

АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 622.271

Стець С. Є., к.т.н., доцент, Стадник В. С., студент
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Стець Н. В., заступник начальника відділу оподаткування юридичних осіб**
(ДПІ у Рівненському районі ГУ ДФС у Рівненській області)

СИСТЕМА ЕКСТРЕМАЛЬНОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ДРОБЛЕННЯ РУДИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКОНОМІЧНОГО КРИТЕРІЮ

У роботі пропонується рішення задачі підвищення ефективності технологічного процесу дроблення руди шляхом розробки системи автоматизованого керування конусної дробарки з контуром пошукового екстремального управління за економічним критерієм. Проведено обчислювальні експерименти, які продемонстрували, що залежність критерію носить унімодальний характер в області зміни керувань. Впровадження розробленої системи у виробництво дозволить підвищити економічну ефективність на 4,4%.

Ключові слова: конусна дробарка, економічний критерій оптимізації, пошукове екстремальне керування, ієрархічна система, моделювання.

Вступ. Процес зменшення крупності руди в конусних дробарках характеризується багатомірністю, багатозв'язністю, нелінійністю, впливом фізико-механічних властивостей сировини на продуктивність, зносом броні і елементів агрегату. Системи автоматизованого управління дробарками, які застосовуються в промисловості, зазвичай орієнтовані на підтримку якісних показників дробленого матеріалу без використання контурів оперативної оцінки і максимізації прибутку, що призводить до втрат, обумовлених нераціональними, з точки зору кінцевої мети управління підприємством, режимами функціонування обладнання [1; 2]. Актуальним напрямком досліджень є вдосконалення існуючих способів управління технологічним процесом дроблення руди шляхом розробки методів і алгоритмів екстремального регулювання для формування оптимальної програми управління конусною дробаркою за певний інтервал часу. Це дозво-

лить при впровадженні у виробництво підвищити ефективність роботи діючого технологічного обладнання і знизити собівартість готової продукції при заданих показниках її якості.

Аналіз останніх досліджень. Значна кількість сучасних систем управління гранулометричним складом руди створена на базі дробарок «Hydrocone» [3]. При розробці таких систем було враховано вплив таких чинників, як гранулометричний склад, вологість і крупність вихідної сировини, на ефективність роботи дробильного агрегату. Сучасні дробарки «Hydrocone» оснащені системою управління величиною розвантажувальної щілини останнього покоління ASRi [4]. Система має інструменти стабілізації параметрів, що характеризують процес дроблення. При цьому вона не враховує економічні показники.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка системи автоматичного управління процесом зменшення крупності руди в конусних дробарках, яка забезпечить підвищення економічної ефективності за рахунок пошуку і підтримки екстремального значення техніко-економічного критерію оптимізації, за яким здійснюється оцінка якості функціонування технологічного об'єкта. Для досягнення поставленої мети планується формалізувати і обґрунтувати техніко-економічний показник для оцінки якості роботи конусної дробарки для визначення раціонального режиму її функціонування; розробити систему автоматизованого управління технологічним процесом дроблення руди в конусних дробарках з контуром пошукового екстремального керування за техніко-економічним критерієм; виконати імітаційне моделювання системи з оцінкою ефективності впровадження у виробництво.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах для оптимізації технологічних процесів в системах управління верхнього рівня все частіше використовують техніко-економічні або економічні критерії. Широке поширення такого підходу пояснюється універсальністю вартісних оцінок, спираючись на які забезпечується найбільш вигідне ведення технологічних процесів з позиції досягнення мети управління підприємством в цілому. При цьому процеси рудопідготовки не є винятком. Для оптимізації технологічного процесу дроблення руди пропонується використовувати критерій І.А. Буrowого розглянутий в [5], який дозволяє здійснювати оцінку якості роботи процесів збагачення:

$$J = \frac{1}{t} \left(\sum \gamma_i C_{ki} - \sum S_i C_i - C_A \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

де γ_i – вихід i -го продукту, т; U_{ki} – вартість 1 т i -го продукту, грн; S_i – витрата i -го матеріалу, т; C_i – вартість i -го матеріалу, грн; C_A – амортизаційні витрати, грн; t – час процесу.

При оптимізації об'єкта з використанням показника ефективності (1) метою управління є отримання максимального прибутку за деякий проміжок часу. З огляду на те, що критерій містить кінетичну складову – час операції, він більш придатний для оптимізації періодичних процесів, які мають чітко виражені межі операції [6]. Початком є завантаження сировини в технологічну установку, а закінченням – вивантаження готового продукту. З безперервними процесами, до яких відноситься технологічний процес дроблення, ситуація більш складна. Межі операції виділити неможливо, тому їх необхідно встановлювати штучно. Можна виділити два шляхи вирішення цього завдання: проводити оцінку функціонування об'єкта управління або на рівних інтервалах часу, або при кожному дробленні встановленої кількості руди. У даній роботі використовується другий підхід. Розглянувши більш детально вираз (1), його можна умовно розділити на три складові: функція витрат $\sum S_i C_i + C_A$, функція доходу $\sum \gamma_i U_{ki}$ і час, за який здійснюється оцінка ефективності процесу t . З урахуванням особливостей технологічного процесу дроблення більшість дослідників [6; 7; 8] до функції витрат відносять вартість руди, яка піддається дробленню, і вартість спожитої електроенергії. При цьому недостатньо уваги приділяється питанню, пов'язаному з впливом на ефективність виробничого процесу зносу технологічного обладнання. Це пояснюється тим, що неможливо контролювати витрату футерування в процесі експлуатації. Однак знос може бути визначений побічно, опираючись на дані про кількість дробленого матеріалу, що підтверджується дослідженнями [9; 10]. Тому критерій оптимізації повинен відображати вплив цього фактора на ефективність функціонування дробильних агрегатів. Головним призначенням дробарки є видача дробленого продукту певного гранулометричного складу з максимальною продуктивністю. При цьому перевищення відсотка вмісту контрольного класу крупності, встановленого технологічною інструкцією, неприпустимо. Тому в функцію витрат додатково необхідно ввести штраф, пропорційний кількості дробленого продукту, яка не відповідає необхідним показникам якості. У зв'язку з вищевикладеним, функція витрат може бути представлена наступним виразом:

$$x = C_{x_m} \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} x_m(t) dt + C_{y_p} \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} y_p(t) dt + C_{y_w} \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} y_w(t) dt + C_f \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(t) dt, \quad (2)$$

де t_n – час завершення попереднього інтервалу розрахунку і початку поточного, *од. часу*; t_{n+1} – час завершення поточного інтервалу розрахунку і початку наступного, *од. часу*; $x_m(t)$ – кількість матеріалу завантаженого в дробарку протягом циклу, τ ; $y_p(t)$ – електроенергія, яку споживає електропривод за цикл роботи, *кВт·год*; C_{x_m} – вартість матеріалу завантаженого в дробарку, *грош.од./т*; C_{y_p} – тариф на електроенергію, *грош.од./кВт·год*; $y_w(t)$ – витрата футерування, τ ; C_{y_w} – вартість броні, *грош.од./т*; $f(t)$ – кількість подрібненої руди в якій вміст класу перевищує контрольне значення, τ ; C_f – штраф за перевищення, який обумовлюється вартістю руди, що не відповідає встановленим показникам якості вихідного продукту, *грош. од./т*.

Функція доходу визначається єдиною складовою – вартістю вихідного продукту дробильного агрегату за період часу, на якому здійснюється оцінка:

$$y = C_{y_m} \cdot \int_{t_n}^{t_{n+1}} y_m(t) dt, \quad (3)$$

де $y_m(t)$ – кількість подрібненої руди, τ ; C_{y_m} – ціна подрібненої руди, *грош. од./т*.

Таким чином, з урахуванням виразів (2), (3) при умови, що $\sum \gamma_i C_{ki} = y$ і $\sum S_i C_i + C_A = x$ критерій (1) набуде вигляду:

$$J = \frac{1}{t} \left[C_{y_m} \int_{t_n}^{t_{n+1}} y_m(t) dt - \left(C_{x_m} \int_{t_n}^{t_{n+1}} x_m(t) dt + C_{y_p} \int_{t_n}^{t_{n+1}} y_p(t) dt + C_{y_w} \int_{t_n}^{t_{n+1}} y_w(t) dt + C_f \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(t) dt \right) \right]. \quad (4)$$

Необхідність контролю величин складових показник (4) визначає конфігурацію системи управління (рис. 1).

Розроблена структура конусної дробарки дрібного дроблення. Вона складається з об'єкта управління на нижньому рівні, систем

управління конвеєром-живильником і гідроприводом для стабілізації (з метою спрощення на схемі не вказані) продуктивності дробарки і гранулометричного складу відповідно, які перебувають між накопичувальним бункером роздробленої руди, що надходить з агрегатів стадії середнього дроблення, і параболічним бункером, який забезпечує сировиною секції подрібнення. Для управління рівнем запасу продукту в сховищах використовуються релейні регулятори 1, 2 (рис. 1). Для реалізації багаторівневої пошукової системи екстремального керування існуючі локальні контури стабілізації повинні бути доповнені елементами розрахунку критерію оптимізації, пошуку і утримання максимального значення показника якості.

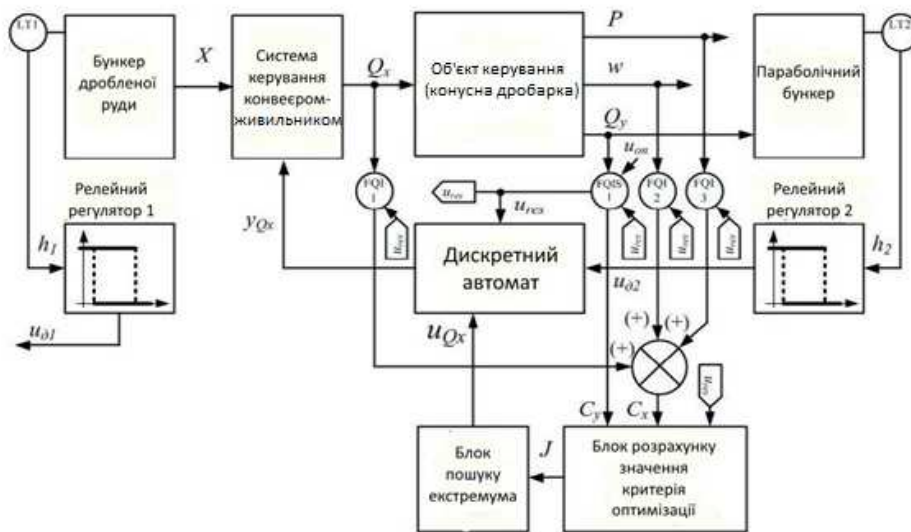


Рис. 1. Блок-схема системи управління конусною дробаркою з пошуком техніко-економічного критерію

Вимірювальна частина системи складається з датчиків, які визначають масу руди на вході і виході технологічної установки, наприклад, конвеєрних ваг і інтегруючих пристроїв FQI1 і FQIS1 для вимірювання витрати матеріалу. Елемент FQIS1 додатково оснащений пристроєм для видачі сигналу після проходження встановленої кількості руди. Рівень завантаження ємностей контролюється датчиками рівня LT1, LT2. Розрахунок витрати броні визначається елементом FQI2. Для підрахунку активної потужності затраченого приводом в процесі дроблення може бути використаний цифровий реєстратор спожитої електроенергії (на схемі представлений інтегратором FQI3) на базі струмового шунта, резистивного подільника і інтегральної схеми лічильника електроенергії.

Вартість витрачених протягом циклу функціонування системи ресурсів визначається шляхом встановлення коефіцієнтів підсилення інтеграторів FQIS1, FQI1, FQI2, FQI3.

Транспортування руди, вивантаження з накопичуваного бункера в конусну дробарку, відбувається конвеєрним трактом з продуктивністю Q_x , параболічний бункер завантажується роздробленою рудою по тракту з інтенсивністю Q_y . Система управління функціонує при наявності сигналу високого рівня на керуючому вході дискретного автомата u_{02} . Цей вплив формується релейним регулятором системи управління запасами параболічного бункера і свідчить про те, що рівень матеріалу в бункері досяг нижньої межі. При цьому дискретний автомат запам'ятовує значення сигналу на вході u_{Qx} , амплітуда якого характеризує швидкість завантаження руди в дробарку є впливом уставки для контуру стабілізації продуктивності технологічного агрегату і передає його на вихід y_{Qx} . При дробленні руди, кількість якої встановлюється опорним сигналом u_{on} , інтегруючий пристрій FQIS1 видає сигнал готовності u_{res} рівня логічної одиниці, який сигналізує про можливість зміни величини уставки. По передньому фронту сигналу u_{res} відбувається скидання інтегратора в початковий стан. Тобто дискретний автомат знаходиться між нижнім і верхнім ієрархічним рівнем системи автоматизації управління і виконує функцію координації.

Розрахунок показника ефективності J здійснюється за переднім фронтом сигналу u_{res} , який фіксує момент завершення поточного циклу роботи конусної дробарки і також відповідає моменту початку нової операції. При цьому час початку операції t_n запам'ятовується до наступного обчислення J . Різниця між моментом $t_n + 1$, в який відбувається зростання сигналу u_{res} і збереженим в пам'яті елемента значенням t_n дає час циклу функціонування агрегату. З входів C_x і C_y знімаються дані, відповідно складові функції витрат і доходу критерію оптимізації. Результат розрахунку передається на вхід блоку пошуку екстремуму J , який в залежності від способу пошуку максимального значення виконує заміну керуючого впливу. Після завершення всіх необхідних обчислень інтегратори FQIS1, FQI1, FQI2, FQI3 скидаються в початковий нульовий стан.

Для дослідження режимів роботи системи управління конусної дробарки в програмному пакеті MATLAB/Simulink була розроблена імітаційна модель (рис. 2), яка дозволяє визначити характер впливу збурень на поведінку показника ефективності при інтерактивному

аналізі значень керуючого впливу.

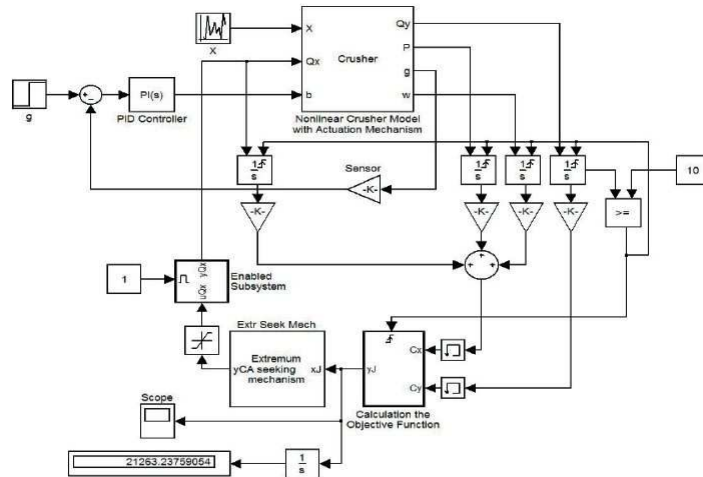


Рис. 2. Імітаційна модель системи управління в Matlab/Simulink

До складу моделі входять нелінійна модель об'єкта управління (Nonlinear Crusher Model), інтегратори обліку величин, які необхідні при розрахунку критерію оптимізації, блок порівняння з елементом завдання опорного значення, підсистема, що здійснює послідовність збільшення величини керуючого впливу (Triggered Iterator Subsystem), дискретний автомат (Enabled Subsystem) і блок розрахунку значення цільової функції (Calculation the Objective Function). З метою спрощення, представлена структурна схема не включає контури стабілізації швидкості завантаження продукту в дробарку і гранулометричного складу.

Інтегратор, який імітує пристрій для визначення витрати роздробленої руди на виході технологічної установки, має додатковий вивід стану для організації зворотного зв'язку і формування, з використанням блоку порівняння, сигналу, за яким відбувається виведення інтеграторів, зміна керуючого впливу блоком Triggered Iterator Subsystem і обчислення критерію оптимізації елементом Calculation the Objective Function. Алгоритм пошуку оптимуму реалізований в блоці Extremum Seeking Mechanism.

При проведенні чисельного експерименту розрахунок критерію оптимізації виконувався при дробленні кожних 10 тон руди. При цьому значення керуючого впливу збільшувалася на 0,5 т/год при кожній ітерації. Ціни на ресурси встановлювалися в національній валюті України. Тариф на електроенергію для промислових підприємств разом з ПДВ становив 1,13 грн/кВт-год, вартість подрібненої руди – 29,65 грн/т, вартість вхідної руди – 25,92 грн/т, вартість броні

з монтажними роботами — 18250 грн/т. В результаті імітаційного моделювання були отримано графіки зміни цільової функції в діапазоні управляючих впливів 250...400 т/год при значеннях ширини розвантажувальної щілини 4,76, 6,35 і 9,53 мм (рис. 3).

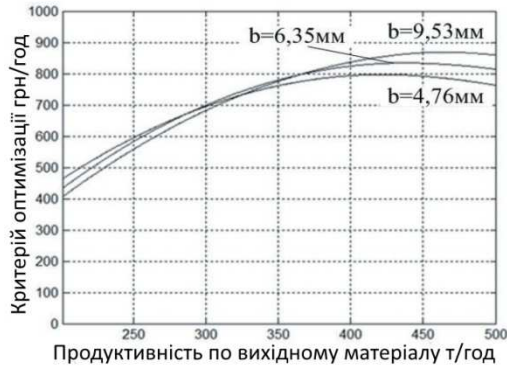


Рис. 3. Залежність критерію оптимізації від швидкості завантаження руди в технологічний об'єкт при різних значеннях ширини розвантажувальної щілини

Встановлено, що критерій оптимізації має глобальний екстремум. Зсув оптимуму показника відбувається вгору і вправо в міру збільшення ширини щілини. Так, при $b = 4,76$ мм максимум критерію $J = 797$ грн/год досягається при продуктивності за вихідним живленням $Q_x = 421$ т/год; при $b = 6,35$ мм екстремум знаходиться в точці $Q_x = 436$ т/год і $J = 834$ грн/год, а при $b = 9,53$ мм – в точці $Q_x = 449,5$ т/год і $J = 867$ грн/год. Таким чином, зменшення ширини розвантажувальної щілини з 9,35 мм до 6,35 мм призводить до зниження максимального значення критерію оптимізації на 3,8%, а подальша зміна – до зниження J на 8,7%.

Висновок. Результати комп'ютерних експериментів на аналітичній моделі об'єкта управління дозволили зробити висновок, що показник якості функціонування конусної дробарки має глобальний екстремум в області зміни керуючих впливів. Виконано аналіз характеру реакції техніко-економічного критерію на збурюючий вплив (ширину розвантажувальної щілини). Встановлено, що під дією цього фактора відбувається зміна положення глобального максимуму, що дозволяє використовувати методи екстремального керування при розробці системи автоматичного управління. Розроблена пошукова система екстремального управління конусною дробаркою дрібного дроблення, яка забезпечує утримання об'єкта управління в стані оп-

тимому техніко-економічному критерію якості шляхом зміни продуктивності за вхідним живленням за рахунок регулювання швидкості руху стрічки конвеєра. Розроблена система автоматичного управління доповнює існуючі локальні контури стабілізації головних вихідних величин, що вимагає незначних витрат на впровадження.

Виконане імітаційне моделювання роботи запропонованої системи. Аналіз отриманих результатів показав, що розроблена система управління процесом дроблення руди дозволяє протягом доби підвищити економічну ефективність роботи об'єкта управління на 4,4%.

1. Способы дробления, классификация оборудования // Режим доступа: <http://stroy-technics.ru/article/sposoby-drobleniya-klassifikatsiya-oborudovaniya>.
2. Sandvik. Crusher Control System // Режим доступа: [http://www.miningandconstruction.sandvik.com/SANDVIK/1181/Internet/CIS/S000924.nsf/Alldocs/Products*5CCrushers*and*screens*5CCrusher*automation*2AAutomatic*setting*regulation/\\$file/Sandvik%20ASRi%20EN.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/SANDVIK/1181/Internet/CIS/S000924.nsf/Alldocs/Products*5CCrushers*and*screens*5CCrusher*automation*2AAutomatic*setting*regulation/$file/Sandvik%20ASRi%20EN.pdf).
3. Hulthen E. Real-time optimization of cone crushers: PhD Thesis / Erik Hulthen. – Goteborg, 2010. – 68 p.
4. ASRi – новая интеллектуальная система управления дробилкой // Строительно-дорожная индустрия. – 2005. – № 20. – С. 18–19.
5. Барский Л. А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых / Л. А. Барский, В. З. Козин. – М. : Недра, 1978. – 486 с.
6. Тытюк В. К. Автоматизация процессов управления с использованием объектно-ориентированного подхода / В. К. Тытюк, И. А. Луценко, А. Ю. Михайленко // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг : Мінерал, 2009. – № 24. – С. 81–85.
7. Автоматизация управления обогатительными фабриками; под ред. Б. Д. Кошарского, А. Я. Ситковского, А. В. Красномовца. – М. : Недра, 1977. – 527 с.
8. Тихонов О. Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках: учебн. для вузов / О. Н. Тихонов. – М. : Недра, 1985. – 272 с.
9. Андреев С. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. А. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1980. – 415 с.
10. Клушанцев Б. В. Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.

Рецензент: д.т.н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

Stets S. Y., Candidate of Engineering, Associate Professor,
Stadnyk V. S., Senior Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Stets N. V., Deputy Head of the Tax Entities** (STI in Rivne Region PG SFS in Rivne Region)

SYSTEM OF EXTREME AUTOMATIC CONTROL OF RAGGING USING ECONOMIC CRITERIA

The paper proposed solution improve the efficiency of the process by developing ragging Automation cone crusher with extreme contour search for economic management criteria. A computational experiments that demonstrated that dependence criterion is unimodal character changes in the controls. The introduction of the developed system into production will increase economic efficiency by 4.4%.

Keywords: Cone crusher, economic criteria optimization, search engine extreme control, hierarchical system modeling.

Стець С. Е., к.т.н., доцент, **Стадник В. С.,** студент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Стець Н. В.,** заместитель начальника отдела налогообложения юридических лиц (ГНИ в Ровенском районе ГУ ДФС в Ровенской области)

СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДРОБЛЕНИЕ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ

В работе предлагается решение задачи повышения эффективности технологического процесса дробления руды путем разработки системы автоматизированного управления конусной дробилки с контуром поискового экстремального управления по экономическому критерию. Проведено вычислительные эксперименты, которые показали, что зависимость критерия носит унимодальный характер в области изменения управлений. Внедрение разработанной системы в производство позволит повысить экономическую эффективность на 4,4%.

Ключевые слова: конусная дробилка, экономический критерий оптимизации, поисковое экстремальное управление, иерархическая система, моделирования.
