

ності і руху штоків циліндрів в їхніх кінцевих положеннях, для поліпшення якості параметрів характеристик при PWM - регулюванні. При цьому знижується вплив ударів штоків об циліндр та відповідно збільшується їхній життєвий цикл.

Для подальших досліджень у цій темі можлива, наприклад, розробка і розрахунок алгоритмів керування при змінному моменту інерції об'єкту, наприклад, розчину цементу тощо. Це дозволило би покращити якості розчину, та збільшити життєвий цикл роботи циліндрів.

Список літератури

1. **Е.В. Полилов, А.М. Батрак, Е.С. Руднев, С.П. Скорик, П.В. Горелов** Донбасский государственный технический университет. Исследовательский стенд для апробации алгоритмов управления сложными электромеханическими системами. 2011 -7с.: веб-сайт. URL: https://www.researchgate.net/publication/305334006_ISSLEDOVATELSKIJ_STEND_DLA_APROBACII_ALGORITMOV_UPRAVLENIA_SLOZNYMI_ELEKTROMECHANICESKIMI_SISTEMAMI.
2. **Орловський І. А., КратО. І., Зав'язун П. П., Бірюков Ю. С.** Лабораторний стенд керування маніпулятором М10П від Scada-системи TraceMode. Електротехніка та електроенергетика. 2013. № 2. – С 54-61.
3. **Dr. Maged Mikhail, Prof. Gregory P. Neff.** A Non-Commercial Pneumatic Trainer with PLC Control. ASEE's 123rd Annual Conference & Exposition. New Orleans , LA June 26-29, 2016. PaperID#17334, pp. 1-7.
4. **Лимонов Г.Е., Борвинкова О Н, Смирнова Л.В.** Вибрационная техника и технология в мясной промышленности. -М.: Агропромиздат, 1989.-231с.
5. **Прокопов М. Г.** Конструкции элементов пневмоагрегатов : учебное пособие / М. Г. Прокопов, С. М. Ванеев, В. Н. Козин. – Сумы : Сумский государственный университет, 2015. – 148 с.
6. **Омельченко В. О., Санніков В. Г.** Теорія електричного зв'язку. Під ред. **В. О. Омельченка**. – К.: ІСДО, 1997 – Ч.3.
7. **Слепов Н. Н., Дроздов Б. В.** Широотно- імпульсна модуляція: Під ред. **А. А. Булгакова**. – М.: Енергія, 1978. – 192 с.
8. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 кн. Кн. 2. Приводы робототехнических систем / **Ж.П. Ахромеев, Н.Д. Дмитриева, В.М. Лохин** и др.; Под ред. **И.М. Макарова**. – М.: Высш. шк., 1986. – 175 с.
9. Системы управления промышленными роботами и манипуляторами / **Е.И. Юревич, Ю.Д. Андрианов, С.И. Новаченко** и др. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 184 с.
10. Festo Didactic SE. Fluid power: Book. Esslingen : 2019. P. 172. URL: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/468166/56823_2019-11_en_PG_P-H_Screen.pdf (Last accessed:01.12.2021).
11. Festo Didactic SE. Factory Automation: Book. Esslingen : 2021. P. 256. URL: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/468161/PG-FA_en_2021-02_56826_Screen.pdf (Last accessed:01.12.2021).
12. Festo Didactic GmbH & Co. KG. Учебные системы 2012: підручник. Esslingen: 2011. 420 с. URL: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/53887/didactic_katalog_2012_RU.pdf (дата звернення: 01.12.2021).
13. **Haring W., Metzger M., Weber R.-C.** Festo Didactic Workbook TP 202 : підручник. Denkendorf: 2015. P. 48. URL: https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/541091_leseprobe_en_2.pdf (Last accessed: 01.12.2021).

Рукопис подано до редакції 28.10.2022

УДК 622.73:681.516.7

І. А. МАРИНИЧ, канд. техн. наук, доц., **О. Ю. СЕРДЮК**, канд. техн. наук, ст. викл.
Криворізький національний університет

СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОДРІБНЮЮЧИМ АГРЕГАТОМ НА БАЗІ НЕЧІТКІЇ ЛОГІКИ

Мета. Метою даної роботи є підвищення продуктивності подрібнювального агрегату залізних руд та якості подрібненого вихідного продукту, шляхом удосконалення автоматизованої системи керування стабілізацією транспортування матеріалу всередині кульового млина з використанням нечіткої логіки.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії автоматичного керування та теорії ідентифікації систем для вибору і обґрунтування структури математичної моделі об'єкту керування, методи імітаційного і комп'ютерного моделювання для тестування розробленої системи на ЕОМ.

Наукова новизна. Отримав подальший розвиток метод керування процесами подрібнення сировини шляхом застосування правил нечіткої логіки та можливість представлення моделі за допомогою бібліотек *SimHydraulics*, *SimMechanics* та *SimDriveline* середовища *Matlab&Simulink*, яка дозволяє об'єднувати у моделі фізичні об'єкти з передаточними функціями для більш реального відображення синтезуємої системи.

Практична значимість. Теоретичні дослідження та комп'ютерне моделювання довели потенціально можливістю застосування інтелектуальних підходів щодо ідентифікації, керування та оптимізації технологічних процесів збагачення. У першу чергу це стосується сучасних напрямів розвитку штучного інтелекту: нечіткої логіки, тому що регулювання процесу подрібнення вимагає не тільки безперервного регулювання, а й логічного управління, яке при

необхідності може змінювати стратегію регулювання. Отже, отримані результати можуть бути застосовані при розробці автоматизованих систем управління, які використовують інтелектуальні методи ідентифікації та синтезу.

Результати. Досліджено залежність показників руди від значення води, а саме те, що особливістю роботи барабанного млина є те, що подрібнення руди відбувається в рідкому середовищі, яке є складовою частиною готового продукту - рудної пульпи. Кінцевим продуктом барабанного млина є пульпа із заданим співвідношенням руда-вода, що дозволяє забезпечити можливість поділу її при гравітаційному і магнітному впливі на рудну і нерудну складові. При цьому вода є транспортуєчим засобом для виведення готової фракції для подальшої переробки. Тобто, технологічний цикл подрібнення ґрунтується на встановленні оптимального співвідношення руда-вода стосовно конкретних фізико-механічних властивостей, руди, що переробляється. На основі отриманих математичних моделей було виконано комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування на базі класичних регуляторів та на базі нечіткої логіки. Аналіз результатів моделювання запропонованої системи показує, що функція належності забезпечує постійну подачу води в млин з урахуванням обсягу руди, що завантажується, в оптимальному обсязі, достатньому для утворення пульпи, необхідної щільності. Отже можна зробити висновок про адекватність результатів моделювання.

Ключові слова: автоматизація, класифікатор, кульовий млин, моделювання, нечітка логіка, подрібнення.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-98-105

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Виходячи з того, що основною задачею будь-якого рішення автоматизації процесу збагачення є отримання концентрату з найвищими показниками якості, такими як вміст корисного компоненту, зменшення хвостів та шкідливих домішок для більш ефективного використання на подальших стадіях переділу[1]. Не зважаючи на досить велике різноманіття технологічних схем, що використовуються при збагаченні, практично на всіх гірничо-збагачувальних комбінатах використовуються попередні стадії підготовки сировини, такі як дроблення та подрібнення. Навіть розглядаючи схожі процеси для інших корисних копалин можна дійти висновку, що всі ці операції характеризуються такими схожими властивостями, як нестационарність та багатозв'язність. [2]. Також можна сюди віднести і те, що усі ці процеси нелінійні. Відповідно вирішення задач підвищення ефективності систем керування процесами дроблення-подрібнення, які розглядаються як взаємопов'язані процеси, дозволить перенести такі рішення або застосовувати ці підходи при вирішенні аналогічних задач збагачувального виробництва.

Аналіз процесів дроблення та подрібнення показує, що за енерговитратністю процеси подрібнення значно переважають процеси дроблення, тому більшість існуючих рішень стосується саме автоматизації стадій подрібнення, тому що саме вони забезпечують вхідний потік рудної сировини на подальші стадії збагачення. Але навіть такі досить прості завдання, як підтримання внутрімлинового навантаження досить часто не дозволяє отримати бажані результати, а це в свою чергу впливає на оптимальну роботу усієї технологічної лінії.

Аналіз досліджень та публікацій. Процеси подрібнення є, з одного боку, визначальними щодо якості кінцевого продукту при збагаченні залізних руд, а з іншого боку, найбільш енергозатратними. Тому проблема підвищення ефективності та оптимізації цих процесів викликає інтерес багатьох дослідників. Одним із шляхів вирішення цих проблем є удосконалення автоматизованого керування процесами подрібнення. На сьогоднішній день розроблена значна кількість різних моделей, алгоритмів, методів і схем для побудови автоматизованих систем. Значний внесок у вирішення науково-технічних завдань керування процесами збагачення залізних руд внесли такі вітчизняні та закордонні вчені як: О. М. Марюта, В. С. Моркун, В. М. Чермалих, В. С. Процуто, Л. Лінч та ін. [2-7]. Ними були представлені основні підходи при проектуванні таких систем, розглянуті процеси збагачення, подрібнення, дроблення у вигляді об'єктів керування, визначені усі впливи (керуючі, збуджуючі) діючі на них, представлені залежності та властивості характеристик у статичних та динамічних режимах роботи, визначені співвідношення різних стадій гірничо-збагачувального комплексу та інші показники та залежності, що використовуються для автоматизації таких процесів.

Так в роботі [6] пропонується система екстремального регулювання циклу подрібнення на границі області стійкості. Система підтримує максимальну продуктивність млина за рахунок зміни подачі руди в млин з урахуванням фізико-механічних властивостей руди та її гранулометричного складу.

Відома автоматизована система управління процесом збагачення руди, яку описано у статті [8]. Ця система керування містить у своєму складі експертну систему, що складається з електронної обчислювальної машини та програми, яка призначена для накопичення масиву статистичних даних про об'єми та якість продуктів збагачення з наступним прогнозуванням режимів

роботи замкнутої системи млин-спіральний класифікатор. Недоліком цієї системи керування є те, що вона існує тільки у вигляді комп'ютерної програми і всі дані про 10 технологічних параметрів продуктів збагачення треба вводити вручну, що призводить до неможливості управління процесом помелу у реальному масштабі часу.

Проведений аналіз попередніх робіт та схеми керування запропонованої у роботі [9] підтверджує, що розробка нових методів та підходів при вирішенні задач автоматизації процесів в яких інформацію про показники роботи отримати неможливо або досить складно використання нечітких підходів є досить актуальним. А основною метою автоматизації цих процесів є не тільки оптимізація технологічних параметрів, а також досягнення економічного ефекту у вигляді максимізації прибутку з одночасною мінімізацією витрат.

Постановка задачі. Завданням даної роботи є синтез системи автоматичного керування з метою підвищення якості подрібненого вихідного продукту, шляхом удосконалення автоматизованої системи керування стабілізацією транспортування матеріалу всередині кульового млина з використанням нечіткої логіки та представлення моделі за допомогою бібліотек *Simulink*, *SimHydraulics*, *SimMechanics* та *SimDrivelin* середовища *Matlab&Simulink*, яка дозволяє об'єднувати фізичні об'єкти з передаточними функціями для більш реального відображення синтезуємої системи.

Викладення матеріалу та результати. Розкриття мінералу в процесі подрібнення залежить від співвідношення «рідке - тверде» в млині. Це співвідношення не є константою, воно залежить від властивостей руди [10]. Для гірських порід через складність їх структури, неоднорідності структури і щільності, наявності дефектів і інших чинників автоматичне вимірювання параметрів руд, що характеризують їх фізико-механічні властивості, ускладнене або неможливе.

Але можливе врахування обсягу вхідної руди з добувних ділянок або проміжних складів усереднення в прийомні бункера комплексу збагачення. Тому, при врахуванні транспортних затримок і перемішування можливе отримання непрямих даних про фізико-механічні властивості усередненої руди, що подається на подрібнення. Як наслідок, стає можливим створення систем оптимального управління процесом подрібнення. В роботі як типовий процес в якості предмета дослідження обрано процес подрібнення промпродукту в кульових млинах по параметру співвідношення «руда-вода» в залежності від складу вхідної сировини.

При математичному описі елементів системи були отримані математичні моделі кульового млина та класифікатора у операторній формі по різних каналах:

Математична модель млина по каналу «продуктивність - вихід твердого в розвантаженні»

$$\frac{1}{k} \cdot s \cdot \Delta q_{вих.м}(s) = \Delta Q(s) - \Delta q_{вих.м}(s),$$

де Q – продуктивність млина по вихідній руді; $q_{вих.м}$ – вихід твердого в розвантаженні млина; k – коефіцієнт, що визначає витратні характеристики розвантажувальної цапфи.

Математична модель млина по каналу «продуктивність - вихід крупних класів в розвантаженні»

$$\frac{1}{k_{кр} + k_2} \cdot s \cdot \Delta q_{вих.кр}(s) + \Delta q_{вих.кр}(s) = \frac{\alpha_{кр} k_2}{k_{кр} + k_2} \Delta Q(s),$$

де k_2 – коефіцієнт, який визначається гідравлічними процесами в барабані млина; $\alpha_{кр}$ – відносний вміст цього класу в вихідній руді; $k_{кр}$ – відносна швидкість подрібнення класу; $q_{вих.кр}$ – вихід класу в розвантаженні млина.

Математична модель класифікатора по каналу «витрата води в класифікатор – об'ємна витрата зливу»

$$\frac{1}{k_{зл}} \cdot s \cdot \Delta q_{зл}(s) + \Delta \rho_{зл}(s) = \Delta q_{вх.в}(s),$$

де $\Delta q_{вх.в}$ – об'ємні витрати води з пульпою; $\Delta q_{зл}$ – об'ємні витрати пульпи зі зливом; $k_{зл}$ – коефіцієнт, що зв'язує витрата пульпи через зливний поріг класифікатора з об'ємом пульпи в кориті класифікатора, який визначається гідравлічними властивостями класифікатора

Математична модель класифікуючого апарату по каналу «витрата води - щільність зливу»

$$V \cdot \frac{d\Delta\rho_n}{dt} = \Delta Q_{под} + \Delta Q_в - \Delta Q_{ніск} - \Delta Q_{зл},$$

де V – об’єм пульпи в класифікуючому апараті, $V=const$; ΔQ_{nod} – приріст витрат подрібненого матеріалу; ΔQ_{nick} – приріст витрат пісків класифікатора; ΔQ_{zl} – приріст витрат готового продукту в злив класифікатора; ΔQ_e – приріст витрат води в процес класифікації; ρ_n – щільність пульпи в класифікуючому апараті.

З урахуванням того, що

$$\Delta Q_{nick} = 0, \quad \Delta Q_{nod} = 0, \quad \Delta Q_{zl} = k_2 \cdot \Delta \rho_{zl}, \quad \Delta \rho_{zl} = k_1 \cdot \Delta \rho_n.$$

остаточно отримаємо

$$\frac{V}{k_1 k_2} s \cdot \Delta \rho_{zl}(s) + \Delta \rho_{zl}(s) = \frac{1}{k_2} \Delta Q_e(s).$$

На основі наведених математичних моделей були отримані передаточні функції для моделювання у середовищі *Matlab&Simulink* з застосуванням бібліотек *Simulink*, *SimHydraulics*, *SimMechanics* та *SimDriveline*, що дозволяє об’єднувати у моделі фізичні об’єкти з передаточними функціями для більш реального відображення моделі. Так наприклад на рисунках 1, 2 наведено такі моделі, що є складовими загальної моделі системи.

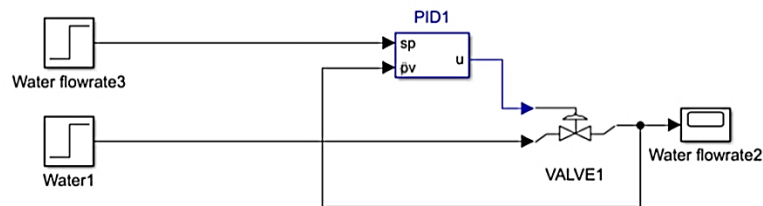


Рис. 1. Модель системи керування виконуючим пристроєм подачі води в злив класифікатора з ПІД-регулятором

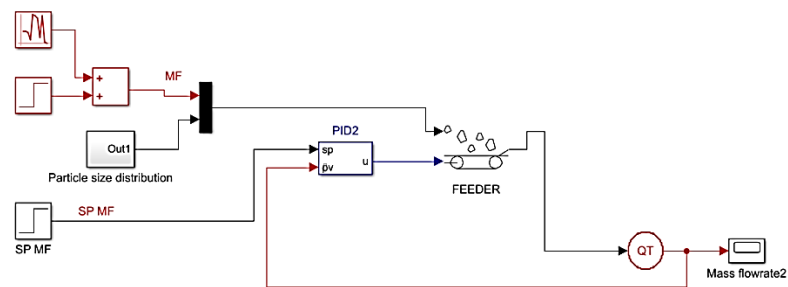


Рис. 2. Модель системи керування живильника подачі дробленої руди в млин з ПІД-регулятором

Модель системи автоматичного керування кульового млина в замкнутому циклі подрібнення з класифікатором та виконуючими пристроями його завантаження представлена на рис. 3. Модель побудована з використанням класичних ПІД регуляторів для керування відповідними параметрами. Налаштування регуляторів виконуються класичним способом на основі параметрів моделі об’єкта керування.

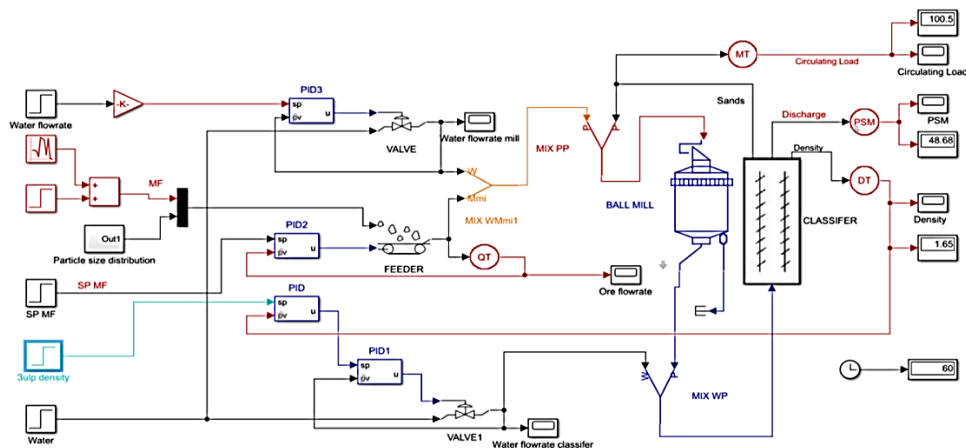


Рис. 3. Модель САК кульового млина в замкнутому циклі подрібнення з класифікатором та виконуючими пристроями його завантаження

Результати моделювання представлені на наступних графіках (рис. 4, 5).

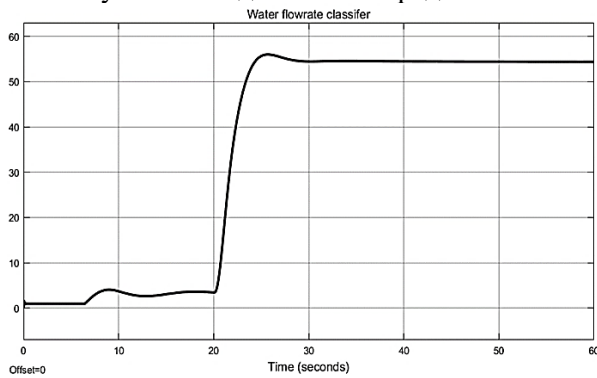


Рис. 4. Витрати води в злив класифікатора

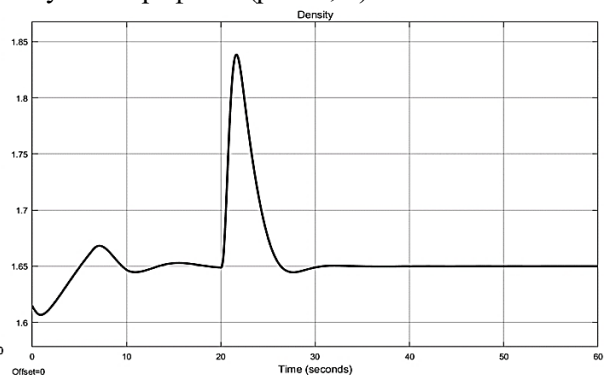


Рис. 5. Щільність пульпи в зливі класифікатора

На рис. 6 представлений графік циркуляційного навантаження (масові витрати твердого в пульпі, що надходять в млин з класифікатора («піски»)). Усталене значення становить близько 100%, а на рис.7 представлений графік масової частки (у відсотках) твердого готового класу, що надходить на збагачення (вихідний продукт). Усталене значення становить близько 48%.

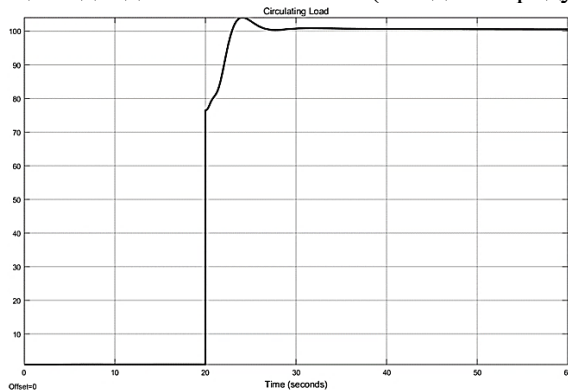


Рис. 6. Циркуляційне навантаження

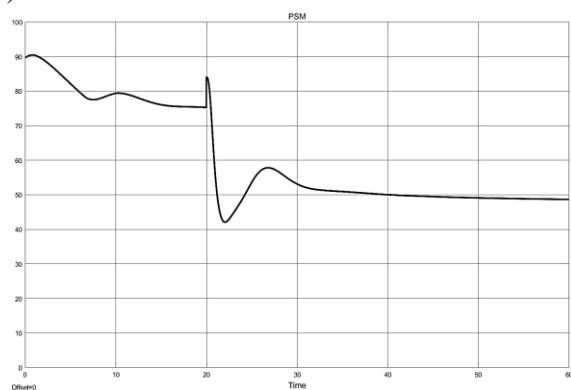


Рис. 7. Масова частка твердого готового класу

Тепер отримаємо модель цієї самої системи на базі нечіткої логіки та порівняємо результати.

Fuzzy Logic Toolbox – це пакет прикладних програм, що входять до складу середовища *MatLab*. Він дозволяє створювати системи нечіткого логічного виведення і нечіткої класифікації в рамках середовища *MatLab* з можливістю їх інтеграції в *Simulink*. Алгоритми нечіткого виведення різняться, головним чином, видом використовуваних правил, логічних операцій і різновидом методу дефазифікації. Розроблені моделі нечіткого виведення Мамдані, Сугено, Ларсена, Цукамото [11, 12]. Для реалізації системи з набором правил у базі даних системи використовуємо саме алгоритм Мамдані.

На підставі досліджених даних необхідні множини лінгвістичних змінних та відповідних термів для параметрів, що входять до нечітких множин із відповідними значеннями функції належності для кожного елементу, визначають у такий спосіб: залежність значень функції належності забезпечує постійну подачу води в млин з урахуванням обсягу руди, що завантажуються, в оптимальному обсязі, достатньому для утворення пульпи.

Логічне виведення здійснюється на підставі нечіткого алгоритму, базу знань якого сформовано у вигляді правил утворення пульпи, достатньої щільності для правильного протікання технологічного процесу, тобто співвідношення руда-вода повинно бути в межах 25-30% від кількості твердої фази, при цьому вода є транспортуючим засобом для виведення готової фракції для подальшої переробки. При зменшенні кількості подачі води пульпа в млині стає менш рухомою, що негативно позначається на продуктивності млина. Зі збільшенням розрідження пульпи в млинах зменшується продуктивна щільність продукту, що призводить до зниження ефективності подрібнення і збільшення кількості матеріалу, який повертається апаратами класифікації на повторне подрібнення.

Логічні правила мають наступний вигляд:

якщо співвідношення руда/вода в межах 70:30 при максимальних значеннях подачі в млин твердої та рідкої фази, то щільність пульпи на виході є оптимальною;
 якщо співвідношення руда/вода в межах 70:30 при мінімальних значеннях подачі в млин твердої та рідкої фази, то щільність пульпи на виході є оптимальною;
 якщо співвідношення руда/вода в межах 70:30 при середніх значеннях подачі в млин твердої та рідкої фази, то щільність пульпи на виході є оптимальною;
 якщо руди подано в млин мінімальну кількість, а води – максимальну, то необхідно підсилити подачу води в млин або послабити подачу руди;
 якщо руди подано в млин максимальну кількість, а води – оптимальну, то необхідно послабити подачу руди в млин або посилити подачу води;
 якщо одного з параметрів не має, автоматично посилюємо його подачу для врегулювання співвідношення руда/вода в межах 70/30.

У *Fuzzy Logic* – редакторі створено нечітку систему (рис.8), що має дві вхідні змінні, а саме: витрата води (назва змінної в редакторі *water*) та витрата руди (назва змінної – *ore*). Вихідна змінна – це вихід, що генерує система на базі нечітких правил. Для даної системи вихідна змінна – це співвідношення руда/вода, що впливає на якість пульпи (назва – *plotnost-pulpy*).

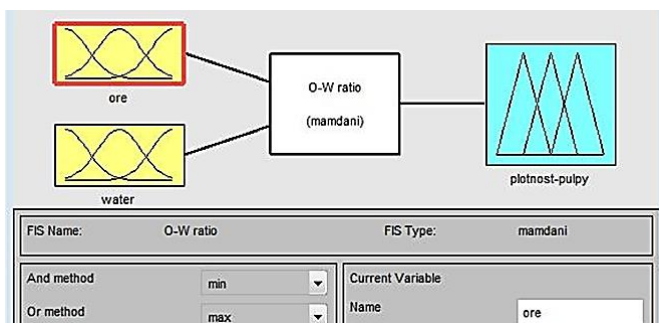


Рис. 8. Нечітка система, що керує співвідношенням руда/вода, для підтримання щільності пульпи на необхідному рівні

Для вхідної змінної *water* необхідно реалізувати три терми: недостатня кількість (*min*), оптимальна (*norm*), перевищення норми (*max*). Діапазон для витрати води вимірюємо у відсотках [0; 100]. В редакторі задано відповідні значення для термів вхідної змінної *water* таким чином:

min [0 10 20], *norm* [27 30 35], *max* [32 65 100]. Для вхідної змінної *ore* необхідно реалізувати три терми: недостатня кількість (*min*), оптимальна (*norm*), перевищення норми (*max*). Діапазон для витрати руди вимірюємо у відсотках [0; 100]. В редакторі задано відповідні значення для термів вхідної змінної *ore* таким чином: *min* [0 35 63], *norm* [60 70 80], *max* [75 85 100]. Вихідна змінна *plotnost-pulpy* характеризує, наскільки необхідно відрегулювати співвідношення руда/вода, що впливає на якість пульпи, тобто підвищити чи знизити подачу води або руди в млин

Модель системи автоматичного керування кульовим млином з нечітким регулятором співвідношення «руда-вода» представлена на рис. 9.

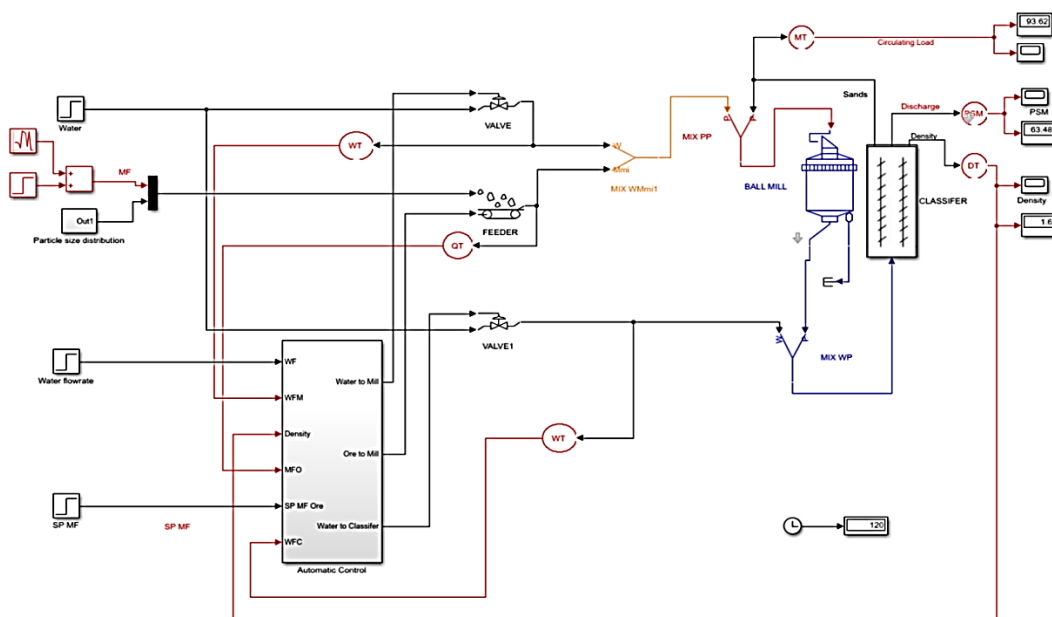


Рис. 9. Модель САК кульовим млином з нечітким регулятором співвідношення «руда-вода»

Позначення вхідних та вихідних параметрів пристрою автоматичного керування кульовим млином з нечітким регулятором співвідношення «руда-вода» на схемі моделі *Automatic Control*: *WF* – завдання регулювання подачі води в млин; *WFM* – сигнал з датчика витрат води в млин; *Density* – сигнал з щільноміра в зливні класифікатора; *MFO* – сигнал з конвеєрних ваг, що вимірюють витрати руди в млин; *SP MF Ore* – завдання на регулювання подачі руди живильником в млин; *WFC* – сигнал з датчика витрат води в зливні класифікатора; *Water to Mill* – вихід на виконуючий пристрій регулювання подачі води в млин; *Ore to Mill* – вихід на стрічковий живильник подачі руди в млин; *Water to Classifier* – вихід на виконуючий пристрій регулювання подачі води в зливні класифікатора.

Результати моделювання представлені на відповідних графіках (рис. 10-12).

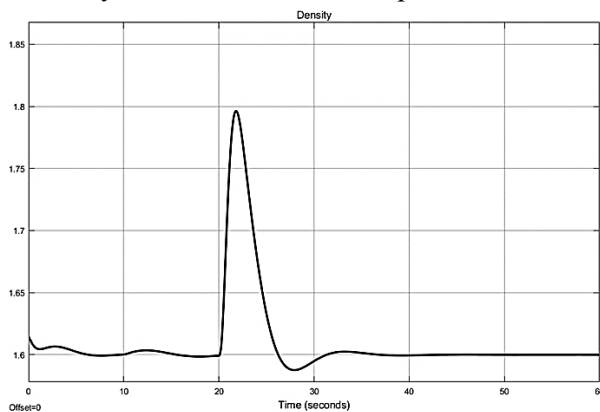


Рис. 10. Щільність пульпи в зливні класифікатора

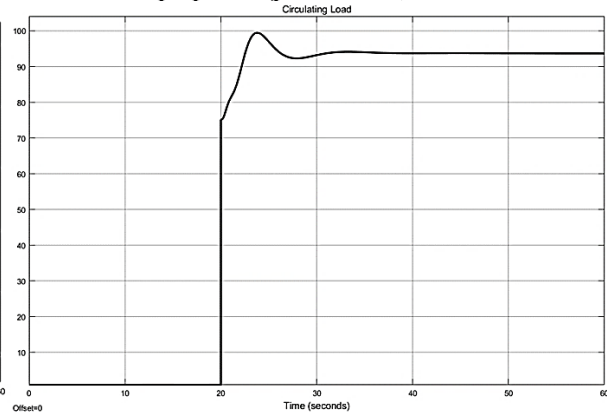


Рис. 11. Циркуляційне навантаження

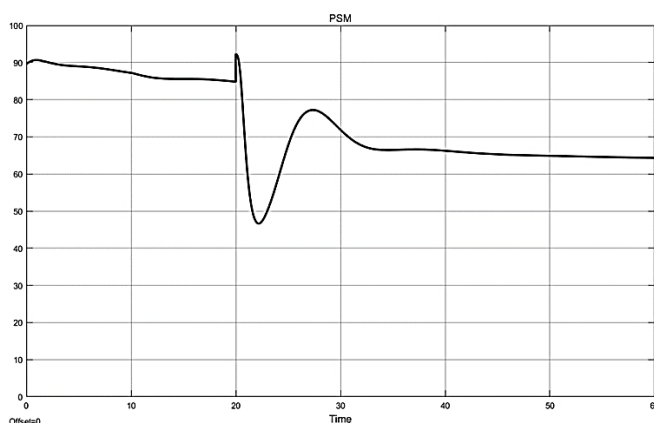


Рис. 12. Масова частка (%) твердого готового класу, що надходить на збагачення (вихідний продукт)

На підставі досліджених даних було зроблено висновок, що функція належності забезпечує постійну подачу води в млин з урахуванням обсягу руди, що завантажується, в оптимальному обсязі, достатньому для утворення пульпи, необхідної щільності. Отже можна зробити висновок про адекватність результатів моделювання.

Висновки та напрям подальших досліджень. Аналіз наведених графіків показує, що перехідні характеристики, отримані за допомогою моделювання, відповідають даним, отриманим на підприємстві, а саме:

$\gamma_{зл} = 43\% \text{ тв.}$, а згідно даних отриманих на підприємстві $\gamma_{зл} = 48\% \text{ тв.}$; $Q_{зл} = 190 \text{ м}^3/\text{год.}$, а згідно даних отриманих на підприємстві, $Q_{зл} = 200 \text{ м}^3/\text{год.}$; $\alpha_{зл} = 35\%$, а згідно даних отриманих на підприємстві, $\alpha_{зл} = 35,2\%$. Отже, отримані результати можуть бути застосовані при розробці автоматизованих систем управління, які використовують інтелектуальні методи ідентифікації та синтезу.

Список літератури

1. Авдохин В. М. Основы обогащения полезных ископаемых. Обогажительные процессы, Т.1. – М.: МГУ, 2008. – 375 с.
2. Марюта А. Н., Качан Ю. Г., Бунько В. А. Автоматическое управление технологическими процессами обогащательных фабрик: Учебн. для студ. Вузов. – М.: Недра, 1983. – 277 с.
3. Моркун В. С., Цокуренко А. А., Луценко И. А. Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами. – Кривой Рог: Минерал, 2005. – 261 с.
4. Сигул Р. И. Автоматизированное управление процессами обогащения и агломерации железных руд и концентратов. – М.: Недра, 1989. – 191 с.
5. А. Дж. Линч. Циклы дробления и измельчения. – М.: Недра, 1981. – 342 с.
6. Процито В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогащательных фабрик. – М.: Недра, 1987. – 253 с.

7. **Марюта А. Н.** Обоснование принципов построения оптимальных комбинированных САУ на магнитообогатительных фабриках // Вісник Криворізького технічного університету. – 2005. – № 6. – С. 152-155.
8. **Фарис Самир Расми Альхори, Алексеев М. А.** Автоматизированный контроль степени заполнения барабанных мельниц рудой // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 4. – С. 13-19.
9. **Кондратець В. О., Сербул О. М.** Обґрунтування системи комп'ютерної ідентифікації та регулювання розрізнення пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 34. – С. 45-50.
10. **Туз А. А., Санаева Г. Н., Пророков А. Е.** Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Том 8(2). – С. 37-44.
11. **Штовба С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами Matlab. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.
12. **Abonyi J., Nagy L., Szeifert F.** Hybrid fuzzy convolution modelling and identification of chemical process systems // International Journal of Systems Science. – 2000. – №31. – P. 457-466.

Рукопис подано до редакції 28.10.2022

УДК 691.32

Н. В. АСТАХОВА, В. І. АСТАХОВ, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛАКОПЕМЗОБЕТОНУ ТА ШЛАКОБЕТОНУ ДЛЯ ОДНОШАРОВОЇ ПАНЕЛІ ДАХУ З БЕЗРУЛОННОЮ ПОКРІВЛЕЮ ТА ТЕПЛИМ ГОРИЩЕМ

Мета. Отримання шлакопемзобетону та шлакобетону з підвищеною міцністю на стиск та зниженим показником водопроникності, шляхом модифікації його структури введенням добавки ПАР. З метою поліпшення умов експлуатації покрівлі житлових будинків за рахунок ліквідації її перетинів випусками вентиляційних каналів, каналізації і т. д. та зниження тепловтрат будівлі, знаходить широке застосування в типових проектах конструкція даху з теплим горищем.

До переваг даху з теплим горищем слід віднести покращення вентиляції житлових приміщень, простоту конструкції, можливість підвищення заводської готовності елементів та зниження трудовитрат на будівництво, підвищену надійність покрівлі, зниження тепловтрат будівлі, можливість огляду та ремонту.

Збірні залізобетонні дахи з безрулонною покрівлею над теплим горищем поєднують в собі переваги дахів з безрулонною покрівлею, та дахів з теплим горищем. Матеріал панелі такого даху, крім необхідних характеристик морозостійкості, водонепроникності, міцності на стиск і розтяг та ін., повинен забезпечувати достатній для умов роботи горища опір теплопередачі.

Методи дослідження. У якості основних методів використані стандартні методи визначення водопроникнення та руйнівні методи оцінки міцності при стиску бетону стандартних зразків.

Наукова новизна. Експериментально підтверджена можливість модифікації властивостей шлакопемзобетону та шлакобетону введенням до його складу добавки ПАР, що призводить до поліпшення структури бетону на шлакових матеріалах, що підтверджується зміною проникності бетону та підвищенням його міцності на стиск.

Практичне значення. Отримані шлакопемзобетон та шлакобетон, які володіють підвищеною міцністю на стиск та зниженим показником водопроникності, за рахунок модифікації його структури шляхом введення добавки ПАР, що особливо важливо для бетону конструкції даху.

Результати. На основі виконаних досліджень було виявлено, що максимальне підвищення міцності на стиск та зниження показника водопроникності шлакобетону викликає введення до його складу добавки ПАР в кількості 0,03 % від сумарної маси цементу та меленого шлаку.

Ключові слова: мелений гранульований шлак, шлакопемзобетон, одношарові конструкції даху з безрулонною покрівлею над теплим горищем.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-105-110

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Бетон панелей даху знаходиться в складних умовах безпосереднього впливу комплексу зовнішніх атмосферно - кліматичних факторів. Він піддається поперемінному зволоженню та висушуванню, заморожуванню та відтаюванню, сезонним та добовим коливанням температури та іншим впливам.

Недостатня надійність покрівельних мастичних та лакофарбових матеріалів обумовлює необхідність частого оновлення останніх, та визначає несприятливі умови експлуатації підпокрівельного шару бетону. Тому в даний час, разом із удосконаленням атмосферостійких покрівельних матеріалів, доцільно та актуально продовжувати дослідження водонепроникного, морозостійкого, довговічного бетону для конструкцій даху без поверхневої гідроізоляції [1 - 4].