

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ ГРОХОТА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

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

MODELING OF THE COMBINED ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE SCREEN TO INCREASE ITS EFFICIENCY

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Ya.O.

Розглянуто проблему підвищення ефективності класифікації часток подрібненої руди за крупністю в процесі її збагачення шляхом застосування для реалізації цієї операції грохота тонкого грохочення з комбінованим приводом і визначення основних закономірностей впливу параметрів вібрації просіювальної поверхні на основні характеристик процесу. Виконано теоретичний аналіз та комп'ютерне моделювання процесу тонкого грохочення рудного матеріалу. Грохот, як класифікуючий технологічний агрегат у процесі збагачення руди, розділяє вхідний подрібнений продукт за крупністю його частинок. Розглянуто динаміку як просіювальної поверхні, так і закономірності руху та взаємодії часток подрібненої руди. При моделюванні просіювальної поверхні грохота динаміку його вузлів доцільно представити у вигляді сукупності елементарних блоків, що включають елементи пружності, демпфування та маси. До основних статистичних параметрів, що описують характеристики контактних сил і силового ланцюга між частинками рудного матеріалу в процесі їх грохочення слід віднести співвідношення компонентів силового ланцюга та контактний кут. Доведено, що результати процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. Параметрами вібрації визначено нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації. Показниками оцінки якості скринінгу є ефективність просіювання та швидкість транспортування рудного матеріалу. Досліджені залежності динаміки поверхні вібросити та частинок просіюваної руди використані при моделюванні руху грохота з комбінованим

електромагнітним та електромеханічним приводом. Рух та взаємодія частинок рудного матеріалу на грохоті виражені через вектори розгалуження та орієнтації контактних сил. Отримано аналітичні вирази зв'язку швидкості транспортування рудного матеріалу і ефективності грохочення від кута вібрації просіювальної поверхні, які з високою вірогідністю відображають зазначені залежності.

Ключові слова: грохот, вібрація, параметри, електромагнітний перетворювач, моделювання.

Вступ. В процесі підготовки рудної сировини до металургійного переділу вона піддається дробленню, подрібненню, класифікації, сепарації та іншим технологічним операціям. Метою цих операцій є вилучення корисного компонента із видобутої руди та позбавлення кінцевого продукту від шкідливих домішок. Технологічний процес збагачувальних фабрик вимагає періодичної класифікації проміжних продуктів збагачення рудного матеріалу за крупністю її часток. Перспективним напрямком підвищення ефективності та продуктивності цієї операції є застосування грохотів тонкого грохочення. На багатьох збагачувальних фабриках вже доведено переваги тонкого грохочення руди: ефективним поділ її часток за крупністю, підвищення продуктивності, покращення якості продукту, зниження витрат на воду, зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище, поліпшення безпеки експлуатації. Разом з цим слід зазначити, що досягнення цих переваг

значною мірою залежить від якісного налаштування параметрів грохочення до характеристик сировини, що класифікується, із відповідним врахуванням її фізико-механічних характеристик та особливостей структурно-текстурного складу. Зазначене налаштування досягається регулюванням характеристик як існуючого віброприводу просіювальної поверхні, так і застосуванням додаткових силових впливів.

Об'єктом дослідження є процес тонкого грохочення подрібненої руди для класифікації за крупністю її часток.

Предмет дослідження математичні та комп'ютерні моделі процесу просіювання рудного матеріалу на грохотах з комбінованим електромагнітним та електромеханічним приводом.

Мета роботи дослідження динаміки руху просіювальної поверхні та часток подрібненої руди для обґрунтування застосування грохоту тонкого грохочення руди з комбінованим вібраційним приводом, а також визначення залежності якості та продуктивності процесу від параметрів вібрації.

Викладання основного матеріалу. Класифікація рудної сировини в гірничопереробній промисловості виконувалась переважно гідроциклонами протягом десятків років. Раніше механічні класифікатори використовувалися у замкнених контурах мокрого помелу руди, а потім вони замінювалися гідроциклонами, як більш економічно ефективними агрегатами. Гідроциклони здатні працювати з високим навантаженням на невеликій площі, можуть добре справлятися з різними технологічними збуреннями та мають низькі капітальні витрати. Тому кульовий млин у замкнутому циклі з гідроциклонами став найпоширенішою структурою на підприємствах збагачення корисних копалин. До недавнього часу сита мало використовувалися в схемах подрібнення через проблеми засліплення та вимог до великої площі поверхні. Однак прогрес у високочастотних механізмах і просіювальних поверхнях з дуже малими отворами певною мірою подолав ці проблеми, і зараз вже є багато прикладів успішного застосування грохотів тонкого грохочення для підвищення ефективності процесу збагачення руди [1].

Існує безліч моделей, які використовують на підприємствах для сухого і мокрого грубого грохочення руди. Але сучасні моделі не в змозі адекватно симулювати

складний процес тонкого грохочення. Крім того актуальною проблемою залишається визначення оптимальних режимів і параметрів процесу просіювання руди та розроблення ефективних методів їх досягнення.

В роботі [2] надано опис сучасної технології тонкого грохочення, яка дозволяє досягти максимальної ефективності для частинок подрібненої руди розміром до 45 мікрон. Зазначено, що більш ніж у 100 установках по всьому світу, високочастотний тонкий грохот Derrick довів свою здатність забезпечувати високу ефективність і продуктивність для мокрого сортування вугілля. Результатами промислової експлуатації доведено, що 150-мікронні просіювальні панелі у промислових умовах служать більше 12 місяців при безперервному використанні. Також досліджуються нові застосування тонкого грохочення, такі як, наприклад, заміна класифікаційних гідроциклонів. Імітаційне моделювання показує, що у деяких випадках сита можна використовувати як альтернативу флотації та досягати при цьому подібного вилучення та якості продуктів із значно меншими капітальними та експлуатаційними витратами.

Разом з тим, автори роботи [3], описуючи грохоти різних виробників, звертають увагу на деякі їх негативні властивості: швидкий знос клиноподібних колосників, та забивання щілин. Ці недоліки знижує вихід тонких класів в підрешітний продукт і вимагають частої зупинки грохотів для очищення або заміни сит. У результаті детального аналізу обладнання для тонкого грохочення зазначається, що сита високочастотних грохотів мають підвищений коефіцієнт живого перетину і збільшені можливості щодо самоочищення від важких зерен.

Необхідність підвищення якості продуктів збагачення рудної сировини потребує вдосконалення існуючих технологічних схем, у тому числі, за рахунок використання нового, більш ефективного обладнання. Для оптимізації підготовки тонкокраплених руд до збагачення у роботі [4] пропонується процес попередньої гідралічної класифікації подрібнених руд у технологічному тандемі плоскодонний гідроциклон – багаточастотний грохот. Зазначається, що такий тандем забезпечує збільшення сумарної продуктивності обладнання, високе вилучення дрібних класів у підрешітний продукт, збільшення терміну

служби тонких сит, зменшення витрат води на зрошення надRESHITного продукту.

У роботі [5] досліджено вплив параметрів грохочення на загальну ефективність процесу. Доведено, що зі збільшенням часу грохочення вихід малосортних продуктів поступово зменшувався, а середньозважений розмір частинок наближався до заданого розміру отворів грохота. Крім того, досліджено еволюція ефекту скринінгу з часом при різних частотах збудження. Зі збільшенням часу скринінгу ефективність скринінгу зростає, а загальна кількість недоречних матеріалів зменшується. При частоті вібрації 16,5 Гц мінімальний вміст загальної кількості неякісно класифікованих матеріалів становить 4,68%, а оптимальна ефективність просіювання досягає 89,55% [5]. Зазначається, що заміна гідроциклонів на височастотні грохоти дозволила отримати такі результати: збільшення на 13% пропускної здатності та зменшення на 15% енергії подрібнення у млинах замкненого циклу [1].

У роботі [6] досліджено характеристики руху грохота та механізми просіювання матеріалу, що класифікується. Отримані результати свідчать про те, що ефективність скринінгу залежить від того як матеріал рухається та розділяється на частинки і як частинки контактують одна з одною. Процес скринінгу матеріалу на еліптичному вібраційному грохоті змодельовано за допомогою методу дискретних елементів. Аналіз показав, що якщо порівнювати продуктивність скринінгу різних траєкторій руху просіювальної поверхні, то саме грохот з еліптичним рухом показує найкращі результати.

У роботі [7] досліджено вплив параметрів вібрації на процес скринінгу. Встановлені взаємозв'язки між зазначеними параметрами, швидкістю транспортування матеріалів та ефективністю просіювання формують базу даних для моделювання і аналізу процесу класифікації еліптичної вібраційної машини. Зроблено висновок, що за умов, коли нахил поверхні грохота та параметри вібрації змінюється у певних межах, можна забезпечити найвищу швидкість транспортування та ефективність просіювання матеріалів одночасно.

З наведеного можна зробити висновок, що застосування грохотів тонкого грохочення руди для класифікації подрібненої руди за крупністю її часток є перспективним напрямом підвищення продуктивності збагачувальних фабрик та

покращення якості їх продукції. Про те наявні проблемні питання, що виникають при їх експлуатації, потребують додаткових досліджень закономірностей динаміки поверхні вібросити та частинок просіюваної руди, визначення залежності ефективності грохочення від параметрів вібрації сита та удосконалення моделі процесу. Також актуальним питанням є розроблення методів, спрямованих на покращення керування процесом грохочення [8].

Для визначення основних характеристик процесу грохочення рудного матеріалу його модель має враховувати динаміку як просіювальної поверхні, так і закономірності руху і взаємодії часток подрібненої руди [9, 10].

Модель просіювальної поверхні грохота може бути представлена у вигляді сукупності сіток і вузлів, а рівняння рівноваги для кожного вузла у вигляді [11]

$$M\ddot{u} = P - I, \quad (1)$$

де M - матриця мас кожного вузла; $\ddot{u}$ - прискорення; P - зовнішня сила; I - внутрішня сила елемента.

З урахуванням рівняння (1) прискорення вузла в момент часу t можна обчислити за допомогою формули

$$\ddot{u}(t) = (M)^{-1}(P - I)(t), \quad (2)$$

У роботі [11] пропонується використовувати метод центральних різниць для вирішення рівняння переміщення шляхом інтегрування швидкості вузла гнучкої ситової плити

$$u|(t + \Delta t) = u|(t) + \Delta t|(t + \Delta t)\dot{u}|\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right), \quad (3)$$

Рух та взаємодія частинок рудного матеріалу на грохоті можуть бути виражені через вектори розгалуження та орієнтації контактних сил у вигляді наступної системи [12]

$$l = l_n \mathbf{n} + l_t \mathbf{t}, \quad (4)$$

$$\mathbf{f} = f_n \mathbf{n} + f_t \mathbf{t}, \quad (5)$$

де l_n та l_t - нормальна і тангенціальна складові векторів розгалуження; f та f_t — нормальна і тангенціальна складові контактної сили; $\mathbf{n}$ - одиничний вектор, перпендикулярний до

площини контакту; $\mathbf{t}$ - ортонормальний одиничний вектор (напрямок - проти годинникової стрілки); $(\mathbf{n}, \mathbf{t})$ - локальний одиничний фрейм.

Для спрощення моделюванні просіювальної поверхні грохота динаміку його вузлів доцільно представити у вигляді сукупності елементарних блоків, що відображають фізичні властивості пружності, демпфування та маси, і представляти їх із застосуванням програмного продукту Simscape Matlab/Simulink® [13].

Результат. Наведені залежності динаміки поверхні вібросита та частинок просіюваної руди використані при моделюванні руху грохота з комбінованим електромагнітним та електромеханічним приводом. Електромагнітна система може бути легко додана до існуючого на більшості грохотів приводу із застосуванням електродвигуна і при цьому надає більше можливостей щодо змін параметрів вібрації та, відповідно, покращення керування характеристиками процесу просіювання.

Результати процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. До параметрів вхідного рудного матеріалу віднесено загальну масу, концентрацію твердої фази та його гранулометричний склад. Параметрами вібрації визначено: нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації.

Показниками оцінки якості скринінгу є ефективність просіювання та швидкість транспортування рудного матеріалу.

Рівняння, застосоване для розрахунку ефективності просіювання, виглядає наступним чином [7]

$$\eta = \frac{m_{sp}}{m_{st}} \times 100\%, \quad (6)$$

де m_{sp} - загальна маса просіяних частинок у збірній коробці під ситовою пластиною, розмір яких менший за отвір сита; m_{st} - загальну масу частинок у вхідному продукті, розмір яких менший за апертуру екрана.

Швидкість транспортування рудного матеріалу в процесі просіювання визначається рівнянням [7]

$$v = \frac{L}{\bar{t}}, \quad (7)$$

де L - довжину пластини сита; $\bar{t}$ - середній час, протягом якого частинки руди рухаються від входу матеріалу до вихідних отворів.

Електромагнітна система комбінованого приводу описується наступними рівняннями [14-16]

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{R_1}{L_1} = u_1(t) \\ M \frac{dx^2}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + cx = F(x, i_1) \end{cases}, \quad (8)$$

де $u_1(t)$, - напруга на обмотках електромагніту; i_1 - струм в обмотці; L_1 - індуктивність електромагніту; R_1 - активний опір обмотки; x - рух полотна вібросита з якорем електромагніту; k - коефіцієнт тертя; c - жорсткість пружних елементів; M - вага якоря з прикріпленим полотном вібросита; $F(x, i_1)$ - електромагнітна сила, яка є функцією від струму i_1 та переміщення x .

Індуктивність електромагнітної системи залежить від руху якоря електромагніту і може бути визначена зі співвідношення [14]

$$L_1 = \frac{L_0}{1 - \beta \frac{x}{x_0}}, \quad (9)$$

де L_0 - індуктивність у середньому положенні якоря; x_0 - середній зазор між якорем і осердям електромагніту; β - коефіцієнт модуляції індуктивності.

Потокозчеплення для ненасиченої магнітної системи з середнім зазором x_0 можна виразити

$$\psi_1 = L_1 i_1. \quad (10)$$

Тоді для тягового зусилля, прикладеного до полотна вібросита маємо:

$$F_1 = \frac{\pi \psi_1 \omega}{4 U_0 m_0}, \quad (11)$$

де U_0 - постійна складова напруги; m_0 - коефіцієнт варіації напруги.

На рис. 1 наведена схема моделі вібраційного грохота з комбінованим приводом, що використовується для реалізації процесу тонкого грохочення руди. Модель сформована із використанням програмного продукту Simscape Matlab/Simulink® [13].

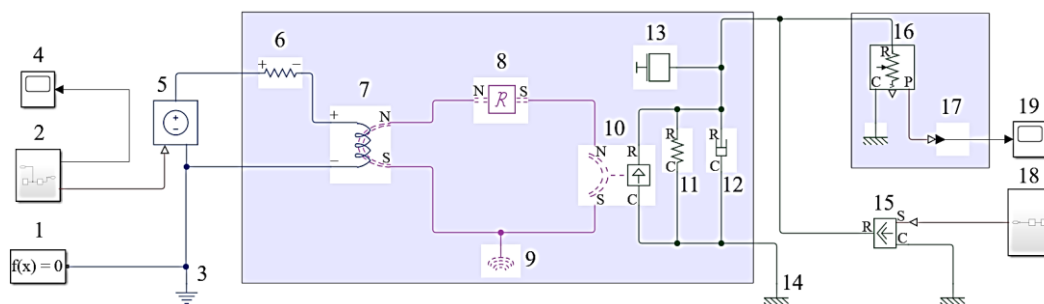


Рис. 1. Схема моделі вібраційного грохота з комбінованим приводом

У наведеній моделі використані наступні блоки: 1- блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок формування параметрів електромагнітних імпульсів; 3 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements;

4, 19 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 5 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 6 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 7 – блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 8 – блок Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 9 – блок Magnetic Reference із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 10 – блок Reluctance Force Actuator із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 11 – блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 12 – блок Translational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 13 – блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 14 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 15 – блок Ideal Force Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 16 – блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 17 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 18 - блок формування параметрів електромеханічного впливу.

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

Блок формування параметрів електромагнітних імпульсів – генерує

електричні імпульси обраної форми, амплітуди та тривалості.

Блок Scope відображає сигнали у часовій області.

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

Блок Resistor моделює лінійний резистор в електричних системах.

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

$$MMF = N \cdot I; \quad (12)$$

$$V = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (13)$$

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

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

$$MMF = \Phi \cdot \mathfrak{R}; \quad (14)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{g}{\mu_0 \mu_r A}, \quad (15)$$

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

Блок Magnetic Reference блок представляє точку відліку для всіх портів магніту.

Блок Reluctance Force Actuator (приводу сили опору) моделює загальний магніторушійний пристрій на основі сили опору. Блок базується на наступних рівняннях

$$F = -0.5 \cdot \Phi^2 \cdot \frac{d\mathfrak{R}}{dx}; \quad (16)$$

$$\mathfrak{R}(x) = \frac{x}{\mu_0 \mu_r A}; \quad (17)$$

$$u = dx, \quad (18)$$

де F - сила протидії; Φ - потік в магнітопроводі; $\mathfrak{R}$ - опір; x - товщина або довжина повітряного зазору; μ_0 - константа проникності; μ_r - відносна проникність матеріалу; A - площа поперечного перерізу секції, що моделюється; u - швидкість.

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

$$F = Kx; \quad (19)$$

$$x = x_{init} + x_R - x_C; \quad (20)$$

$$v = \frac{dx}{dt}. \quad (21)$$

де F - сила, що передається через пружину; K - коефіцієнт 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

$$F = m \frac{dv}{dt}, \quad (22)$$

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

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер, описаний такими рівняннями:

$$F = Dv; \quad (23)$$

$$v = v_R - v_C, \quad (24)$$

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 Force Source являє собою ідеальне джерело механічної енергії, яке генерує силу, пропорційну вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану силу на своєму виході незалежно від швидкості на терміналах джерела.

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.

Блок PS-Simulink Converter перетворює фізичний сигнал у вихідний сигнал Simulink®.

Блок формування параметрів електромеханічного впливу формує сигнал, що відповідає роботі приводу із електродвигуном.

Електромагнітний привод віброїти моделюється за допомогою магнітних блоків. Струм через котушку електромагніту створює магніторушійну силу (MMF), яка рухає магнітний сердечник. Створюється сила опору, яка змушує плунжер закривати повітряний зазор. Магнітний потік в магнітопроводі зростає зі зменшенням довжини повітряного проміжку. Блок формування параметрів електромагнітних імпульсів дозволяє легко змінювати їх форму, амплітуду, тривалість та фазу відносно механічних впливів, що формуються блоком Ideal Force Source у відповідності із сигналами з блоку формування параметрів електромеханічного впливу. Пружні властивості віброїти відтворюються налаштуванням параметрів механічної лінійної пружини (блок Translational Spring), механічного поступального в'язкого демпфера (блок Translational Damper) та механічної поступальної маси (блок Mass).

На рис. 2 наведено результати моделювання змін амплітуди переміщення поверхні вібросіта у часі від прикладеного електромагнітного впливу з частотою 100 Гц і електромеханічного впливу частотою 10 Гц.

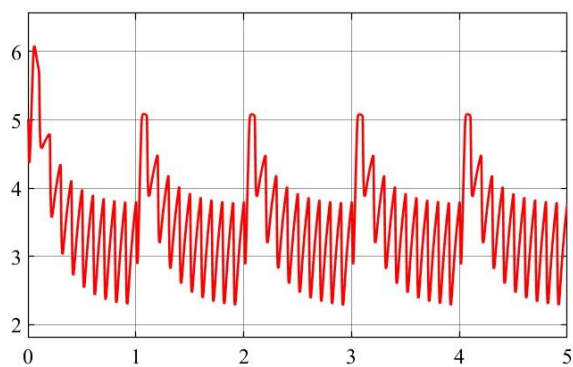


Рис. 2. Амплітуда переміщення (мм) поверхні вібросіта у часі ($\times 0,1$ с)

На рис. 3 наведено результати моделювання дії аналогічних впливів на зміни швидкості переміщення поверхні вібросіта.

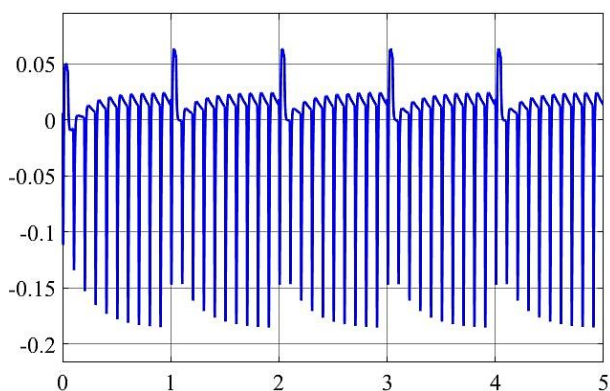


Рис. 3. Швидкість переміщення (м/с) поверхні вібросіта у часі ($\times 0,1$ с)

Таким чином, наведена на рис. 1 модель практично відображає можливості комбінованого віброприводу грохота тонкого грохочення рудного матеріалу щодо регулювання амплітуди, частоти та фази коливань просіювальної поверхні.

Наведена на рис. 1 модель використана для дослідження впливу кута вібрації на швидкість транспортування рудного матеріалу і ефективність грохочення. Регулювання кута вібрації реалізується за допомогою технології перетворення частоти і фази коливань, що формуються двома складовими комбінованого приводу.

Досліджено вплив зміни кута вібрації від 20° до 65° на зазначені показники процесу грохочення. На рис. 4 наведено схему регулювання кута вібрації шляхом зміщення напрямку осі коливань.

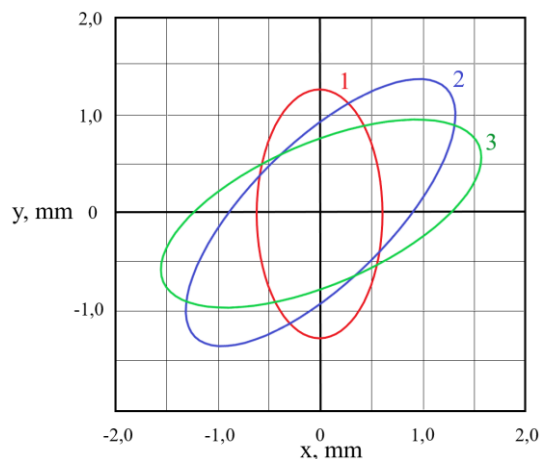


Рис. 4. Регулювання кута вібрації θ :
1 - $\theta_1 = 90^\circ$; 2 - $\theta_2 = 45^\circ$; 3 - $\theta_3 = 23^\circ$

На рис. 5 показано залежність між швидкістю транспортування матеріалів і кутом вібрації, а на рис. 5 – залежність між ефективністю просіювання та кутом вібрації.

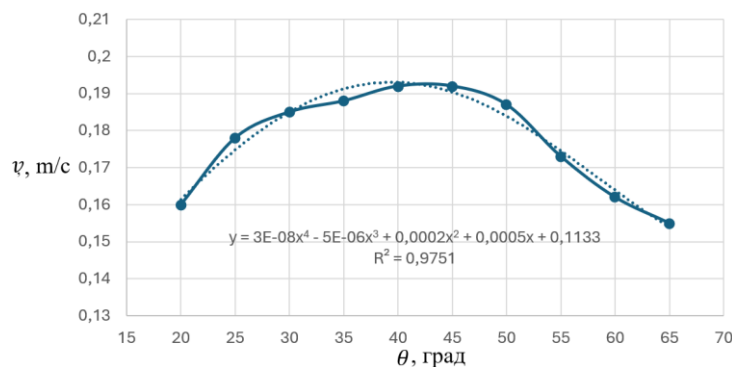
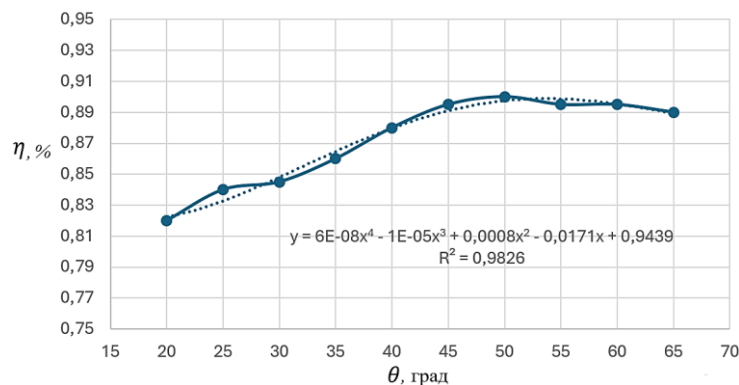
Наведена на рис. 6 залежність з вірогідністю $R^2 = 0,9751$ апроксимується наступним виразом

$$Y = 3 \cdot 10^{-8}x^4 - 5 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,0002x^2 + 0,0005x + 0,1133. \quad (25)$$

Рівняння апроксимації, наведеної на рис. 6 залежності ($R^2 = 0,9826$) має наступний вигляд

$$Y = 6 \cdot 10^{-8}x^4 - 10^{-5}x^3 + 0,0008x^2 - 0,0171x + 0,9439. \quad (26)$$

Для порівняльної оцінки запропонованої структури з існуючими приводними системами використані дані, наведені у дослідженнях [7,17]. Отримані результати моделювання грохота тонкого грохочення з комбінованим приводом свідчать про його кращу ефективність у порівнянні з дуальним приводом із застосуванням електродвигунів на 1-2% та збільшену при цьому швидкість транспортування рудного матеріалу на 0,2-0,3 м/с тобто відповідне підвищення продуктивності процесу.

Рис. 5. Залежність швидкості транспортування v рудного матеріалу від кута θ вібрації грохота θ Рис. 6. Залежність ефективності грохочення η від кута вібрації грохота θ

Висновки. Результати процесу вібраційного грохочення обумовлені зв'язками між параметрами вхідного рудного матеріалу, швидкістю транспортування, ефективністю просіювання та параметрами вібрації матеріалів. До параметрів вхідного рудного матеріалу віднесено загальну масу, концентрацію твердої фази та його гранулометричний склад. Параметрами вібрації визначено: нахил поверхні екрана, кут вібрації, частоту та амплітуду вібрації. Процес тонкого грохочення руди відбувається на вібраційних грохотах з електромеханічним приводом на основі одного чи двох електричних двигунів. Така конфігурація приводу обмежує можливості формування ефективної динаміки просіювальної поверхні та часток подрібненої руди в процесі грохочення.

Перспективи подальших досліджень. Напрямок подальших досліджень є визначення додаткових впливів на процес тонкого грохочення руди та вивчення закономірностей їх формування [18].

Література

1. Hakan Dündar. Investigating the benefits of replacing hydrocyclones with high-frequency fine screens in closed grinding circuit by simulation. Minerals Engineering Volume 148, 15 March 2020, 106212. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106212>
2. Zhang, Baojie & Wheeler, J & Jain, A & Packer, B. (2016). Improving Fine Coal Recovery with High Efficiency Fine Coal Classification. March 2016. Conference: Australian Coal Preparation Society. https://www.researchgate.net/publication/306032676_Improving_Fine_Coal_Recovery_with_High_Efficiency_Fine_Coal_Classification.
3. Олійник Т.А. Використання тонкого грохочення в умовах ПРАТ ПІВНІЧНОГО ГЗК / Олійник Т.А., Скляр Л.В., Олійник М.О., Кушнірук Н.В., Скляр А. Ю., Коржан І.А. // Підготовчі процеси збагачення. Збагачення корисних копалин, 2018. – Вип. 69(110), с. 69-77. <http://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2018-69-110/9.pdf>.
4. Косий Г. М. Розробка та випробування технологічного тандему плоскодонний гідроциклон – багаточастотний гуркіт. - Збагачення руд, 2022, №4. DOI 10.17580/or.2022.04.01.

5. Weinan Wang, Xu Hou, Pengfei Mao, Miao Pan, Shijie Yu, Haishen Jiang, Jinpeng Qiao, Chenlong Duan. Kinematic characteristics of key structures and time evolution law of material distribution characteristics during flip-flow screening. - *Minerals Engineering*, Volume 201, October 2023, 108241. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108241>.
6. Zhongjun Yin, Hang Zhang, Tian Han. Simulation of particle flow on an elliptical vibrating screen using the discrete element method. *Powder Technology*. Volume 302, November 2016, Pages 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.061>.
7. Bing Chen, Jiwei Yan, Wei Mo, Chuanlei Xu, Lijie Zhang, Kumar K Tamma. DEM simulation and experimental study on the screening process of elliptical vibration mechanical systems. - *JOURNAL OF VIBROENGINEERING*. DECEMBER 2019, VOLUME 21, ISSUE 8. DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2019.19993>
8. Porkuian O. Predictive Control of the Iron Ore Beneficiation Process Based on the Hammerstein Hybrid Model / Olga Porkuian, Vladimir Morkun, Natalia Morkun, Oleksandra Serdyuk // *Acta Mechanica et Automatica*, 2019, 13(4), P. 262-270. <https://doi.org/10.2478/ama-2019-0036>.
9. Santos, C.; Urdaneta, V.; García, X.; Medina, E. Compression and shear-wave velocities in discrete particle simulations of quartz granular packings: Improved Hertz-Mindlin contact model. *Geophysics* 2011, 76, E165–E174.
10. Zhou, J.; Zhang, L.; Hu, C.; Li, Z.; Tang, J.; Mao, K.; Wang, X. Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model. *Powder Technol.* 2022, 397, 117005.
11. Xu, N.; Wang, X.; Lin, D.; Zuo, W. Numerical Simulation and Optimization of Screening Process for Vibrating Flip-Flow Screen Based on Discrete Element Method–Finite Element Method–Multi-Body Dynamics Coupling Method. *Minerals* 2024, 14, 278. <https://doi.org/10.3390/min14030278>.
12. Azema E., Radja F. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. - *PHYSICAL REVIEW E* 85, 031303 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevE.85.031303
13. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
14. Je-Hoon Kim, Jin-Ho Kim¹, Sang-Hyun Jeong, Bang-Woo Han. Design and Experiment of an Electromagnetic Vibration Exciter for the Rapping of an Electrostatic Precipitator. - *Journal of Magnetism*, 17(1), 61-67 (2012). <http://dx.doi.org/10.4283/JMAG.2012.17.1.061>.
15. Nuraliyev A. Ibadullayev. M. Research and development of resonant electromagnetic vibration screen for intensive vibration technologies. *E3S Web Conf.* Volume 216, 2020. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601114>.
16. Merab CHELIDZE, Victor ZVIADAURI, Tamaz NATRIASHVILI. SOME PROBLEMS WITH THE MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC VIBRATORS USED FOR TRANSPORTING BULK MATERIALS. - *TRANSPORT PROBLEMS 2022* Volume 17 Issue 5. DOI: 10.20858/tp.2022.17.4.05.
17. A. N. Mwale, A. N. Mainza, P. A. Bepswa, S. Simukanga, J. Masinja. MODEL FOR FINE WET SCREENING. - *IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings* - ISBN: 978-1-926872-29-2 https://www.researchgate.net/publication/315586805_MODEL_FOR_FINE_WET_SCREENING.
18. Morkun V. S. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound / Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. // *Radio electronics computer science control*. – Vol. 3, – 2017. – P. 175-182. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-19>.

References

1. Hakan Dündar. Investigating the benefits of replacing hydrocyclones with high-frequency fine screens in closed grinding circuit by simulation. *Minerals Engineering* Volume 148, 15 March 2020, 106212. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106212>
2. Zhang, Baojie & Wheeler, J & Jain, A & Packer, B. (2016). Improving Fine Coal Recovery with High Efficiency Fine Coal Classification. March 2016. Conference: Australian Coal Preparation Society. https://www.researchgate.net/publication/306032676_Improving_Fine_Coal_Recovery_with_High_Efficiency_Fine_Coal_Classification.
3. Oliinyk T.A. Vykorystannia tonkoho hrokhochennia v umovakh PRAT PIVNICHCHO HZK / Oliinyk T.A., Skliar L.V., Oliinyk M.O., Kushniruk N.V., Skliar A. Yu., Korzhan I.A. // *Pidhotovchi protsesy zbahachennia. Zbahachennia korysnykh kopalyn*, 2018. Vyp. 69(110), S. 69-77. <http://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2018-69-110/9.pdf>.
4. Kosyi H. M. Rozrobka ta vyprobuvannia tekhnolohichnoho tandemu ploskodonnyi hidrosyklon – bahatochastotnyi hurkit. - *Zbahachennia rud*, 2022, №4. DOI 10.17580/or.2022.04.01.
5. Weinan Wang, Xu Hou, Pengfei Mao, Miao Pan, Shijie Yu, Haishen Jiang, Jinpeng Qiao, Chenlong Duan. Kinematic characteristics of key structures and time evolution law of material distribution characteristics during flip-flow screening. - *Minerals Engineering*, Volume 201, October 2023, 108241. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108241>.
6. Zhongjun Yin, Hang Zhang, Tian Han. Simulation of particle flow on an elliptical vibrating screen using the discrete element method. *Powder Technology*. Volume 302, November 2016, Pages 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.061>.
7. Bing Chen, Jiwei Yan, Wei Mo, Chuanlei Xu, Lijie Zhang, Kumar K Tamma. DEM simulation and experimental study on the screening process of

- elliptical vibration mechanical systems. - JOURNAL OF VIBROENGINEERING. DECEMBER 2019, VOLUME 21, ISSUE 8. DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2019.19993>
8. Porkuian O. Predictive Control of the Iron Ore Beneficiation Process Based on the Hammerstein Hybrid Model / Olga Porkuian, Vladimir Morkun, Natalia Morkun, Oleksandra Serdyuk // Acta Mechanica et Automatica, 2019, 13(4), P. 262-270. <https://doi.org/10.2478/ama-2019-0036>.
 9. Santos, C.; Urdaneta, V.; García, X.; Medina, E. Compression and shear-wave velocities in discrete particle simulations of quartz granular packings: Improved Hertz-Mindlin contact model. Geophysics 2011, 76, E165–E174.
 10. Zhou, J.; Zhang, L.; Hu, C.; Li, Z.; Tang, J.; Mao, K.; Wang, X. Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model. Powder Technol. 2022, 397, 117005.
 11. Xu, N.; Wang, X.; Lin, D.; Zuo, W. Numerical Simulation and Optimization of Screening Process for Vibrating Flip-Flow Screen Based on Discrete Element Method–Finite Element Method–Multi-Body Dynamics Coupling Method. Minerals 2024, 14, 278. <https://doi.org/10.3390/min14030278>.
 12. Azema E., Radja F. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. - PHYSICAL REVIEW E 85, 031303 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevE.85.031303
 13. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
 14. Je-Hoon Kim, Jin-Ho Kim1, Sang-Hyun Jeong, Bang-Woo Han. Design and Experiment of an Electromagnetic Vibration Exciter for the Rapping of an Electrostatic Precipitator. - Journal of Magnetism, 17(1), 61-67 (2012). <http://dx.doi.org/10.4283/JMAG.2012.17.1.061>.
 15. Nuraliyev A. Ibadullayev. M. Research and development of resonant electromagnetic vibration screen for intensive vibration technologies. E3S Web Conf. Volume 216, 2020. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601114>.
 16. Merab CHELIDZE, Victor ZVIADURI, Tamaz NATRIASHVILI. SOME PROBLEMS WITH THE MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC VIBRATORS USED FOR TRANSPORTING BULK MATERIALS. - TRANSPORT PROBLEMS 2022 Volume 17 Issue 5. DOI: 10.20858/tp.2022.17.4.05.
 17. A. N. Mwale, A. N. Mainza, P. A. Bepswa, S. Simukanga, J. Masinja. MODEL FOR FINE WET SCREENING. - IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings - ISBN: 978-1-926872-29-2. https://www.researchgate.net/publication/315586805_MODEL_FOR_FINE_WET_SCREENING.
 18. Morkun V. S. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound / Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. // Radio electronics computer science control. – Vol. 3, - 2017. - P. 175-182. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-19>.

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Ya.O. Modeling of the combined electromagnetic and electromechanical drive of the screen to increase its efficiency.

The paper considers the problem of increasing the efficiency of classification of crushed ore particles by size in the process of its beneficiation by using a fine screen with a combined drive for this operation and determining the main regularities of the influence of the screening surface vibration parameters on the main characteristics of the process. A theoretical analysis and computer modeling of the process of fine screening of ore material were performed. The screen, as a classifying technological unit in the process of ore dressing, separates the input crushed product by the size of its particles. The dynamics of both the screening surface and the patterns of movement and interaction of crushed ore particles are considered. When modeling the screening surface of a screen, it is advisable to represent the dynamics of its components as a set of elementary blocks, including elements of elasticity, damping, and mass. The main statistical parameters that describe the characteristics of contact forces and the power chain between ore particles in the process of their screening include the ratio of the components of the power chain and the contact angle. It is proved that the results of the vibration screening process are determined by the relationships between the parameters of the input ore material, transportation speed, screening efficiency, and vibration parameters of the materials. Vibration parameters include the slope of the screen surface, vibration angle, vibration frequency, and vibration amplitude. The screening quality assessment indicators are screening efficiency and ore material transportation rate. The studied dependences of the dynamics of the vibrating screen surface and the particles of the screened ore were used to model the motion of a screen with a combined electromagnetic and electromechanical drive. The motion and interaction of ore particles on the screen are expressed through the branching vectors and orientation of contact forces. Analytical expressions for the relationship between the rate of transportation of ore material and screening efficiency and the angle of vibration of the screening surface have been obtained, which reflect these dependencies with high reliability.

Keywords: screen, vibration, parameters, electromagnetic transducer, modeling.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівський національний університет імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.н., старший дослідник, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного

податкового університету (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Стаття подана 30.01.2025.