАМЕТРИ П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Моркун В.С., Моркун Н.В., Поркуян О.В., Грищенко Я.О.

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF ORE PULP PROPERTIES ON THE PARAMETERS OF A PIEZOCERAMIC TRANSDUCER

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuyan O.V., Hryshchenko Y.O.

В процесі збагачення рудного матеріалу пульпа є головним транспортуючим агентом, тому її характеристики мають важливий вплив як на ефективність технологічних операцій, так і на результати вимірювань параметрів її твердої фази. Густина та в'язкість пульпи – це дві різні властивості, які дають цінне уявлення про її поведінку під час технологічних операцій. Ці параметри визначають процес руху частинок подрібненої руди на ситі грохота і, таким чином, мають прямий вплив на результати її вологого грохочення. Для визначення цих параметрів запропоновано використовувати вимірювання характеристик п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у досліджуване середовище. Модель п'єзокерамічного перетворювача представлена у вигляді взаємопов'язаних електричного та механічного доменів. Механічний домен симулює п'єзоелектричний перетворювач, що занурений у пульпу. Фізико-механічні властивості середовища змодельовані із застосуванням типових блоків *Mass*, *Translational Damper* та *Translational Spring* розширення *Simscape* для *Simulink*®/*MATLAB*®. Блок *Piezo Stack* представляє електричні та механічні характеристики п'єзоелектричного багатошарового перетворювача. В процесі моделювання із застосуванням даних спектрального аналізу вимірних сигналів визначено резонансну частоту досліджуваної системи для базових опорних характеристик середовища. На визначеній резонансній частоті симулювались зміни концентрації твердої фази пульпи відносно базової величини. Досліджена залежність амплітуди першого (найбільшого) піку виміряного сигналу від концентрації твердої фази пульпи та виконана її апроксимація із застосуванням поліноміальної та двочленної експоненціальні моделі. Доведено, що

двочленна експоненціальна модель дозволяє отримати якісну апроксимацію досліджуваної залежності. Результати моделювання п'єзокерамічного перетворювача, зануреного у рудну пульпу, свідчать про можливість застосування запропонованого підходу до оперативного визначення концентрації її твердої фази та формування інформаційної бази керування процесом тонкого вологого грохочення руди. Такий перетворювач може бути виключно частиною спеціального вимірювального пристрою або для отримання відповідної інформації може застосовуватися наявний потужний високоенергетичний ультразвуковий перетворювач технологічного призначення.

Ключові слова: грохочення, модель, перетворювач, керування, автоматизація, характеристики, ефективність.

Вступ. Вібраційні грохоти є критично важливими машинами, що використовуються для класифікації за розміром подрібнених матеріалів у процесі переробки корисних копалин. Їхня ефективна робота, включаючи точний вібраційний рух та кут нахилу, може забезпечити економію енергії і зниження витрат у операціях грохочення та в усьому процесі переробки руди. Динамічні моделі руху вібраційного грохота, доступні в літературі, недостатньо інформативні стосовно симуляції руху частинок руди та їх взаємодії з ситовим полотном. У роботі [1] запропоновано використовувати метод дискретних елементів (МДЕ) для розрахунку динаміку руди.

Протестовані дві двовимірні динамічні моделі з трьома ступенями свободи для вібраційного грохота, використовуючи лінійний та нелінійний підходи до кутового зміщення.

Оптимальні параметри коливань вібраційних грохотів визначаються за допомогою аналітичних методів шляхом дослідження руху окремої сферичної частинки в неінерціальній системі відліку вібраційного сита. У роботі [2] визначено безрозмірні параметри, що визначають ефективність процесу просіювання. Вплив взаємодії між кількома частинками, що рухаються на сітці, аналізується за допомогою методу дискретних елементів. Порівнюючи аналітичні та числові результати, можна побачити, що аналітичну оцінку ефективності просіювання можна використовувати до заданого розміру частинок забруднюючої речовини необмежено в досліджуваному діапазоні кутів сита. Крім того, у випадку цього мінімального розміру частинок забруднюючої речовини існує максимальне значення кута просіювання. Зроблено висновок, що використання запропонованої оцінки ефективності просіювання на основі методу дискретних елементів є неминучим для кута вище цього максимального значення.

У статті [3] представлено числове дослідження потоку частинок та поведінки ситового полотна грохота під час збагачення вугілля. Потік частинок моделюється методом дискретних елементів, тоді як потік води на ситовому полотні симулюється за допомогою обчислювальної гідродинаміки. Вплив робочих умов досліджується з використанням серії контрольованих числових експериментів. Потік частинок на грохоті аналізується з точки зору поля швидкостей, просторового розподілу частинок та часу перебування в робочій зоні, тоді як ефективність просіювання аналізується з точки зору загального відсотка проходження та розподілу відсотка проходження вздовж грохота. Для ситового полотна велика кількість води з низькою швидкістю є кращою для подолання когезії між частинками та контролю швидкостей частинок, що може покращити відсоток проходження. Для грохота з низьким напором збільшення кута нахилу та амплітуди коливань у горизонтальному напрямку може збільшити пропускну здатність, зберігаючи при цьому відсоток проходження.

У роботі [4] досліджено поведінку сухого гранульованого матеріалу на вібраційних конвеєрах. У проведених експериментах використовували вертикальну та горизонтальну

вібрацію з однаковою амплітудою та фазовим зсувом $\pi/2$. Це означає, що кожна точка опори рухається по круговій траєкторії. Стоячі хвилі, що коливаються на половині частоти впливу, спостерігаються в певному діапазоні прискорення руху. Домінуюча довжина хвилі діаграми вимірюється для різних частот впливу з постійною амплітудою. Ці хвилі не є стаціонарними, а дрейфують зі швидкістю, яка дорівнює швидкості перенесення гранульованого матеріалу, що визначається за допомогою трасерної частинки.

Вода може сильно впливати на механічну поведінку гранульованих матеріалів. У дослідженні [5] проведено числове моделювання для вивчення впливу вмісту води, що описується насиченням, на руйнування гранульованих матеріалів. Для вологих гранульованих матеріалів від маятникового стану до капілярного (насичення від 30 до 100%) використовується пов'язана модель CFD-DEM, а для вологих гранульованих матеріалів маятникового стану (насичення менше 30%) використовується модель дискретного елемента-рідинного мосту. Досліджується вплив насичення, радіуса частинок та тертя на форму осаду, а кінцева межа осаду апроксимується білінійною моделлю. Крім того, досліджується плинність за рухом центру мас гранульованих матеріалів. Числові приклади показують, що в діапазоні насичення від 0,1 до 0,5% та від 30 до 100% вода має очевидний вплив на кінцеву форму осаду. У діапазоні насичення 0,5–30% вода має незначний вплив на кінцеву форму осаду. Для діапазону насичення 0,1–0,5% плинність зменшується зі збільшенням насичення, а коли насичення перевищує 30%, плинність зростає зі збільшенням насичення. Дослідження виявило вплив прошаркової води на плинність зернистих матеріалів, що є важливим для дослідження інженерно-геологічних проблем, таких як зсуви.

З наведеного можна зробити висновок, що оперативне визначення характеристик промислових суспензій, зокрема рудної пульпи, має важливе значення для підвищення ефективності процесів її мокрого вологого грохочення та покращення якості автоматизованого керування цим процесом.

Метою роботи є обґрунтування використання методу визначення характеристик рудної пульпи на основі вимірювань параметрів зануреного у неї п'єзокерамічного перетворювача.

Викладання основного матеріалу. В процесі збагачення рудного матеріалу пульпа є головним транспортуючим агентом, тому її характеристики мають важливий вплив як на ефективність технологічних операцій, так і на результати вимірювань параметрів її твердої фази [6]. Густина та в'язкість пульпи – це два різних параметра, які дають цінне уявлення про її властивості. Густина зосереджена на масі на одиницю об'єму речовини, тоді як в'язкість описує опір рідини потоку. Частинки в рідині діють як перешкоди, перешкоджаючи потоку рідини та збільшуючи опір потоку, тобто в'язкість. Густина є скалярною величиною, а в'язкість – це тензорна величина. Густина залишається постійною незалежно від розміру чи форми зразка, тоді як в'язкість може змінюватися залежно від таких факторів, як температура та тиск.

Модель Einstein для опису підвищеної в'язкості для дуже низької концентрації частинок, має вигляд [7]

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{5}{2} \varphi\right), \quad (1)$$

де η - об'ємна в'язкість суспензії; η_0 - в'язкість рідини; φ - вміст твердої фракції.

Формулу було модифіковано та адаптовано Batchelor для кількох сфер однакового розміру («монодисперсних») для максимального вмісту твердої фракції від 0,15 до 0,2 [8]

$$\eta = \eta_0 (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2), \quad (2)$$

Суспензії з ще вищим вмістом твердої частки можна описати за допомогою моделі Krieger & Dougherty, що діє для низьких та високих швидкостей зсуву [9]

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{max}}\right)^{-[\eta] \cdot \varphi_{max}}, \quad (3)$$

де φ_{max} – це максимальна тверда частка в суспензії, яка все ще дозволяє суспензії текти; $[\eta]$ - міра форми частинок (2,5 для сфер).

Якщо припустити, що частинки сферичні, теоретична максимальна щільність упаковки може становити від 0,52 до 0,74, залежно від схеми укладання сфер [6]. Загально відомо, що для випадкової щільної упаковки сфер це значення становить приблизно 0,64 [10].

Для низького вмісту твердих фракцій в'язкість рідини збільшується. Однак суттєвої взаємодії частинок не відбувається, і поведінка потоку суспензії все ще контролюється ньютонівською поведінкою потоку фази рідини.

Зі збільшенням вмісту твердої фракції ймовірність зіткнення частинок стає більшою. Тепер вони діють як перешкоди, і потрібна додаткова сила зсуву, коли виникає тертя під час зіткнення частинок. Коли тверда фракція наближається до φ_{max} , постійна взаємодія частинок суттєво збільшує силу, необхідну для зсуву зразка, яка тепер домінує над напругою зсуву, необхідною для зсуву рідини. У роботі [6] проаналізовано вплив концентрації твердої фази, крупності та форми її частинок на в'язкість суспензії.

Концентрація твердої фази та в'язкість пульпи визначають процес руху частинок подрібненої руди на ситі грохота і, таким чином, мають прямий вплив на результати її вологого грохочення [11-13]. Для визначення цих параметрів пропонується використати вимірювання характеристик п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у досліджуване середовище. Такий перетворювач може бути виключно частиною спеціального вимірювального пристрою або для отримання відповідної інформації може застосовуватися наявний потужний високоенергетичний ультразвуковий перетворювач технологічного призначення.

Приклад конструкції п'єзоелектричного перетворювача ланжевенівського типу для формування потужного ультразвуку наведено на рис. 1 [14].

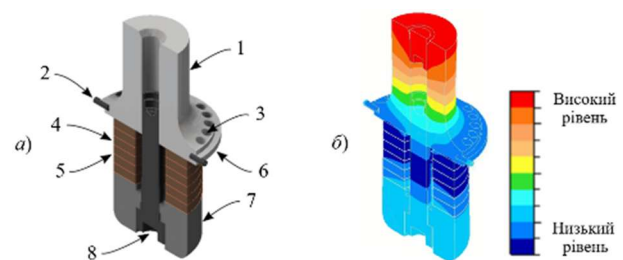


Рис. 1. П'єзоелектричний перетворювач:

- a* – конструкція: 1 – передній випромінювач; 2 – штифт проти обертання; 3 – отвір для охолодження; 4 – п'єзокерамічні дискові пластини; 5 – електроди; 6 – фланець ущільнювального кільця; 7 – задній випромінювач; 8 – центральний болт, *б* – кольорова характеристика амплітуди зміщень [14]

Такий перетворювач являє собою одну або декілька п'єзокерамічних дискових пластин, що механічно стислі (попередньо напружені) між переднім та заднім випромінювачами. Механічні характеристики п'єзокераміки відповідають параметрам прикладеного електричного поля.

Системи, що коливаються механічно або електрично, мають подібні характеристики. На рис. 2 наведено концептуальну електромеханічну модель п'єзоелектричного перетворювача, активна частина якого контактує з середовищем, що має певні фізико-механічні властивості [15].

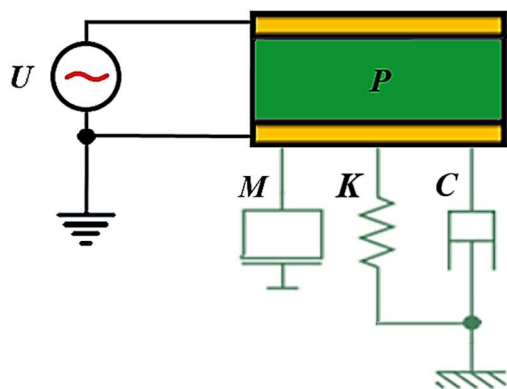


Рис. 2. Концептуальна електромеханічна модель п'єзоелектричного перетворювача: U – прикладений електричний сигнал; P – п'єзокерамічний елемент; M – маса; K – пружний елемент; C – демпфер

Для простої системи маса-пружина-демпфер, зображеної на рис. 2, рівняння руху має вигляд [16]

$$F(t) = m \frac{d^2u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku, \quad (4)$$

де $F(t)$ – прикладена сила; u – зміщення; $\frac{du}{dt}$ – швидкість; $\frac{d^2u}{dt^2}$ – прискорення; m – маса; c – константа демпфування (в'язкість); k – жорсткість пружини.

У механічних системах можливі різні види демпфування. Наведене вище рівняння (4) передбачає в'язке демпфування, де сила демпфування пропорційна швидкості.

Енергія, що накопичується в рухомій масі завдяки її швидкості, дорівнює [16]

$$W_m = \frac{1}{2} m \dot{u}^2, \quad (5)$$

Енергія, що накопичується в пружині завдяки її розтягуванню, становить

$$W_k = \frac{1}{2} k u^2, \quad (6)$$

Потужність, що розсіюється демпфером, дорівнює

$$P_c = c \dot{u}^2, \quad (7)$$

Резонансна частота наведеної механічної системи визначається наступним чином

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (8)$$

Електромеханічна модель п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у рудну пульпу, реалізована у розширенні Simscape для Simulink®/MATLAB® [17]. На рис. 3 наведена схема моделювання п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у рудну пульпу.

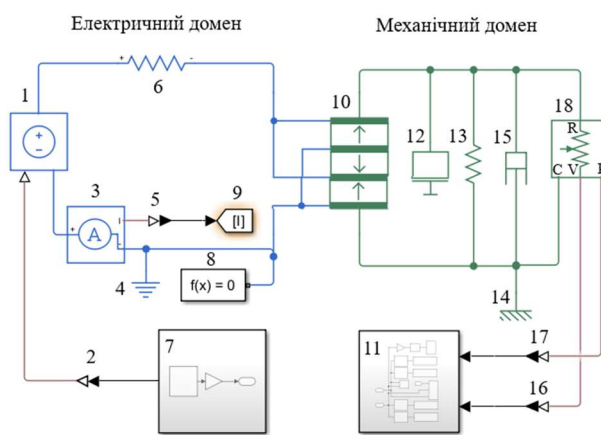


Рис. 3. Схема моделювання п'єзоелектричного перетворювача, зануреного у рудну пульпу

У наведеній моделі використані наступні блоки: 1 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 2 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 – блок Current Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 4 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 5, 16, 17 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 7 – блок Subsystem 1; 8 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 9 – блок Goto із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 10 – блок Piezo Stack із бібліотеки Simscape / Electrical / Electromechanical / Mechatronic Actuators; 11 – блок Subsystem 2; 12 – блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 13 – блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 14 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational

Elements; 15 – блок Translational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 18 – блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors;

Блок Solver Configuration визначає параметри розв'язувача, які потрібні моделі перед початком моделювання.

Блок Subsystem 1 – генерує електричний сигнал обраної форми, частоти та амплітуди.

Блок Controlled Voltage Source являє собою ідеальне джерело напруги, яке є достатньо потужним, щоб підтримувати задану напругу на своїх клеммах незалежно від струму, що протікає через джерело.

Блок Current Sensor являє собою ідеальний датчик струму, тобто пристрій, який перетворює струм, виміряний в електричній гілці, на фізичний сигнал, пропорційний струму.

Блок Resistor моделює лінійний резистор в електричних системах.

Блок Translational Spring являє собою ідеальну механічну лінійну пружину, описану такими рівняннями

$$F = Kx, \quad (9)$$

$$x = x_{init} + x_R - x_C, \quad (10)$$

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad (11)$$

де F - сила, що передається через пружину; K - коефіцієнт жорсткості пружини; x - відносне зміщення (деформація пружини); x_{init} - початкове зміщення пружини (початкова деформація, пружина може бути спочатку стиснутою ($x_{init} > 0$) або розтягнутою ($x_{init} < 0$)); x_R, x_C - абсолютні переміщення клем R і C , відповідно; v - відносна швидкість; t - час.

Блок Mass представляє ідеальну механічну поступальну масу, яка описується наступним рівнянням

$$F = m \frac{dv}{dt}, \quad (12)$$

де F - сила інерції; m - маса; v - швидкість; t - час.

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер, що описується такими рівняннями

$$F = Dv, \quad (13)$$

$$v = v_R - v_C, \quad (14)$$

де F - сила, що передається через демпфер; D - коефіцієнт демпфування (в'язкого тертя); v - відносна швидкість; v_R, v_C - абсолютні швидкості терміналів R і C відповідно.

Блок Mechanical Translational Reference представляє опорну точку або рамку для механічних портів поступального руху.

Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює поперечну змінну, виміряну між двома механічними трансляційними вузлами, у керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. З'єднання V та P – це порти виходу фізичних сигналів для швидкості та положення відповідно.

Блок Subsystem 2 вимірює, виконує спектральний аналіз та відображає сигнали у часовій області, що отримані у блоці Ideal Translational Motion Sensor.

Блок PS-Simulink Converter перетворює фізичний сигнал у вихідний сигнал Simulink®, блок Simulink Converter-PS виконує зворотне перетворення.

Блок Piezo Stack представляє електричні та механічні характеристики п'єзоелектричного багатошарового перетворювача за допомогою таких рівнянь

$$S = s^E T + d^E E, \quad (15)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E, \quad (16)$$

де S – тензор деформації; T – тензор напружень; E – вектор електричного поля; D – вектор електричного зміщення; s^E – матриця пружної податливості під дією постійного електричного поля; d – матриця п'єзоелектричної константи; ε^T – діелектрична проникність, виміряна при постійному напруженні.

Механічний домен моделі, наведеної на рис. 3, симулює п'єзоелектричний перетворювач, що занурений у досліджуване середовище, тобто пульпу. Фізико-механічні властивості середовища змодельовані із застосуванням блоків Mass, Translational Damper та Translational Spring. Досліджено вплив концентрації твердої фази пульпи на характеристики п'єзоелектричного перетворювача.

В процесі моделювання із застосуванням даних спектрального аналізу виміряних сигналів визначено резонансну частоту досліджуваної системи для базових опорних

характеристик середовища. На визначеній резонансній частоті симулювались зміни концентрації твердої фази пульпи відносно базової величини ρ_b . На рис. 4 наведено результати спектрального аналізу вимірюваного сигналу при фіксованих значеннях концентрації твердої фази рудної пульпи: а) - ρ_b ; б) - $\rho_{b1} = 0.99\rho_b$; в) - $\rho_{b2} = 0.95\rho_b$; г) - $\rho_{b3} = 0.9\rho_b$; д) - $\rho_{b4} = 0.85\rho_b$; е) - $\rho_{b5} = 0.8\rho_b$.

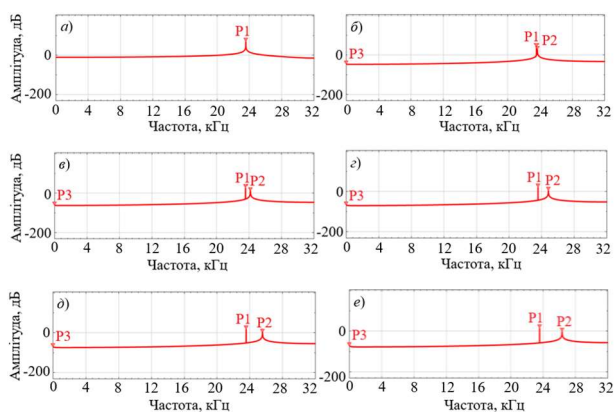


Рис. 4. Зміна вимірюваних параметрів при варіаціях концентрації твердої фази пульпи:

$$a - \rho_b; \quad б - \rho_{b1} = 0.99\rho_b; \quad в - \rho_{b2} = 0.95\rho_b; \\ г - \rho_{b3} = 0.9\rho_b; \quad д - \rho_{b4} = 0.85\rho_b; \quad е - \rho_{b5} = 0.8\rho_b$$

Зміна концентрації твердої фази рудної пульпи симулювалась відповідними змінами параметрів блоку Mass досліджуваної моделі. Наведені на рис. 4 залежності мають виражені піки: P1 – на базовій резонансній частоті; P2 – на резонансній частоті системи з новими встановленими параметрами. Пік P3 відповідає початковому сплеску вимірюваних параметрів. Аналіз амплітудно-частотної характеристики п'єзокерамічного перетворювача, наведеної у табл. 1, показує доцільність її використання для визначення параметрів рудної пульпи.

У табл. 1 використано такі позначення: FP1, FP2, FP3, AP1, AP2, AP3 – частота і амплітуда відповідних піків амплітудно-частотної характеристики п'єзокерамічного перетворювача.

Як слідує з результатів моделювання, наведених у табл. 1, для визначення характеристик рудної пульпи доцільно використовувати вимірні значення амплітуди піку P1, а також частоти та амплітуди піку P2. На рис. 5 наведено залежність амплітуди першої гармоніки вимірюваного сигналу від концентрації твердої фази пульпи та результати її апроксимації із застосуванням поліноміальної (а) та двочленної експоненціальної моделі (б).

Таблиця 1

Спектральний аналіз амплітудно-частотної характеристики п'єзокерамічного перетворювача

Параметри пульпи	P1		P2		P3	
	FP1, кГц	AP1, дБ	FP2, кГц	AP2, дБ	FP3, кГц	AP3, дБ
ρ_b	23.6	68.3	-	-	-	-
$0.99\rho_b$	23.6	54.3	23.7	25.7	0.01	-48.2
$0.95\rho_b$	23.6	29.3	24.2	9.88	0.01	-62.5
$0.9\rho_b$	23.6	20.2	24.8	4.29	0.01	-69.1
$0.85\rho_b$	23.6	16.7	25.6	-0.16	0.01	-72.4
$0.8\rho_b$	23.6	14.2	26.4	-2.70	0.01	-74.4

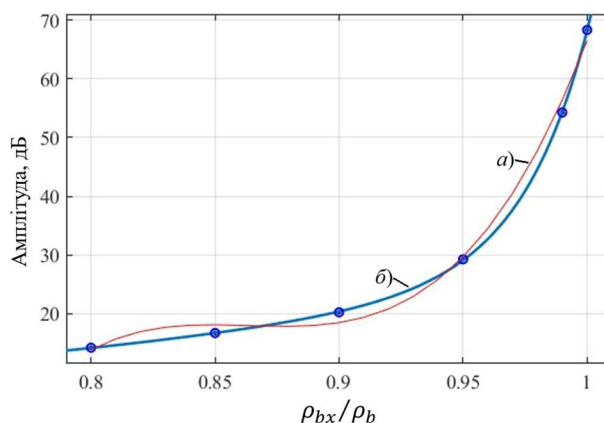


Рис. 5. Результати апроксимації залежності амплітуди піку P1 вимірюваного сигналу від концентрації твердої фази пульпи із застосуванням поліноміальної (а) та двочленної експоненціальної моделі (б)

Апроксимація, наведеної на рис. 5 залежності виконана із застосуванням інструментарію *curveFitter* MATLAB® [18].

Поліноміальні моделі у використаному інструментарії для кривих задаються як

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}, \quad (17)$$

де $n + 1$ – порядок полінома, n – ступінь полінома, а $1 \leq n \leq 9$.

У розглянутому експерименті застосовано поліном третього ступеня (кубичний)

$$y = p_1 x^3 + p_2 x^2 + p_3 x + p_4. \quad (18)$$

Коефіцієнти до виразу (18) та 95% довірчі інтервали наведено у табл. 2.

Інструментарій *curveFitter* надає двочленну експоненціальну модель у вигляді

$$y = ae^{bx} + ce^{dx}. \quad (19)$$

Таблиця 2

Коефіцієнти та 95% довірчі інтервали для поліноміальної апроксимації

Коефіцієнти	Величина	Нижня межа	Верхня межа
p_1	9.9615	-1.7909	21.7138
p_2	19.4136	9.5170	29.3101
p_3	11.5574	-3.7025	26.8172
p_4	20.0027	11.9579	28.0476

Коефіцієнти до виразу (19) та 95% довірчі інтервали наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Коефіцієнти та 95% довірчі інтервали для експоненціальної апроксимації

Коефіцієнти	Величина	Нижня межа	Верхня межа
a	20.3127	18.9884	21.6371
b	0.2518	0.1863	0.3173
c	1.7223	0.8885	2.5561
d	2.9870	2.5981	3.3759

Якість, тобто відповідність результатів апроксимації, характеризують показники наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Показники якості апроксимації

Показник	Поліноміальна модель	Експоненціальна модель
SSE	13.1582	0.0656
R-square	0.9947	1.0000
DFE	2.000	2.0000
Adj R-sq	0.9868	0.9999
RMSE	2.5650	0.1811

Отже, двочленна експоненціальна модель дозволяє отримати якісну апроксимацію результатів моделювання.

Таким чином, моделювання п'єзокерамічного перетворювача, зануреного у рудну пульпу, свідчить про можливість застосування запропонованого підходу до оперативного визначення концентрації її твердої фази та формування інформаційної бази керування процесом тонкого вологого грохочення руди.

Висновки. Модель п'єзокерамічного перетворювача представлено у вигляді взаємопов'язаних електричного та механічного доменів. Механічний домен симулює п'єзоелектричний перетворювач, що занурений у досліджуване середовище, тобто пульпу. Фізико-механічні властивості середовища

змодельовані із застосуванням типових блоків Mass, Translational Damper та Translational Spring розширення Simscape для Simulink®/MATLAB®. Досліджено вплив концентрації твердої фази пульпи на характеристики п'єзоелектричного перетворювача. В процесі моделювання із застосуванням даних спектрального аналізу вимірних сигналів визначено резонансну частоту досліджуваної системи для базових опорних характеристик середовища. На визначеній резонансній частоті симулювались зміни концентрації твердої фази пульпи відносно базової величини. Доведено доцільність використання залежності амплітуди першої гармоніки вимірюного сигналу від концентрації твердої фази пульпи та результатів її апроксимації із застосуванням двочленної експоненціальні моделі для оперативного визначення цього параметру в процесі вологого грохочення руди.

Напрямом подальших досліджень слід вважати визначення впливу крупності частинок подрібненої руди, їх агрегацій та флокулоутворень на електромеханічні характеристики п'єзокерамічного перетворювача, активна поверхня якого контактує із залізородною пульпою.

Література

1. Moncada M.M. and Rodriguez C. G. Dynamic modeling of a vibrating screen considering the ore inertia and force of the ore over the screen calculated with discrete element method. *Hindawi. Shock and vibration*. 2018, 1714738, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/1714738>.
2. Safranyik F., Csizmadia B.M., Hegedus A. et al. Optimal oscillation parameters of vibrating screens. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019, vol. 33, pp. 2011–2017. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0403-1>.
3. Dong K.J. and Yu A.B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination. *Minerals Engineering*. 2012, vol. 31, p. 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.020>
4. G'otzendorfer A., Kruelle C. A. and Rehberg I. Granular surface waves in a vibratory conveyor. In Garc'ia-Rojo, Herrmann, and McNamara (Eds.). 2005, PG05, Rotterdam, Balkema. pp. 1181–1184.
5. Chu X., Zhu Z. and Wang L. Numerical investigation on the influence of water content on collapse of granular columns. *Granular Matter*. 2023, vol. 25, (2). DOI:10.1007/s10035-023-01324-z.

6. Paar A. *The influence of particles on suspension rheology*. <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>
7. Einstein A. *Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. *Annalen der Physik*, 339, 591–592. <https://doi.org/10.1002/andp.19113390313>.
8. Batchelor K.G. The effect of Brwnian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977, 83, pp. 97–117. doi: 10.1017/S002211207700106.
9. Krieger I.M, Dougherty T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*. 1959, vol. 3. pp. 137–152. doi: 10.1122/1.548848.
10. Scott G.D, Kilgour D.M. The density of random close packing of spheres. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2. 1969, vol. 863, p. doi: 10.1088/0022-3727/2/6/311.
11. Моркун В., Моркун Н., Грищенко Я., Бобров Є. Моделювання динаміки надрешітного продукту тонкого вологого грохочення залізної руди. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, 7(293), с. 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.
12. Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Азарян А.А., Грищенко А.М. Моделювання автоматизованого керування об'єктами гірничого виробництва на основі хвильового підходу. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, 10(296). с. 33-42. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>.
13. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O Hryshchenko S.M. Increasing the efficiency of fine wet grinding of ore using the dynamic effect of ultrasound. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025, vol. 6, P. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/052>.
14. Ultrasonic Resonators. URL: <https://www.ultrasonic-resonators.org/>.
15. Roozbeh Tabrizian. Piezoelectric Transducer: Concept & Modeling. URL: https://phonon.ece.ufl.edu/wp-content/uploads/sites/67/2022/02/Resonant-MEMS-2022_L5.pdf
16. Mechanical-Electrical analogs. URL: https://www.ultrasonic-resonators.org/vibration_theory/mechanical_electrical_analogs/mechanical_electrical_analogs.html.
17. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
18. Curve Fitter. URL: <https://se.mathworks.com/help/curvefit/curvefitter-app.html>.

References

1. Moncada M.M. and Rodriguez C. G. Dynamic modeling of a vibrating screen considering the ore inertia and force of the ore over the screen calculated with discrete element method. *Hindawi. Shock and vibration*. 2018, 1714738, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/1714738>.
2. Safranyik F., Csizmadia B.M., Hegedus A. et al. Optimal oscillation parameters of vibrating screens. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019, vol. 33, pp. 2011–2017. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0403-1>.
3. Dong K.J. and Yu A.B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination. *Minerals Engineering*. 2012, vol. 31, p. 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.020>
4. Götendorfer A., Kruelle C. A. and Rehberg I. Granular surface waves in a vibratory conveyor. In Garc'ia-Rojo, Herrmann, and McNamara (Eds.). 2005, PG05, Rotterdam, Balkema. pp. 1181–1184.
5. Chu X., Zhu Z. and Wang L. Numerical investigation on the influence of water content on collapse of granular columns. *Granular Matter*. 2023, vol. 25, (2). DOI:10.1007/s10035-023-01324-z.
6. Paar A. *The influence of particles on suspension rheology*. <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>
7. Einstein A. *Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. *Annalen der Physik*, 339, 591–592. <https://doi.org/10.1002/andp.19113390313>.
8. Batchelor K.G. The effect of Brwnian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977, 83, pp. 97–117. doi: 10.1017/S002211207700106.
9. Krieger I.M, Dougherty T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*. 1959, vol. 3. pp. 137–152. doi: 10.1122/1.548848.
10. Scott G.D, Kilgour D.M. The density of random close packing of spheres. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2. 1969, vol. 863, p. doi: 10.1088/0022-3727/2/6/311.
11. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Bobrov E.Y. *Modeling the dynamics of the oversize product of fine wet screening of iron ore*. *Visnyk of the Volodymyr Dal Eastern Ukrainian National University*. 2025, 293(7). P. 56-66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.
12. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Azaryan A.A., Gritsenko A.M. *Modeling of automated control of mining production facilities based on a wave approach*. *Visnyk of the Volodymyr Dal Eastern Ukrainian National University*. 2025, 10(296), P. 33-42. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>.

13. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O Hryshchenko S.M. Increasing the efficiency of fine wet grinding of ore using the dynamic effect of ultrasound. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025, vol. 6, P. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/052>.
14. Ultrasonic Resonators. URL: <https://www.ultrasonic-resonators.org/>.
15. Roozbeh Tabrizian. Piezoelectric Transducer: Concept & Modeling. URL: https://phonon.ece.ufl.edu/wp-content/uploads/sites/67/2022/02/Resonant-MEMS-2022_L5.pdf
16. Mechanical-Electrical analogs. URL: https://www.ultrasonic-resonators.org/vibration_theory/mechanical_electrical_analogs/mechanical_electrical_analogs.html.
17. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducting-the-simscape-block-libraries.html>.
18. Curve Fitter. URL: <https://se.mathworks.com/help/curvefit/curvefitter-app.html>.

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuyan O.V., Hryshchenko Y.O. Determination of the influence of ore pulp properties on the parameters of a piezoceramic transducer

Well drilling is the most common and resource-intensive technological operation in the extraction of minerals. The economic efficiency of this operation directly depends on the quality of automated process control, which, in turn, is determined by the completeness of its information support. The main factor affecting the results of the drilling process is the correspondence of the speed of well penetration and the resulting control actions to the physical and mechanical characteristics of the rock or its mineralogical varieties. A method is proposed to improve the efficiency of the procedure for determining the characteristic features of mineralogical varieties of iron ore in the process of drilling wells based on the simulation of the conversion of a probing electromagnetic signal in the studied environment using Simscape® physical modeling blocks for Simulink®/MATLAB®. The approach used is based on the use of an electromagnetic transducer that generates a probing pulse in iron-bearing rock with certain electrical and magnetic properties. As a result, eddy currents are formed in the studied medium, which create an induced magnetic field, affecting parameters such as the voltage on the measuring coil or its impedance. The electromagnetic properties of the medium material affect

the distribution of these induced eddy currents, which changes the parameters of the measuring coil compared to the reference material. During the modeling process, the parameters of the signal measured on the secondary winding of the electromagnetic transducer were determined when the characteristics of the studied medium changed. At the same time, changes in the ratio of minerals in the composition of iron ore varieties were simulated. Analysis of the results obtained shows their strong dependence on the magnetite content in the studied medium. This complicates the recognition of iron ore varieties that include other weakly magnetic minerals with low electrical conductivity. To obtain satisfactory results from this procedure, it is necessary to include additional characteristic features of the physical properties of the object being recognized, which primarily include the parameters of the propagation of ultrasonic waves formed during the formation of an electromagnetic pulse in ferromagnetic rock.

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

Моркун Володимир Станіславович - д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Пир), <https://orcid.org/0000-0003-1506-9759>, morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), <https://orcid.org/0000-0002-1261-1170>, nmorkun@gmail.com.

Поркуян Ольга Вікторівна – д-р техн. наук, проф., ректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), <https://orcid.org/0000-0002-4046-0998>, porkuian@snu.edu.ua.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), <https://orcid.org/0009-0002-0582-4140>, grischenckokgtl@gmail.com.

Дата першого надходження статті 16.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
Creative Commons (CC BY 4.0)