

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ХВИЛЬОВОГО ПІДХОДУ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Азарян А.А., Гриценко А.М.

MODELING OF AUTOMATED CONTROL OF MINING PRODUCTION FACILITIES BASED ON THE WAVE APPROACH

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Azaryan A.A., Gritsenko A.M.

В процесі класифікації подрібненої руди за крупністю на грохоті тонкого вологого грохочення руди в його конструкції формуються різноманітні коливання, які поширюються у вигляді біжучих хвиль. Для опису і моделювання динамічної реакції об'єкту, в елементах якого розповсюджуються біжучі хвилі, його представлено у вигляді мультиагентної системи. Такий підхід базується на хвильовій передавальній функції, яка визначає взаємодії між агентами, параметри біжучих хвиль та описує поведінку системи з локальної точки зору окремих її елементів. Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що використаний підхід добре підходить для відображення загальної топології хвильових процесів у досліджуваній структурі та її загальної поведінки. Разом з тим, застосована модель включає основні вузлові точки конструкції грохота але не відображає хвильовий процес, що відбувається безпосередньо на ситовій поверхні. Вирішення цього завдання потребує використання великої кількості агентів із відповідним врахуванням їх взаємодії, що є досить складним при цьому підході. Розглянуто альтернативний підхід, заснований на застосуванні блоків фізичного моделювання на основі програмного комплексу Simscape® для Simulink® /MATLAB®. Ситове полотно представлено у вигляді структури з розподіленими параметрами, реалізованої для податливості конструкції на вертикальні коливання та вигин. Запропонована структура складається з елементарних блоків Mass-Spring-Damper, що з'єднуються між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів. Така структура забезпечує інерцію полотна, а системи пружинних демпферів забезпечують її податливість. Модель симулює динамічну реакцію системи, коливається у відповідь на прикладену силу і згинається у відповідь на статичний дисбаланс маси. Перевагою такого

підходу є можливість застосування будь якої кількості елементарних блоків Mass-Spring-Damper з можливістю формування із необхідною точністю розподілення як пружних якостей полотна, так і маси рудного матеріалу на ньому. Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що запропонований підхід дозволяє визначати, формувати та досліджувати різноманітні режими руху рудного матеріалу під час грохочення для досягнення оптимальних технологічних та енергетичних показників процесу.

Ключові слова: руда, грохочення, енергоефективність, моделювання, керування, автоматизація, характеристики.

Вступ. Технологічні процеси гірничого виробництва пов'язані із використанням силових енергетичних впливів на продукти видобутку та переробки корисних копалин. Завдяки цьому відбувається руйнування гірської породи під час буріння свердловин, дроблення, подрібнення і класифікація руди в процесі її збагачення та ін. В свою чергу, силовий вплив, що формується технологічними агрегатами у вигляді ударів, коливань і вібрацій, призводить до генерації та розповсюдження пружних повздовжніх і поперечних хвиль. Цей процес відбувається як у гірському масиві, кусковій рудній масі чи рудній пульпі, так і в елементах конструкції самих технологічних агрегатів, що з ними контактують.

У практиці гірничого виробництва класифікація подрібненої руди за крупністю має важливе значення для досягнення високої якості

продукту, який подається далі на металургійний переділ. Останнім часом велика увага приділяється вдосконаленню цієї технологічної операції шляхом використання грохотів тонкого вологого грохочення руди. Мотивовані потребою промисловості ефективно обробляти гранульовані матеріали та бажанням досягти фундаментальних успіхів у фізиці нерівноважних станів, експериментальні та теоретичні дослідження показали, що розділення за розмірами є складним явищем. Хоча співвідношення розмірів є домінуючим фактором, специфічні для частинок властивості, такі як густина, пружність та тертя, можуть відігравати важливу роль. Характер вхідної енергії, граничні умови та проміжне середовище також виявилися значними факторами у визначенні просторових розподілів. Для дослідження цих властивостей використовуються експериментальні методи, включаючи електромагнітні перетворення, пряму візуалізацію, магнітно-резонансну томографію та ін. Для дослідження розділення за розмірами були розроблені методи молекулярної динаміки та моделювання Монте-Карло. Аналітичні методи, такі як кінетична теорія, використовуються для вивчення взаємодії між розміром частинок і густиною у віброфлюїдизованому режимі, а для опису розділення за розмірами для глибоких шарів були запропоновані геометричні моделі [1].

У роботі [2] досліджується рух частинок та еволюцію внутрішньої мікроструктури в бінарних сумішах за вібраційних умов. Акцент робиться на розумінні як глобальних, так і локальних процесів сегрегації в часі, а також на з'ясуванні потенційних основних механізмів. Моделювання за допомогою методу дискретних елементів (МДЕ) доводить, що великі частинки мають тенденцію підніматися до поверхні контейнера, тоді як дрібні частинки агрегуються на дні, що призводить до відомого ефекту бразильського горіха. Зі збільшенням інтенсивності вібрації ступінь сегрегації стає більш вираженим. Вертикальна сегрегація передуює радіальній сегрегації та зрештою призводить до стабільного розділення бінарної суміші. Для всебічного аналізу поведінки сегрегації введено індекс сегрегації та виявлено кореляцію між вертикальною та радіальною сегрегацією. Ці результати підкреслюють потенційний вплив зовнішніх збурень на мікроструктуру гранульованих сумішей, що має значення для таких сценаріїв, як землетруси, селеві потоки та транспортні навантаження.

У роботі [3] представлено числове дослідження потоку частинок та поведінки просіювання на вібраційному грохоті. Потік частинок моделюється за допомогою методу дискретних елементів (МДЕ) у масштабі частинок. Модель МДЕ спочатку перевіряється на наявність відповідності між числовими та експериментальними результатами з точки зору розподілу відсотка проходження частинок різного розміру вздовж деки грохота. Потім вивчається вплив таких змінних, як кут нахилу, частота коливань та амплітуда, з особливим акцентом на загальну ефективність грохота та розподіл швидкостей проходження для частинок різного розміру. Показано, що продуктивність такого процесу просіювання пов'язана з потоком частинок на грохоті, таким як структура шару частинок, швидкості частинок та взаємодія частинка-частинка та частинка-дека.

Що стосується зовнішнього збудження, то в більшості попередніх досліджень для генерації тремтіння використовувалося синусоїдальне збудження, тоді як насправді все ще існують тремтіння в несинусоїдальному режимі. На сьогоднішній день, окрім таких окремих досліджень, було проведено мало систематичних досліджень взаємозв'язку між режимами струшування, які створюють несинусоїдальний рух, та явищем сегрегації. У роботі [4] еволюція сегрегації за різних режимів вібрації простежується та аналізується, при цьому сегрегація характеризується новим графічним індексом сегрегації, що має як фізичне, так і геометричне значення.

Динамічну поведінку конструкції технологічних агрегатів можна оцінити з точки зору параметрів хвиль, що поширюються через її елементи [5]. Цей підхід широко відомий як метод біжучої хвилі (МБХ). Поширення зовнішнього збудження всередині елементів конструкції та поведінка хвиль на розриві визначаються амплітудою хвиль зміщення, а також коефіцієнтами відбиття та пропускання хвиль. Сукупність цих властивостей забезпечує стислий метод оцінки динамічної реакції конструкції. У роботі [5] показано, що МБХ вимагає менше обчислювального часу, ніж метод дискретних елементів МДЕ, може безпосередньо враховувати частотно-залежні ефекти взаємодії елементів конструкції в аналізі та дає точніші результати на високих частотах.

Метою цієї статті є формулювання та обґрунтування теоретичної основи використання підходу поширення біжучих

хвиль для аналізу динаміки та керування процесом тонкого вологого грохочення руди.

Викладання основного матеріалу. В процесі класифікації подрібненої руди за крупністю на грохоті тонкого вологого грохочення руди в його конструкції формуються різноманітні коливання, які поширюються у вигляді біжучих хвиль (рис. 1).

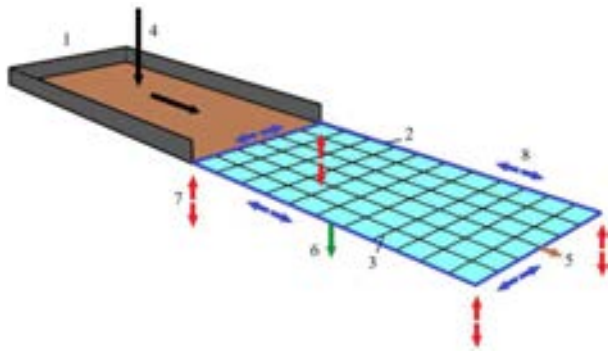


Рис. 1. Розповсюдження пружних хвиль по конструкції грохота тонкого вологого грохочення руди: 1 – рудний живильник; 2 – рама грохота; 3 – полотно сита; 4 – вхідний рудний матеріал; 5 – надрешітний продукт грохочення; 6 – підрешітний продукт грохочення; 7 – вертикальні вібрації рами грохота; 8 – пружні хвилі у рамі грохота

Біжуча хвиля в середовищі – це збурення середовища, яке поширюється через нього в певному напрямку та з певною швидкістю. Під «збуренням» мається на увазі зміщення частинок, що складають середовище, від їхнього положення спокою або рівноваги. Ідея підходу полягає в тому, щоб розглядати кожну частину пружного середовища як потенційний осцилятор, який взаємодіє з сусідніми частинами, штовхаючи або тягнучи їх. Коли біжуча хвиля досягає певного місця в середовищі, вона приводить цю частину середовища в рух, надаючи їй певну енергію та імпульс, які вона потім передає сусідній частині, і так далі по лінії [6-8].

Математичний вираз біжучої хвилі можна отримати із загального диференціального рівняння в частинних похідних

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f\left(u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t}, \dots\right), \quad (1)$$

Це рівняння можна проаналізувати шляхом заміни змінних

$$u(x, t) = U(\xi), \quad (2)$$

де $\xi = \xi(x, t)$ – функція, яку потрібно визначити.

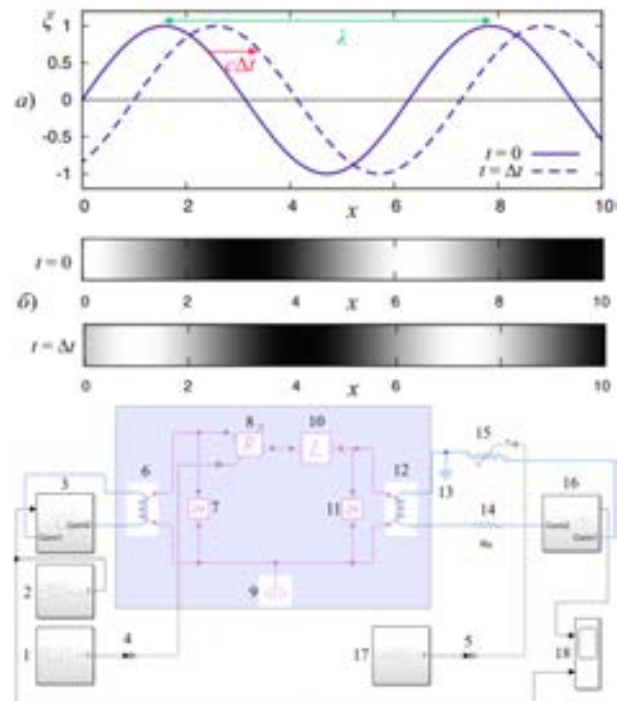


Рис. 2. Процес розповсюдження поперечних (а) та повздовжніх (б) хвиль у середовищі (нормалізовані значення амплітуди): ξ – амплітуда; x – переміщення; t – час; c – швидкість

Тоді, рівняння (1) можна записати як [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} \\ &= f\left(u, \frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \right), \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \right), \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right], \dots\right) = \\ &= f\left(u, \frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \frac{dU}{d\xi} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right) + \frac{d^2 U}{d\xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2, \frac{dU}{d\xi} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t} \right) + \frac{d^2 U}{d\xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right), \dots\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Біжуча хвиля є лінійним випадком рівняння (3) для якого частинні похідні мають вигляд

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -kc, \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = k, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t} = \dots = 0,$$

відповідно

$$\xi(x, t) = k(x - ct), \quad (4)$$

де k – хвильове число; c – швидкість хвилі.

Цей випадок визначають як біжучу хвилю, оскільки він відповідає лінійному переміщенню вздовж осі x відносно t . Для цього випадку рівняння (3) зводиться до

$$(-kc) \frac{dU}{d\xi} = f\left(U, k \frac{dU}{d\xi}, k^2 \frac{d^2U}{d\xi^2}, -k^2 c \frac{d^2U}{d\xi^2}, -k^3 c \frac{d^3U}{d\xi^3}, \dots\right) \quad (5)$$

або в канонічній формі

$$\frac{dU}{d\xi} = f\left(U, \frac{dU}{d\xi}, \frac{d^2U}{d\xi^2}, \frac{d^3U}{d\xi^3}, \dots\right), \quad (6)$$

де константи c та k входять до f .

Коли хвиля поширюється через середовище, його частинки, або елементи маси, коливаються навколо положення рівноваги. Із врахуванням фази ϕ швидкість коливань визначається виразом [8]

$$v_y(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [A \sin(kx - ct + \phi)] = -Aw \cos(kx - ct + \phi) = -v_{y \max} \cos(kx - ct + \phi), \quad (7)$$

Швидкість частинок середовища не є постійною, що означає наявність прискорення

$$\begin{aligned} a_y(x, t) &= \frac{\partial v_y(x, t)}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} [-Aw \cos(kx - ct + \phi)] \\ &= -Aw^2 \sin(kx - ct + \phi) = \\ &= -a_{y \max} \sin(kx - ct + \phi). \end{aligned} \quad (8)$$

Важливими елементами хвильового підходу для оцінки динамічного стану об'єкту є визначення характеристичних ознак процесу поширення хвилі. До таких ознак можна віднести частинні похідні відносно координати x . Перша похідна – це нахил хвилі в точці x у момент часу t [8]

$$\text{slope} = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [A \sin(kx - ct + \phi)] = Ak \cos(kx - ct + \phi). \quad (9)$$

Друга частинна похідна виражає як змінюється нахил або кривизна хвилі залежно від положення

$$\text{curvature} = \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} [A \sin(kx - ct + \phi)] = -Ak^2 \sin(kx - ct + \phi). \quad (10)$$

Загалом, за зазначених умов хвильовий процес описується лінійним хвильовим

рівнянням, яке визначається співвідношенням прискорення та кривизни

$$\frac{\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}}{\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial x^2}} = \frac{-Ac^2 \sin(kx - ct + \phi)}{-Ak^2 \sin(kx - ct + \phi)} = \frac{c^2}{k^2} = v^2, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\xi x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}. \quad (12)$$

Хвиля є носієм енергії. Повна усереднена за часом густина енергії в області середовища, зайнятій хвилею, визначається як [6]

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{2} \rho_0 w^2 \xi_0^2. \quad (13)$$

де V – об'єм середовища; ρ_0 – щільність середовища.

У разі застосування хвильового імпульсу p енергетичне співвідношення має вигляд

$$\frac{E}{V} = \frac{cp}{V}. \quad (14)$$

Якщо хвиля поширюється зі швидкістю c , тоді потік енергії дорівнює $\frac{E}{V} c$. Цей параметр визначає інтенсивність хвилі [6]

$$I = \frac{1}{2} c \rho_0 w^2 \xi_0^2 = \frac{1}{2} Z w^2 \xi_0^2, \quad (15)$$

де Z – акустичний імпеданс середовища.

$$Z = c \rho_0. \quad (16)$$

Для опису і моделювання динамічної реакції об'єкту, в елементах якого розповсюджуються біжучі хвилі, зручно представити його у вигляді мультиагентної системи [9]. Цей підхід заснований на використанні хвильових передавальних функцій та описує біжучі хвилі за допомогою графу шляхів [10, 11].

Поведінка n -го агента в мультиагентній системі описується як [9-11]

$$X_n(s) = P(s)U_n(s), \quad (17)$$

де s – змінна Лапласа; $X_n(s)$ – вихідний сигнал агента, наприклад, положення; $P(s)$ – передавальна функція агента, тобто модель динаміки агента; $U_n(s)$ – вхідний сигнал агента, який передається локальним контролером агента з метою вирівнювання $X_n(s)$ з вихідними сигналами сусідніх агентів.

У разі наявності довільної кількості сусідів
у агента

$$U_n(s) = C(s) \sum_{k \in N_h} (X_k(s) - X_n(s)), \quad (18)$$

де N_b - набір сусідніх агентів n -го агента; $C(s)$ - передавальна функція контролера.

Модель агента тоді має вигляд

$$X_n(s) = M(s) \sum_{k \in N_h} (X_k(s) - X_n(s)), \quad (19)$$

де $M(s) = P(s)C(s)$.

Також (19) можна виразити як

$$X_n(s) = T_N(s) \sum_{k \in N_h} (X_k(s)), \quad (20)$$

де $T_N(s) = M(s)/(1 + NM(s))$; N - кількість сусідів n -го агента.

Ідея підходу хвильової передавальної функції для багатоагентної системи з топологією графа шляхів полягає в тому, що вихід кожного агента, наприклад, позиція, визначається двома компонентами $W_{n,n+1}^d$ та $W_{n+1,n}^a$, що представляють дві хвилі, які поширюються в прямому та зворотному напрямках відповідно [10]. Перший нижній індекс є індексом агента, з якого відходить хвиля, а другий нижній індекс є індексом агента, до якого прибуває хвиля. Верхній індекс позначає, чи хвиля є агентом, що її відправляє (d), чи з агентом, до якого вона прибуває (a). У разі застосування простої лінійної топології (сусідами агента n є агенти $n - 1$ та $n + 1$) має місце такий зв'язок [9]

$$X_n(s) = W_{n,n+1}^d(s) + W_{n+1,n}^\alpha(s) = W_{n-1,n}^\alpha(s) + W_{n,n-1}^d(s), \quad (21)$$

Спосіб поширення хвилі описується ірраціональною передавальною хвильовою функцією (ПХФ), що визначається як [9,10]

$$G(s) = \frac{X_{n+1}(s)}{X_n(s)} = \frac{1}{2}\alpha(s) - \frac{1}{2}\sqrt{\alpha^2(s) - 4}, \quad N \rightarrow \infty \quad (22)$$

де $\alpha(s) = 1/M(s) + 2 \text{ } G^{-1}(s) = 1/G(s)$.

Із врахуванням (21) та (22)

$$W_{n,n+1}^a(s) = G(s)W_{n,n+1}^d(s), \quad (23)$$

$$W_{n+1,n}^a(s) = G(s)W_{n+1,n}^d(s), \quad (24)$$

Якщо існує хвиля, що поширюється до агента з більш ніж двома сусідами, то вона частково відбивається від цього агента і частково передається далі. Передавальна функція $T_{t,N}(s)$ описує, як хвиля проходить через агент з N сусідами, та передавальна функція $T_{r,N}(s)$ описує, як хвиля відбивається від агента з N сусідами [10]

$$T_{t,N}(s) = \frac{W_{n,n-1}^d(s)}{W_{n+1,n}^a(s)} = \frac{T_N(s)(1-G^2(s))}{G(s)(1-NT_n(s)G(s))}, N \geq 2 \quad (25)$$

$$T_{r,N}(s) = \frac{W_{n,n-1}^d(s)}{W_{n-1,n}^a(s)} = \frac{(N-1)T_N(s)G^2(s) + T_N(s) - G(s)}{G(s)(1 - NT_N(s)G(s))}, N \geq 1, \quad (26)$$

де $n - 1$ та $n + 1$ -й є сусідніми агентами n -го агента.

Зазначений підхід використаний для формування динамічної моделі грохота тонкого вологого грохочення руди та опису топології взаємодії його елементів. На рис. 3 наведена схема моделі на основі мультиагентної структури з топологією графа шляхів.

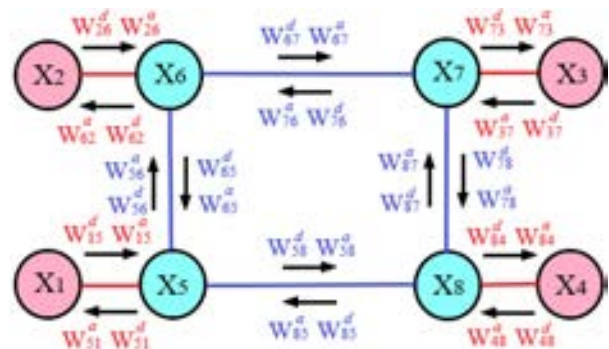


Рис. 3. Схема моделі грохота тонкого вологого грохочення руди на основі мультіагентної структури з топологією графа шляхів

Наведені на рис. 3 агенти X_n можуть бути активними чи пасивними та описуються локальною динамікою $G(s)$. Розповсюдження біжучих хвиль у системі відповідає виразам (21-24).

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що використаний підхід добре підходить для відображення загальної топології хвильових процесів у досліджуваній структурі та її загальної поведінки. Разом з тим, представлена на рис. 3 модель включає основні вузлові точки конструкції грохота але не

відображає хвильовий процес, що відбувається безпосередньо на ситовій поверхні. Вирішення цього завдання потребувало би використання великої кількості агентів із відповідним врахуванням їх взаємодії, що є досить складним при цьому підході [9]. Далі розглянутий альтернативний підхід, заснований на застосуванні блоків фізичного моделювання на основі програмного комплексу Simscape® для Simulink® /MATLAB® [12].

Ситове полотно представлено у вигляді структури з розподіленими параметрами, подібно до блоку Flexible Shaft із бібліотеки Simscape / Driveline / Couplings & Drives [12,13], але реалізованої для податливості конструкції на вертикальні коливання та вигин. Запропонована структура складається з n елементарних блоків Mass-Spring-Damper, що з'єднуються між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів (рис. 4).

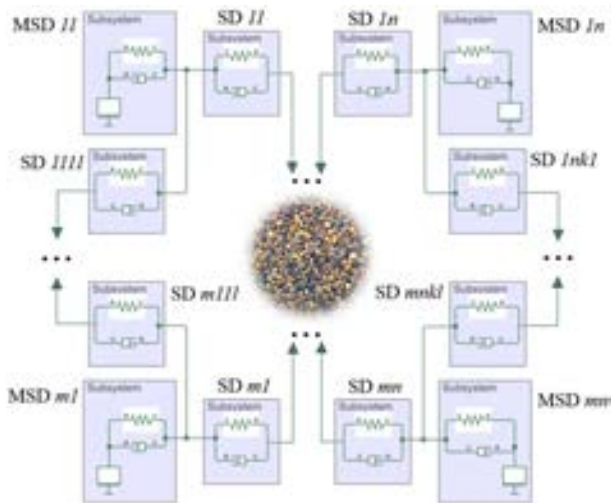


Рис. 4. Схема моделі ситового полотна у вигляді структури з розподіленими параметрами на основі елементарних блоків Mass-Spring-Damper

Зазначена структура забезпечує інерцію полотна, а системи пружинних демпферів забезпечують її податливість. Модель симулює динамічну реакцію системи, коливається у відповідь на прикладену силу і згинається у відповідь на статичний дисбаланс маси. Перевагою такого підходу є можливість застосування будь якої кількості елементарних блоків Mass-Spring-Damper з можливістю формування із необхідною точністю розподілення як пружних якостей полотна, так і маси рудного матеріалу на ньому.

На рис. 5 наведена схема моделі загальної структури автоматизованого керування грохотом тонкого вологого грохочення руди на

основі хвильового підходу із застосуванням блоків програмного комплексу Simscape® для Simulink® /MATLAB® [12].

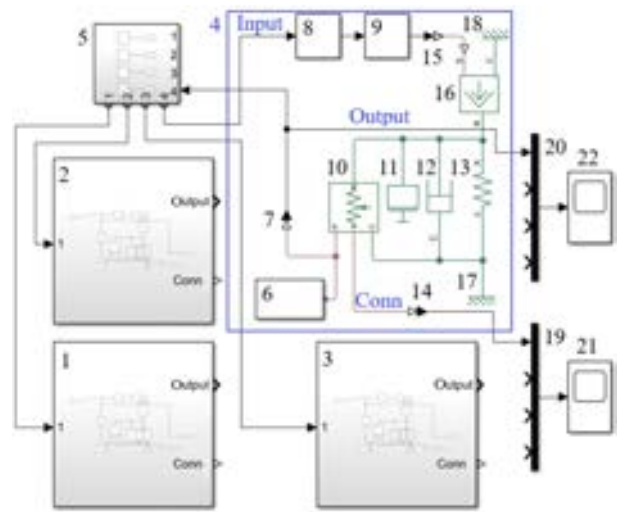


Рис. 5. Схема моделі загальної структури автоматизованого керування грохотом тонкого вологого грохочення руди на основі хвильового підходу

У наведеній на рис. 5 моделі використані наступні елементи: 1-5 – блоки Subsystem 1-5; 6 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 7,14 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 8 – формувач сигналу запуску ЕМП; 9 – блок ЕМП; 10 – блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 11 – блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 12 – Translational Damper із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 13 – блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 15 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 16 – блок Ideal Force Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 17,18 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 19,20 – блоки Mux із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Signal Routing; 21,22 – блоки Scope із бібліотек Scope Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks.

Блоки Subsystem 1-4 відображають структуру системи із можливістю формування активних силових впливів у чотирьох точках (кутах) рами грохота. Ситове полотно умовно

відображено кількома елементарними блоками Mass-Spring-Damper.

Блок Subsystem 5 застосовується для формування керуючих впливів в системі із врахуванням сигналів Input та Output с кожного блоку Subsystem 1-4.

У якості формувача силових впливів використаний електромагнітний перетворювач ЕМП [14], параметри якого задаються блоком ЕМП.

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 достатньо потужне, щоб підтримувати задану силу на своєму виході незалежно від швидкості на терміналах джерела.

Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює змінну, виміряну між двома вузлами механічного поступального руху, на керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. Датчик є ідеальним, оскільки він не враховує інерцію, тертя, затримки, споживання енергії тощо. Термінали A, V (на рис. 5 не показаний) та P – це порти виведення фізичних сигналів, що відповідають прискоренню, швидкості та положенню відповідно.

На рис. 6, у якості прикладу моделювання, наведено сигнал, що відповідає хвильовому процесу у двох точках ситового полотна грохота, що утворюється від прикладення періодичного силового впливу з частотою 100 Гц, 20 Гц, 10 Гц та 2 Гц до одного із кутів рами грохота.

Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що запропонований підхід дозволяє визначати, формувати та досліджувати різноманітні режими руху рудного матеріалу під час грохочення для досягнення оптимальних технологічних та енергетичних показників процесу [15]. Хвильові процеси, наведені на рис. 6, сформовані із застосуванням силового впливу, прикладеного лише в одній з можливих точок моделі. У якості регульованих параметрів також можуть бути застосовані амплітуда, частота, ширина силових імпульсів, та їх фазовий зсув у разі застосування декількох джерел генерації. З урахуванням частотного перетворення хвильових процесів, що слідує з рис. 6, для ідентифікації сформованих робочих режимів грохота доцільно використовувати результати спектрального аналізу виміряних сигналів. Зазначені особливості дають підстави вважати перспективним використання

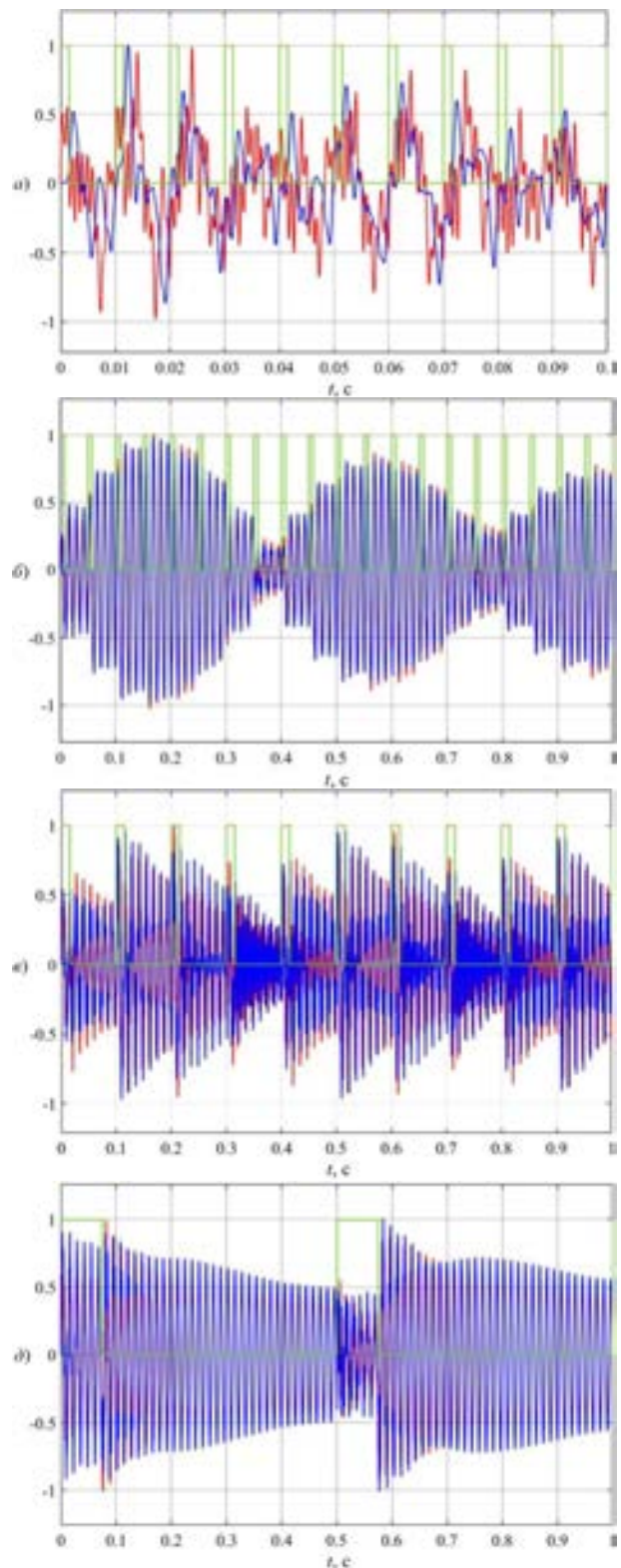


Рис. 6. Хвильовий процес у двох точках ситового полотна грохота, що утворюється від прикладення періодичного імпульсного силового впливу з частотою 100 Гц (а), 20 Гц (б), 10 Гц (в) та 2 Гц (г) до одного із кутів рами грохота (нормалізовані значення амплітуди). Ширина імпульсу – 15%

алгоритму модельно-прогнозуючого керування (МПК) для формування автоматизованого управління процесом тонкого вологого грохочення руди, реалізованого для об'єкта класу МІМО (Multiple-Input Multiple-Output).

Висновки. Вперше динамічну модель грохота тонкого вологого грохочення руди представлено у вигляді мультиагентної системи, в елементах якої розповсюджуються пружні біжучі хвилі, передавальні функції визначають хвильові процеси взаємодії між ними, а топологія представлена графовою структурою, що дозволяє спрогнозувати локальну поведінку і вплив основних елементів конструкції на технологічні та енергетичні характеристики процесу грохочення.

Для підвищення якості моделювання руху рудного матеріалу під час грохочення ситове полотно представлено у вигляді структури з розподіленими параметрами, яка складається з елементарних блоків маса-пружина-демпфер, з'єднаних між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів, що дозволяє формувати із необхідною точністю розподілення як пружних якостей полотна, так і маси рудного матеріалу на ньому, та симулювати динамічну реакцію системи у вигляді коливань у відповідь на прикладену силу і згинання у відповідь на статичний дисбаланс маси.

Напрямок подальших досліджень слід вважати алгоритмізацію формування та визначення параметрів оптимальних керуючих впливів у системі автоматизованого управління процесом тонкого вологого грохочення руди на основі хвильового підходу.

Література

1. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter. *Reports on Progress in Physics*. 2004, vol. 67 (3). DOI 10.1088/0034-4885/67/3/R01.
2. Dai S., Zhang S., Gao F., He X., Sheng D. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism. *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 169, 106236. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106236>.
3. Dong K. J., Wang B., & Yu A. B. Modeling of Particle Flow and Sieving Behavior on a Vibrating Screen: From Discrete Particle Simulation to Process Performance Prediction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013, 52 (33), 11333-11343. DOI: 10.1021/ie3034637.
4. Dai Bei-Bing, Yuan Wei-Hai, Liu Jian-Kun, Liu Feng-Tao, Chang D. Estimating the segregation of a granular bed subjected to vibration in various modes. *Advanced Powder Technology*/ 2021, vol. 32(5), p. 1450-1462. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.001>.

5. Çağlar N.M., Şafak E. Application of Travelling Wave Method for dynamic analysis of plane frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2019, vol. 17, 1361–1377. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0493-7>.
6. Gea-Banacloche J. *University Physics I: Classical Mechanics*. 2019. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/768>.
7. Griffiths G. W., Schiesser W. E. *Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods with MATLAB and Maple*. Elsevier Science. 2012, ISBN: 978-0-12-384652-5.
8. Ling S. J., Sanny J., Moebs W. *University Physics Volume 1*. 2016. ISBN-13 978-1-938168-27-7. <https://d3bxy9euw4e147.cloudfront.net/oscm-prodcm/media/documents/UniversityPhysicsVolume1-LR.pdf>
9. Dan Martinec D., Herman I., Šebek M. Travelling waves in a multi-agent system with general graph topology. *IFAC-PapersOnLine*. 2015, vol. 48 (22), p. 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.311>.
10. Martinec D., Herman I., Hurák Z., Šebek, M. (2014). Wave-absorbing vehicular platoon controller. *European Journal of Control*, 20, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2014.06.001>.
11. Martinec, D., Herman, I., & Šebek, M. The transfer-function approach to travelling waves in path graphs. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.0474>
12. Simscape Block Libraries. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
13. Flexible Shaft. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html>.
14. Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко С.М., Грищенко Я.О. Моделювання комбінованого електромагнітного та електромеханічного приводу грохота для підвищення його ефективності. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, № 1 (287), с. 46-56. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
15. 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), 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.

References

1. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter. *Reports on Progress in Physics*. 2004, vol. 67 (3). DOI 10.1088/0034-4885/67/3/R01.
2. Dai S., Zhang S., Gao F., He X., Sheng D. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism. *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 169, 106236. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106236>.
3. Dong K. J., Wang B., & Yu A. B. Modeling of Particle Flow and Sieving Behavior on a Vibrating Screen: From Discrete Particle Simulation to Process Performance Prediction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013, 52 (33), 11333-11343. DOI: 10.1021/ie3034637.
4. Dai Bei-Bing, Yuan Wei-Hai, Liu Jian-Kun, Liu Feng-Tao, Chang D. Estimating the segregation of a granular bed subjected to vibration in various

- modes. *Advanced Powder Technology*/ 2021, vol. 32(5), p. 1450-1462. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.001>.
5. Çağlar N.M., Şafak E. Application of Travelling Wave Method for dynamic analysis of plane frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2019, vol. 17, 1361–1377. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0493-7>.
 6. Gea-Banacloche J. *University Physics I: Classical Mechanics*. 2019. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/768>.
 7. Griffiths G. W., Schiesser W. E. *Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods with MATLAB and Maple*. Elsevier Science. 2012, ISBN: 978-0-12-384652-5.
 8. Ling S. J., Sanny J., Moebs W. *University Physics Volume 1*. 2016. ISBN-13 978-1-938168-27-7. <https://d3bxy9euw4e147.cloudfront.net/oscms-prodcmis/media/documents/UniversityPhysicsVolume1-LR.pdf>
 9. Dan Martinec D., Herman I, Šebek M. Travelling waves in a multi-agent system with general graph topology. *IFAC-PapersOnLine*. 2015, vol. 48 (22), p. 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.311>.
 10. Martinec D., Herman I., Hurák Z. Šebek, M. (2014). Wave-absorbing vehicular platoon controller. *European Journal of Control*, 20, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2014.06.001>.
 11. Martinec, D., Herman, I., & Šebek, M. The transfer-function approach to travelling waves in path graphs. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.0474>
 12. Simscape Block Libraries. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
 13. Flexible Shaft. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html>.
 14. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Y.O. Modeling of a combined electromagnetic and electromechanical drive of a screen to increase its efficiency. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2025, No. 1 (287), pp. 46-56. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
 15. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko Ya., & Bobrov Ye. Modeling the dynamics of the oversize product of fine wet screening of iron ore. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2025, 7 (293), 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.

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 the wave approach

During the classification of crushed ore by size on a fine wet ore screen, various vibrations are formed in its structure, which propagate in the form of traveling waves. To describe and model the dynamic response of an object in which traveling waves propagate, it is represented as a multi-agent system. This approach is based on a wave transfer function that determines the interactions between agents and the parameters of traveling waves and describes the behavior of the system from the local point of view of its individual elements. Analysis of the obtained simulation results showed that the approach used is well suited for reflecting the general topology of wave processes in the studied structure and its overall behavior. At the same time, the applied model includes the main nodal points of the screen structure but does not reflect the wave process occurring directly on the screen surface. Solving this problem requires the use of a large number of agents with appropriate consideration of their interaction, which is quite difficult with this approach. An alternative approach based on the use of physical modeling blocks based on the Simscape® software package for Simulink®/MATLAB® is considered. The screen cloth is presented as a structure with distributed parameters, implemented for the compliance of the structure to vertical vibrations and bending. The proposed structure consists of elementary Mass-Spring-Damper blocks connected to each other by parallel spring shock absorbers. This structure provides the inertia of the canvas, while the spring damper systems ensure its compliance. The model simulates the dynamic response of the system, oscillating in response to the applied force and bending in response to the static mass imbalance. The advantage of this approach is the possibility of using any number of elementary Mass-Spring-Damper blocks with the ability to form with the necessary accuracy the distribution of both the elastic qualities of the canvas and the mass of the ore material on it. Analysis of the simulation results shows that the proposed approach allows determining, forming, and investigating various modes of ore material movement during screening to achieve optimal technological and energy performance of the process.

Keywords: ore, screening, energy efficiency, simulation, control, automation, characteristics.

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 Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

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

Азарян Альберт Арамаїсович – доктор технічних наук, професор Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), s-gischenko@ukr.net

Грищенко Андрій Миколайович – к.тех.наук, доцент, доцент Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), smgrischenko@gmail.com.

Стаття подана 12.11.2025.