

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

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-195-203>

УДК 622.7: 534

КОМП'ЮТЕРНО ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ПОДРІБНЕНОЇ РУДИ ЗА КРУПНІСТЮ ЇЇ ЧАСТОК

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

COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGY FOR CLASSIFYING CRUSHED ORE BY PARTICLE SIZE

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

Обґрунтована комп'ютерно інтегрована технологія класифікації подрібненої руди за крупністю її часток на основі модельно-прогнозуючого керування грохотом тонкого вологого грохочення рудної пульпи. Доведено, що застосування електромагнітного приводу надає більше можливостей щодо змін параметрів вібрації та, відповідно, покращення результатів процесу просіювання. Результати моделювання показали, що залежність параметрів коливального процесу сита грохота від рудного навантаження на ньому, положення плунжера соленоїда електромагнітного приводу та величини електричного струму є нелінійною. Враховуючи зазначені особливості об'єкта керування та необхідність одночасного маніпулювання множиною змінних з технологічними обмеженнями їх величин, для формування ефективного управління процесом тонкого вологого грохочення руди обрана технологія модельно-прогнозуючого керування (МПК). Такий підхід має дві особливості: використання динамічної моделі керованого процесу для онлайн-прогнозування та застосування процедури оптимізації для пошуку найкращої траєкторії керування в режимі онлайн. Вперше запропонована система модельно-прогнозуючого керування процесом тонкого вологого грохочення рудної пульпи, яка відрізняється від відомих тим, що в якості регульованих змінних використані масові витрати рудної пульпи у живленні грохота та її в'язкість, амплітуда і частота двох електромагнітних приводів коливань сита, а в якості регульованої змінної застосовано параметр ефективності грохочення, для визначення якого використовується процедура інтелектуального розпізнавання на основі непрямих даних. Аналіз результатів моделювання системи модельно-прогнозуючого керування процесом тонкого вологого грохочення руди показує, що застосування запропонованої технології дозволяє підтримувати ефективність грохочення на номінальному заданому значенні в умовах змінних фізико-механічних, хіміко-мінералогічних характеристик руди та стану обладнання, зменшити тривалість перехідних процесів в системі на 25-30% у порівнянні із існуючими локальними системами на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД)

регуляторів і за рахунок цього знизити питоме енергоспоживання процесу на 4-7%.

Ключові слова: руда, класифікація, модель, керування, система, автоматизація, енергоефективність

Вступ. Сучасний етап розвитку гірничо-збагачувальної галузі виробництва характеризується переходом від окремих локальних систем керування до складних інтелектуальних структур [1]. Для процесу тонкого вологого грохочення, який вирізняється високою динамічністю та чутливістю до фізико-хімічних властивостей пульпи, автоматизація є не просто засобом полегшення праці, а критичною умовою забезпечення заданої якості продукту.

В технології збагачення корисних копалин руда розглядається як продукт переробки, характеристики якого (твердість, вологість, гранулометричний склад, вміст металу та ін.) постійно змінюються. Традиційні системи автоматизованого керування процесом, що працюють за принципом зворотного зв'язку, реагують лише після виникнення відхилення. Натомість врахування характеристик вхідної сировини (зокрема варіацій властивостей руди) дає змогу системам класу Advanced Process Control (APC) діяти на випередження. Коли в технологічну лінію надходить руда з підвищеною твердістю, система керування заздалегідь коригує параметри процесу, зменшує швидкість подачі або змінює водний режим, що дозволяє уникнути перевантажень і незапланованих зупинок обладнання. Контроль параметрів руди на вході агрегатів, що виконують класифікацію руди за крупністю, дає змогу стабілізувати гранулометричний склад вихідного матеріалу, що прямо впливає на ефективність вилучення цінного компонента [2].

Авторами роботи [3] надано опис процесу реалізації та оцінки ефективності модельно-прогнозуючого керування (МПК) процесом подрібнення вугілля. Визначено динамічні моделі, які можуть використовуватися в нелінійних симуляціях МПК для досягнення цілей керування технологічним процесом та розрахунку потенційного покращення продуктивності. Даний метод управління використовує динамічну модель для прогнозування майбутніх результатів на основі поточних та минулих вхідних та вихідних даних. Такий підхід дав змогу збільшити потенційну продуктивність фабрики на 5%.

В роботі [4] зазначається, що мехатронні системи, які застосовуються у різних галузях промисловості, характеризуються значною нелінійністю та жорсткими специфікаціями продуктивності, що ще більше посилюються обмеженнями стану та вхідних даних. Модельно-прогнозуюче керування (МПК) у поєднанні з гібридним моделюванням може бути привабливою та системною методологією для вирішення цих складних проблем керування. У цій роботі увага зосереджується на системі пружинних демпферів маси, що приводяться в дію електромагнітом, який є одним з найпоширеніших елементів в технологічних приводах. Представлено дві конструкції, які базуються, відповідно, на лінійному підході МПК у каскаді з нелінійним насиченням, що залежить від стану, та на гібридному підході МПК. Порівнюється продуктивність та складність двох контролерів, що реалізують ці підходи.

В роботі [5] автори доводять, що загальна ефективність підприємства залежить не лише від технічної надійності виробничого устаткування. У теперішній час ключовим завданням стає оптимізація технологічних циклів, спрямованих на досягнення максимальних обсягів випуску продукції з еталонними характеристиками за умови мінімізації витрат. Зазначається, що ефективність технологічної лінії збагачення корисних копалин безпосередньо залежить від стабільної роботи вібраційних грохотів, які є критичною ланкою у забезпеченні продуктивності, безпеки та екологічності виконуваних робіт. Визначальним чинником якісного просіювання продукту переробки є синхронна амплітуда руху кутів грохота: будь-яка асиметрія в їхній траєкторії суттєво знижує пропускну здатність агрегату, а використання систем моніторингу динамічних показників дозволяє візуалізувати роботу обладнання та отримати точні дані для налаштування оптимального режиму просіювання. Запропонований інструментарій забезпечує раннє виявлення забивання поверхонь, що просівають, та накопичення надлишків матеріалу, запобігає критичне механічне навантаження на конструктивні елементи, нераціональне енергоспоживання та загальне падіння виходу готової продукції.

Таким чином, дослідження та впровадження сучасних комп'ютерно інтегрованих технологій у практику збагачення корисних копалин є ключовим

фактором підвищення ефективності процесу підготовки якісної сировини для металургійного переділу.

Метою роботи є обґрунтування комп'ютерно інтегрованої технології класифікації подрібненої руди за крупністю її часток на основі модельно-прогнозуючого керування грохотом тонкого вологого грохочення рудної пульпи.

Викладання основного матеріалу. У роботі [6] досліджені залежності динаміки поверхні вібросити та частинок просіюваної руди використані при моделюванні руху грохота з комбінованим електромагнітним та електромеханічним приводом. Застосування електромагнітного приводу надає більше можливостей щодо змін параметрів вібрації та, відповідно, покращення результатів процесу просіювання. Але для формування ефективного керування процесом необхідним є визначення та врахування особливостей статичних та динамічних характеристик електромагнітного приводу грохота.

Для вирішення цієї задачі доцільно використати можливості розширення Simscape для Simulink®/MATLAB® [7]. На рис. 1 наведена схема моделі електромагнітного приводу грохота із рудним навантаженням.

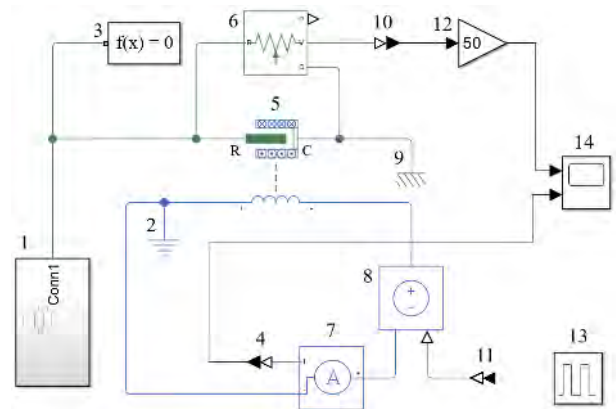


Рис. 1. Схема моделі електромагнітного приводу грохота із рудним навантаженням

В моделі, наведеній на рис. 1, використані наступні елементи: 1 – Subsystem; 2 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Electrical / Connectors & References; 3 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 4, 10 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 5 – блок Solenoid із бібліотеки Simscape / Electrical / Electromechanical / Mechatronic Actuators; 6 – блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 7 – блок Current Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 8 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 9 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 11 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape /

Utilities; 12 - блок Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 13 - блок Pulse Generator із бібліотеки Simulink / Sources; 14 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks.

Блок Electrical Reference являє собою електричне заземлення. Блок Solver Configuration визначає параметри розв'язувача, необхідні для того, щоб розпочати моделювання. Блок PS-Simulink Converter перетворює фізичний сигнал на вихідний сигнал Simulink®.

Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює змінну, вимірювану між двома вузлами механічного поступального руху, на сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. Датчик є ідеальним, оскільки він не враховує інерцію, тертя, затримку, споживання енергії тощо.

Блок Current Sensor являє собою ідеальний датчик струму, тобто пристрій, який перетворює струм, вимірюваний у будь-якій електричній гілці, на фізичний сигнал, пропорційний струму.

Блок Controlled Voltage Source являє собою ідеальне джерело напруги, достатньо потужне для підтримки заданої напруги на своїх клеммах незалежно від струму, що протікає через джерело. Вихідна напруга $U = U_s$, де U_s – це числове значення, що відображається на фізичному сигнальному порту.

Блок Mechanical Translational Reference являє собою опорну точку або каркас для портів механічного поступального керування. Блок Simulink-PS Converter перетворює вхідний сигнал Simulink® на фізичний сигнал. Блок Gain множить вхідне значення на константу (коефіцієнт підсилення).

Блок Pulse Generator генерує прямокутні імпульси через регулярні проміжки часу. Форма сигналу блоку, амплітуда, ширина імпульсу, період і фазова затримка, визначають параметри вихідного сигналу.

Блок Solenoid відображає електричні характеристики та генеровану силу електромагнітного соленоїда. На рис. 2 представлено основні елементи соленоїда.

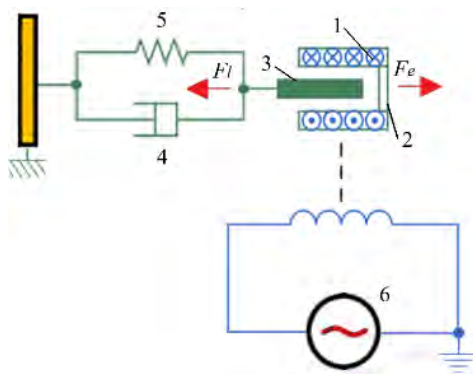


Рис. 2. Основні елементи електромагнітного соленоїда:
1 – обмотка соленоїда; 2 – феромагнітний сердечник;
3 – плунжер; 4 – демпер; 5 – пружина;
6 – електричне джерело живлення

Електричний струм в обмотці соленоїда створює силу, яка тягне плунжер. Це мінімізує опір та зменшує хід x . Щоб збільшити хід x , пружина або зовнішня сила повинні подолати магнітну силу. Електромагнітна сила F_e , що формується соленоїдом визначається виразом

$$F_e = F_l + m\ddot{x} + \lambda\dot{x} + kx, \quad (1)$$

де F_e – електромагнітна сила; F_l – прикладена сила; λ – коефіцієнт в'язкого демпфування; k – пружний коефіцієнт; m – маса плунжера.

Електромагнітна сила F_e пов'язана зі струмом та індуктивністю L соленоїда за формулою

$$F_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x}, \quad (2)$$

Індуктивність електричного контуру соленоїда, можна записати як [8]

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = \frac{-\beta}{(\alpha + \beta x)^2}, \quad (3)$$

де α та β – константи.

Підставляючи рівняння (3) в рівняння (2) для електромагнітної сили, отримуємо залежність величини сили від ходу соленоїда x для струму i_0

$$F_e = \frac{1}{2} i_0^2 \frac{-\beta}{(\alpha + \beta x)^2}. \quad (4)$$

Блок Subsystem симулює навантаження до якоря соленоїда, яке представляє собою сито грохота із певною кількістю рудної пульпи та характеризується відповідною масою, пружними та демпфуючими якостями. Опис моделі цієї конструкції наведено у роботі [9].

Під дією імпульсів з блоку Pulse Generator соленоїд формує коливання сита грохота певної амплітуди і частоти, що призводить до просіювання твердої фракції рудної пульпи, тобто відбувається її розділення за крупністю часток подрібненої руди. Ефективність цього процесу залежить від багатьох факторів: конструктивних характеристик грохота, властивостей рудної пульпи та параметрів коливань (вібрації) сита.

На рис. 3 наведено результати моделювання коливань сита грохота під дією керуючого сигналу, прикладеного до соленоїда, частотою 10 Гц.

Слід зазначити, що внаслідок наявності у навантаженні соленоїда множини елементів з певними інерційними, пружними та демпфуючими якостями, коливальний процес сита грохота не є однорідним і характеризується чисельними гармонійними спотвореннями. Крім того, наведені особливості конструкції сита грохота із рудною пульпою, призводять до формування резонансних явищ, характеристики яких можуть змінюватися в залежності від параметрів пульпопотуку на ситі та його стану.

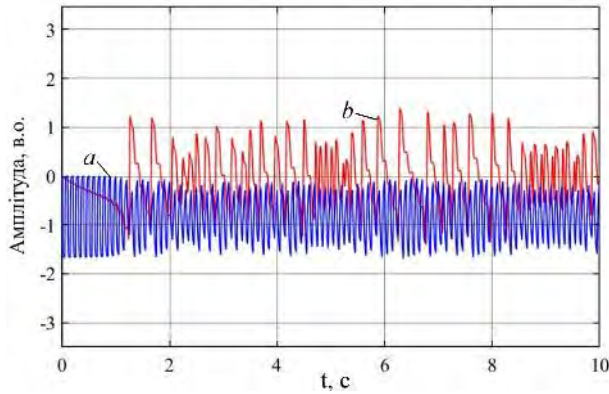


Рис. 3. Зміна параметрів коливань сита грохота під керуючим впливом частотою 10 Гц:

a – електричний струм в обмотці соленоїда, в.о.;

b – швидкість коливань якоря соленоїда із ситом грохота, в.о

Як показують результати моделювання залежність параметрів коливального процесу сита грохота від рудного навантаження на ньому, положення плунжера соленоїда та величини електричного струму (4) є нелінійною. Зокрема, це підтверджує отримана залежність середньоквадратичного значення амплітуди швидкості вібрації сита грохота від його маси з рудним навантаженням (рис. 4).

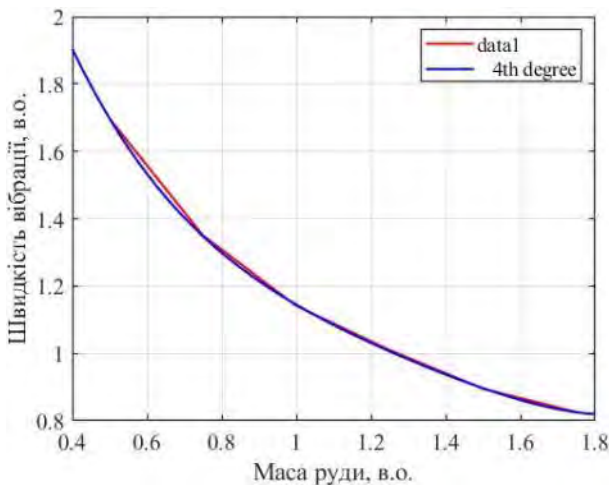


Рис. 4. Залежність середньоквадратичного значення амплітуди вібрації сита грохота від його маси з рудним навантаженням, в.о.

Представлена на рис. 4 залежність апроксимована поліномом 4-го ступеню

$$y = 0.4773x^4 - 2.532x^3 + 5.222x^2 - 5.403x + 3.38, \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9999. \quad (6)$$

Враховуючи зазначені особливості об'єкта керування та необхідність одночасного маніпулювання множиною змінних з технічними обмеженнями їх величин, для формування ефективного управління процесом тонкого вологого

грохочення руди обрана технологія модельно-прогнозуючого керування (МПК).

Такий підхід має дві особливості: а) використання динамічної моделі керованого процесу для онлайн-прогнозування та б) застосування процедури оптимізації для пошуку найкращої траєкторії керування в режимі онлайн [10] - [12]. Коли для прогнозування в МПК використовується нелінійна динамічна модель, загальну задачу нелінійної оптимізації необхідно вирішувати в кожен момент вибірки онлайн.

При реалізації МПК набір поточних та майбутніх значень маніпульованої змінної u обчислюється в кожен момент вибірки, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ [11] - [13]

$$u(k) = [u(k+p|k) \dots u(k+N_u-1|k)]^T. \quad (7)$$

Символ $k+p|k$ стосується майбутнього моменту вибірки $k+p$ та розглядається при поточній вибірці k . Довжина вектора змінних рішень (7) визначається горизонтом керування, позначеним як N_u . Поточна та майбутня траєкторія керування визначається онлайн в результаті процедури оптимізації. Зазвичай мінімізована функція витрат МПК має вигляд

$$J(k) = \sum_{p=1}^N (y^{sp}(k+p|k) - \hat{y}(k+p|k))^2 + \lambda \sum_{p=0}^{N_u-1} (\Delta u(k+p|k))^2. \quad (8)$$

Задане значення керованої змінної y для моменту вибірки $k+p$, відоме у поточний момент k , позначається як $y^{sp}(k+p|k)$. Прогнозоване значення керованої змінної для моменту вибірки $k+p$, розраховане у момент k , є $\hat{y}(k+p|k)$. Отже, перша частина функції витрат МПК вимірює квадратичні помилки керування, передбачені протягом горизонту прогнозування N . Друга частина функції витрат МПК вимірює квадратичні зміни маніпульованої змінної протягом горизонту керування. Це штрафний член з вагою $\lambda > 0$ використовується для мінімізації небажаних різких змін цієї змінної. При цьому зміни визначаються як

$$\Delta u(k+p|k) = u(k+p|k) - u(k+p-1|k). \quad (9)$$

Оптимізація МПК виконується з урахуванням обмежень, що виникають через фізичні обмеження використовуваного обладнання. Класична задача оптимізації МПК визначається таким чином [10]

$$\min\{J(k)\} = \min \left\{ \sum_{p=1}^N (y^{sp}(k+p|k) - \hat{y}(k+p|k))^2 + \lambda \sum_{p=0}^{N_u-1} (\Delta u(k+p|k))^2 \right\}, \quad (10)$$

де $u^{\min} \leq u(k+p|k) \leq u^{\max}$, $p = 0, \dots, N_u - 1$;
 $\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k+p|k) \leq \Delta u^{\max}$, $p = 0, \dots, N_u - 1$;
 $y^{\min} \leq \hat{y}(k+p|k) \leq y^{\max}$, $p = 1$.

У виразі (10) застосовуються обмеження на значення маніпульованих змінних (мінімальне $u^{\min}$ та максимальне $u^{\max}$ значення), на швидкості зміни маніпульованих змінних ($\Delta u^{\min}$ та $\Delta u^{\max}$ - максимальні негативні та максимальні позитивні зміни відповідно) та на прогнозовані значення виходу процесу ($y^{\min}$ та $y^{\max}$ - мінімальні та максимальні величини відповідно).

Після вирішення задачі оптимізації MPC (10) до процесу застосовується перший елемент оптимального вектора (7). Процедура оптимізації повторюється в наступні моменти вибірки.

Для моделювання системи керування, що реалізується виразами (7) - (10) використані можливості платформи Simulink® /MATLAB® та Model Predictive Control Toolbox MATLAB® [14].

У якості маніпульованих змінних у системі використані:

- u_1 - в'язкість рудної пульпи;
- u_2 - масові витрати рудної пульпи у живленні грохота;
- u_3, u_4 - амплітуда і частота коливань, що формуються першим електромагнітним приводом грохота;
- u_5, u_6 - амплітуда і частота коливань, що формуються другим електромагнітним приводом грохота.

Як показано у роботах [15,16] в'язкість рудної пульпи (u_1) визначається вмістом твердої фази, її гранулометричним складом та формою частинок подрібненої руди, що її складають. Тобто цей параметр є інтегруючим показником якісних властивостей рудної пульпи стосовно її руху через сито грохота. Масові витрати рудної пульпи у живленні грохота (u_2) визначають кількісні параметри пульпопотуку. Відповідно до результатів досліджень, наведених у роботі [9], два регульованих привода грохота ($u_3 - u_6$) дозволяють сформувати хвильовий процес сита із характеристиками, необхідними для досягнення цілей керування.

Метою керування є підтримка ефективності грохочення на номінальному заданому значенні, що відповідає сформованій оцінці продуктивності процесу, властивостей руди, стану обладнання та економічній доцільності.

Для розрахунку ефективності просіювання застосовується наступний вираз [17]

$$\eta = \frac{m_{Sp}}{m_{St}} \times 100\%, \quad (11)$$

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

Оскільки вимірювання параметрів m_{Sp} та m_{St} в умовах реального технологічного процесу пов'язано з певними технічними труднощами, для визначення

η використовується процедура інтелектуального розпізнавання на основі непрямих даних.

Модель системи керування грохотом тонкого вологого грохочення руди із застосуванням технології модельно-прогнозуючого керування наведена на рис. 5.

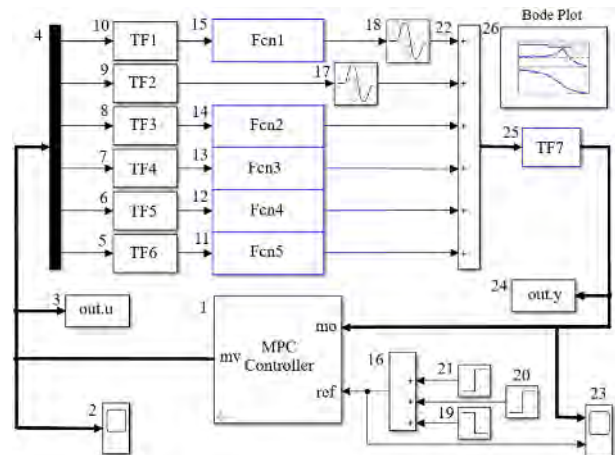


Рис. 5. Схема моделі системи модельно-прогнозуючого керування грохотом тонкого вологого грохочення руди

У наведений на рис. 5 моделі використані наступні блоки: 1- блок MPC Controller із бібліотеки Simulink Model Predictive Control Toolbox TM; 2, 23 - блоки Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 3, 24 - блоки To Workspace виводу інформації у робочу область MATLAB (out.y та out.u) із бібліотеки Simulink / Sinks; 4 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25 - блоки Transfer Fcn із бібліотеки Simulink / Continuous; 11, 12, 13, 14, 15 - блоки Fcn із бібліотеки Simulink / User-Defined Functions; 16, 22 - блоки Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 17, 18 - блоки Transport Delay із бібліотеки Simulink / Continuous; 19, 20, 21 - блоки Step із бібліотеки Simulink / Sources; 26 - блок Bode Plot із бібліотеки Simulink Control Design / Linear Analysis Plots.

Блок Demux отримує компоненти вхідного векторного сигналу та виводить окремі сигнали. Порти вихідних сигналів упорядковані зверху донизу. Блок Sum виконує додавання сигналів на своїх входах. Блок Step забезпечує крок між двома визначеними рівнями у заданий час. Блок Scope відображає сигнали у часовій області.

Блок Bode Plot обчислює лінійну систему з нелінійної моделі Simulink® та будує діаграму Боді лінійної системи під час моделювання. Програмне забезпечення лінеаризує частину моделі між заданими її входами та виходами, а потім будує графік амплітуди та фази лінійної системи.

Блок Transfer Fcn моделює лінійну структуру за допомогою передавальної функції змінної s в області Лапласа. Блок Fcn застосовує заданий математичний вираз до своїх вхідних даних і використовується для моделювання нелінійності у певному контурі

керування. Блок Transport Delay затримує вхідний сигнал на заданий час.

Ланцюжок з послідовно з'єднаних блоків TF1, Fcn1, TD1 (блок 18) симулює динамічну модель контуру регулювання параметру u_1 ; контур регулювання параметру u_2 представлений блоками TF2, TD2 (блок 17); комбінації блоків TF3 з Fcn2, TF4 з Fcn3, TF5 з Fcn4, TF6 з Fcn5 формують динамічні властивості електромагнітного приводу грохота. Блок TF7 симулює характеристики комунікаційної лінії. Наявність блоків TD1 та TD2 обумовлена особливостями просторового розміщення датчиків в'язкості (u_1) та масових витрат пульпи (u_2) у технологічній лінії.

Блок МПК отримує поточний вимірний вихідний сигнал (mo), опорний сигнал (ref) та, при наявності, додатковий вимірний сигнал збурення (md). Модельний прогнозуючий контролер використовує лінійні моделі об'єкта, збурень та шуму для оцінки стану контролера та прогнозування майбутніх вихідних даних об'єкта. Прогнозовані вихідні дані об'єкта застосовуються контролером для визначення оптимальних значень маніпульованих змінних (mv) шляхом розв'язання задачі квадратичного програмування за допомогою стандартного розв'язувача KWIK або спеціального QR розв'язувача [14]. Моделі збурень об'єкту керування і вихідних збурень змінюються таким чином, щоб виміряні виходи передували невимірним виходам.

Блоки Step використовується для генерації ступінчастого сигналу, амплітуда якого змінюється з часом, для вивчення відповідної реакції МПК з урахуванням характеристик моделі об'єкту керування.

Сигнали заданих значень об'єднуються та підключаються до входу «ref» МПК. Виходи mv МПК утворюють входи моделі об'єкту керування. Виходи моделі із врахуванням параметрів комунікаційної лінії повертаються на вхід «mo» контролера МПК. Задані та фактичні значення контрольованих змінних відображаються блоками Scope і експортуються в основну пам'ять MATLAB за допомогою блоків «To Workspace».

Параметрична ідентифікація моделі відбувалась на основі експлуатаційних характеристик фізичної моделі грохота тонкого вологого грохочення руди з урахуванням відповідних обмежень та отриманих експериментальних даних.

Результати виконаного аналізу свідчать про те, що використані в системі п'єзокерамічний датчик в'язкості рудної пульпи [16] та електромагнітний привод грохота мають нелінійні характеристики. Для лінеаризації моделі грохота тонкого вологого грохочення руди використаний інструментарій Simulink Control Design Matlab, який дозволяє лінеаризувати нелінійні системи з неперервним часом. Пакетна лінеаризація для різних значень параметрів моделі та робочих точок виконана із застосуванням функції *linearize* у командному рядку.

Отримана лінеаризована модель має форму простору станів. У неперервному часі рівняння простору станів нелінійної системи мають вигляд [18]

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \quad (12)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t), \quad (13)$$

де $x(t)$ – стани системи; $u(t)$ – вхідні сигнали; $y(t)$ – вихідні сигнали.

Для опису лінеаризованої моделі визначається новий набір змінних станів, входів та виходів, центрованих навколо робочої точки

$$\delta x(t) = x(t) - x_0, \quad (14)$$

$$\delta u(t) = u(t) - u_0, \quad (15)$$

$$\delta y(t) = y(t) - y_0. \quad (16)$$

Вихід системи у робочу точку визначається виразом

$$y(t_0) = g(x_0, u_0, t_0) = y_0. \quad (17)$$

Лінеаризовані рівняння простору станів із застосуванням $\delta x(t)$, $\delta u(t)$, $\delta y(t)$ мають вигляд

$$\delta \dot{x}(t) = A \delta x(t) + B \delta u(t), \quad (18)$$

$$\delta y(t) = C \delta x(t) + D \delta u(t), \quad (19)$$

де A , B , C та D – матриці з постійними коефіцієнтами.

Наведені матриці є якобіанами системи, обчисленими в робочій точці

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{t_0 x_0 u_0}, \quad B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{t_0 x_0 u_0}, \quad C = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{t_0 x_0 u_0}, \quad D = \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_{t_0 x_0 u_0}. \quad (20)$$

Це лінійне, незмінне з часом, наближення нелінійної системи, дійсне в області навколо робочої точки при $t = t_0$, $x(t_0) = x_0$ та $u(t_0) = u_0$. Тобто, якщо значення станів системи $x(t)$ та вхідних даних $u(t)$ достатньо близькі до робочої точки, система поводить себе приблизно лінійно.

Передавальна функція лінеаризованої моделі – це відношення перетворення Лапласа $\delta y(t)$ до перетворення Лапласа $\delta u(t)$

$$P_{lin}(s) = \frac{\delta Y(s)}{\delta U(s)}. \quad (21)$$

На рис. 6 наведена діаграма Боде змодельованої системи керування, яка свідчить про її стійкість.

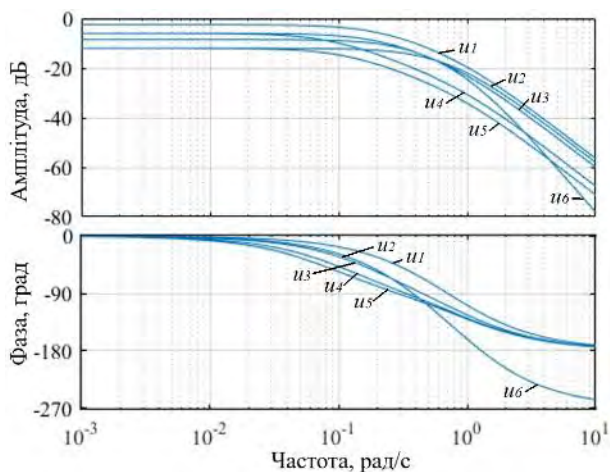
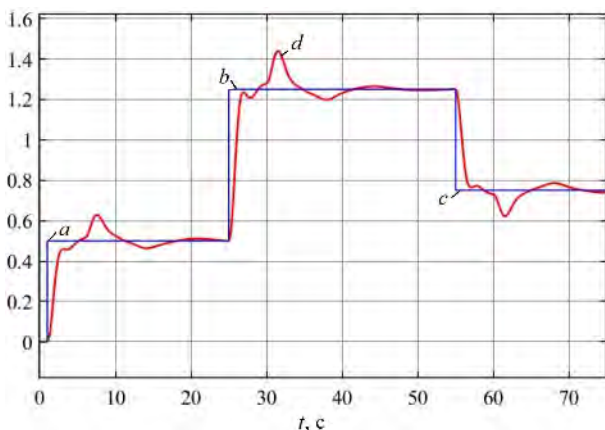
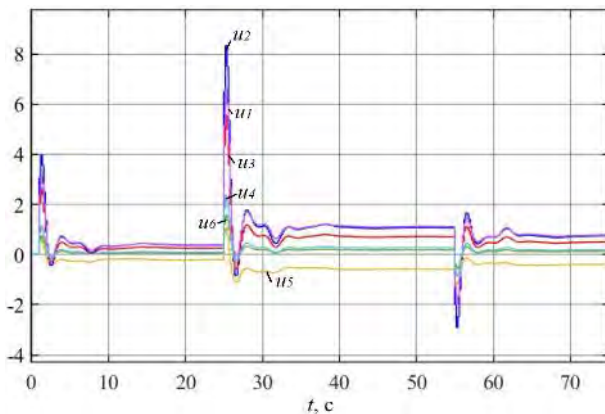


Рис. 6. Діаграма Бодє змодельованої системи керування

На рис. 7 наведено перехідний процес в системі керування під впливом ступінчастих змін заданого значення (ref1, ref2, ref3) керованої змінної в $t = 1, 25, 55$ с. Рис. 8 ілюструє відпрацювання МПК контролером величин маніпульованих змінних $u_1 - u_6$.

Рис. 7. Перехідний процес в системі керування під впливом ступінчастих змін заданого значення (ref1, ref2, ref3) керованої змінної (в.о.) в момент часу $t = 1, 25, 55$ сРис. 8. Відпрацювання МПК контролером величин (в.о.) маніпульованих змінних $u_1 - u_6$ під впливом ступінчастих змін заданого значення (ref1, ref2, ref3) керованої змінної в момент часу $t = 1, 25, 55$ с

Аналіз результатів моделювання системи модельно-прогнозуючого керування процесом тонкого вологого грохочення руди показує, що застосування запропонованої комп'ютерно інтегрованої технології дозволяє підтримувати ефективність грохочення на номінальному заданому значенні в умовах змінних фізико-механічних, хіміко-мінералогічних характеристик руди та стану обладнання, зменшити тривалість перехідних процесів в системі на 25-30% у порівнянні із існуючими локальними системами на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів і за рахунок цього знизити питоме енергоспоживання процесу на 4-7%.

Висновки. Вперше запропонована система модельно-прогнозуючого керування процесом тонкого вологого грохочення рудної пульпи, яка відрізняється від відомих тим, що в якості регульованих змінних використані масові витрати рудної пульпи у живленні грохота та її в'язкість, амплітуда і частота двох електромагнітних приводів коливальних сит, а в якості регульованої змінної застосовано параметр ефективності грохочення, для визначення якого використовується процедура інтелектуального розпізнавання на основі непрямих даних.

Напрямом подальших досліджень є удосконалення системи визначення ефективності процесу тонкого вологого грохочення рудної пульпи із застосуванням інтелектуальної технології розпізнавання шляхом розширення бази непрямих даних, що характеризують процес.

Література

1. Morkun V., Morkun, N., Tron V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation. Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol.7. P. 16–19. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2264/1/Morkun%20V.%20Distributed%20closed-loop%20control%20formation%20for%20technological%20line%20of%20iron%20ore.pdf>
2. Costa P. K., Vaz P. N., Calixto M. F., Torga D. S., Bergerman M. G., Delboni H., Jr. Performance Assessments of an Advanced Control System in an Iron Ore Industrial Grinding Circuit. Minerals. 2025. Vol 15, P. 1172. DOI: <https://doi.org/10.3390/min15111172>.
3. Meyer E.J., Olivier M.C., Matumba L., Craig I.K. Model predictive control simulation, implementation and performance assessment of a coal comminution circuit. Minerals Engineering. 2019. Vol. 144, 106024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106024>.
4. Di Cairano S., Bemporad A., Kolmanovsky I., Hrovat D. Model predictive control of nonlinear mechatronic systems: an application to a magnetically actuated mass spring damper. IFAC Proceedings Volumes. 2006. Vol. 39(5). P. 241-246. DOI: <https://doi.org/10.3182/20060607-3-IT-3902.00044>.
5. Knuth M., Ström C. Process Optimization: Innovative Vibration Monitoring Technology Packs a Punch, SPM Instrument. URL:

- https://extranet.spminstrument.se/Documents/Download/s/SPM%20in%20media/Process%20Optimization_%20Innovative%20Vibration-Monitoring%20Technology%20Packs%20a%20Punch.pdf.
- 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. Вип. 1(287). С. 46-56. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
 - Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
 - Solenoid. <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/solenoid.html>.
 - 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. Вип. 10 (296). С. 33-42. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>.
 - Ławryńczuk M. Input convex neural networks in nonlinear predictive control: A multi-model approach. *Neurocomputing*. 2022. Vol. 513(7). P. 273-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.108>.
 - Maciejowski J.M. *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, Harlow. 2002. P. 331. ISBN 0201398230, 9780201398236.
 - Tatjewski P. *Advanced control of industrial processes, structures and algorithms*. Springer, London. Springer Science & Business Media. 2007. P. 332. ISBN 1846286352, 9781846286353.
 - Camacho E.F., Bordons C. *Model Predictive Control*. Springer, London. 1999. P. 300. ISBN 3-540-76241-8.
 - Model Predictive Control Toolbox. Design and simulate model predictive controllers. URL: <https://se.mathworks.com/products/model-predictive-control.html>.
 - Paar A. The influence of particles on suspension rheology. URL: <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>.
 - Моркун В.С., Моркун Н.В., Поркуян О.В., Грищенко Я.О. Визначення впливу властивостей рудної пульпи на параметри п'єзокерамічного перетворювача. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2026. Вип. 2(300), С. 61-69. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-61-69>.
 - Chen B., Yan J., Mo W., Xu C., Zhang L., Tamma K.K. DEM simulation and experimental study on the screening process of elliptical vibration mechanical systems. *Journal of vibroengineering*. 2019. Vol. 21(8). DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2019.19993>.
 - Exact Linearization Algorithm. URL: <https://se.mathworks.com/help/slcontrol/ug/exact-linearization-algorithm.html>.
 - https://extranet.spminstrument.se/Documents/Download/s/SPM%20in%20media/Process%20Optimization_%20Innovative%20Vibration-Monitoring%20Technology%20Packs%20a%20Punch.pdf.
 - Costa P. K., Vaz P. N., Calixto M. F., Torga D. S., Bergerman M. G., Delboni H., Jr. Performance Assessments of an Advanced Control System in an Iron Ore Industrial Grinding Circuit. *Minerals*. 2025. Vol 15. P. 1172. DOI: <https://doi.org/10.3390/min15111172>.
 - Meyer E. J., Olivier M.C., Matumba L., Craig I.K. Model predictive control simulation, implementation and performance assessment of a coal comminution circuit. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 144, 106024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106024>.
 - Di Cairano S., Bemporad A., Kolmanovsky I., Hrovat D. Model predictive control of nonlinear mechatronic systems: an application to a magnetically actuated mass spring damper. *IFAC Proceedings Volumes*. 2006. Vol. 39(5). P. 241-246. DOI: <https://doi.org/10.3182/20060607-3-IT-3902.00044>.
 - Knuth M., Ström C. *Process Optimization: Innovative Vibration Monitoring Technology Packs a Punch*, SPM Instrument. URL: https://extranet.spminstrument.se/Documents/Download/s/SPM%20in%20media/Process%20Optimization_%20Innovative%20Vibration-Monitoring%20Technology%20Packs%20a%20Punch.pdf.
 - Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Ya.O. Modeliuvannia kombinovanoho elektromahnitnoho ta elektromekhanichnoho pryvodu hrokhota dla pidvyshchennia yoho efektyvnosti. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 2025. Vyp.1(287). S. 46-56. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
 - Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
 - Solenoid. <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/solenoid.html>.
 - Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Ya.O., Azarian A.A., Hrytsenko A.M. Modeliuvannia avtomatyzovanoho keruvannia ob'ektyamy hirnycchoho vyrobnytstva na osnovi khvylovoho pidkhodu. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 2025. Vyp. 10 (296). S. 33-42. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>.
 - Ławryńczuk M. Input convex neural networks in nonlinear predictive control: A multi-model approach. *Neurocomputing*. 2022. Vol. 513(7). P. 273-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.108>.
 - Maciejowski J.M. *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, Harlow. (2002). P.331. ISBN 0201398230, 9780201398236.
 - Tatjewski P. *Advanced control of industrial processes, structures and algorithms*. Springer, London. Springer Science & Business Media. 2007. P. 332. ISBN 1846286352, 9781846286353.
 - Camacho E.F., Bordons C. (1999). *Model Predictive Control*. Springer, London. P. 300. ISBN 3-540-76241-8.
 - Model Predictive Control Toolbox. Design and simulate model predictive controllers. URL: <https://se.mathworks.com/products/model-predictive-control.html>.
 - Paar A. *The influence of particles on suspension rheology*. URL: <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>.

References

- Morkun V., Morkun, N., Tron V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol.7. P. 16–19. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2264/1/>

16. Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuian O.V., Hryshchenko Ya.O. Vyznachennia vplyvu vlastyvostei rudnoi pulpy na parametry piezokeramichnoho peretvoriuvacha. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2026. Vyp. 2(300). С. 61-69. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-61-69>.
17. Chen B., Yan J., Mo W., Xu C., Zhang L., Tamma K.K. DEM simulation and experimental study on the screening process of elliptical vibration mechanical systems. *Journal of vibroengineering*. 2019. Vol. 21(8). DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2019.19993>
18. Exact Linearization Algorithm. URL: <https://se.mathworks.com/help/slcontrol/ug/exact-linearization-algorithm.html>

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O.
Computer-integrated technology for classifying crushed ore by particle size

A computer-based integrated technology for classifying crushed ore by particle size has been developed, based on model-predictive control of a fine wet screening screen for ore pulp. It has been demonstrated that the use of an electromagnetic drive offers greater flexibility in adjusting vibration parameters and, consequently, improves the results of the screening process. Simulation results showed that the relationship between the vibration parameters of the screen and the ore load on it, the position of the solenoid plunger of the electromagnetic drive, and the magnitude of the electric current is nonlinear. Taking into account these characteristics of the controlled system and the need to simultaneously manipulate a set of variables subject to technological constraints on their values, model-predictive control (MPC) was selected to establish effective control of the fine wet screening process of ore. This approach has two distinctive features: the use of a dynamic model of the controlled process for online prediction and the application of an optimization procedure to find the optimal control trajectory in real time. For the first time, a model-based predictive control system for the fine wet screening process of ore slurry has been proposed, which differs from existing systems in that the mass flow rate of the ore slurry at the screen feed and its viscosity are used as controlled variables, the amplitude and frequency of the two electromagnetic drives of the screen vibrations, and the

screening efficiency parameter is used as the controlled variable, which is determined using an intelligent recognition procedure based on indirect data. Analysis of the results of modeling the model-predictive control system for the fine wet screening of ore shows that the application of the proposed technology allows maintaining screening efficiency at a nominal set value under conditions of varying physical-mechanical and chemical-mineralogical characteristics of the ore and equipment condition, reducing the duration of transient processes in the system by 25–30% compared to existing local systems based on proportional-integral-derivative (PID) controllers, and thereby reducing the specific energy consumption of the process by 4–7%.

Keywords: ore, classification, model, control, system, automation, energy efficiency.

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

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

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

Дата першого надходження статті 22.06.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 26.08.2026.

Дата публікації 30.09.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)