

дозы, подтвердили, что расчеты секундных объемов с использованием предложенных выражений являются достаточно точными. Так, например, при дозе агломерата в 22 м³ ошибка в вычислениях составила менее 1,5 %.

При определении секундных объемов на основании одного датчика геометрии дозы, ошибка составила 5,5 %.

Список литературы

1. Влияние смешивания железорудного сырья с коксом на газодинамические условия и технико-экономические показатели доменной плавки / **В.И. Логинов, А.Л. Берин, С.М. Соломатин** [и др.] // Сталь. – 1977. - №5. – С. 391-394.
2. Работа доменной печи при совместной загрузке железорудных материалов и кокса в скип / **В.И. Логинов, С.М. Мусиенко, Д.В. Воронков** [и др.] // Сталь. – 1987. - №12. – С.7-12.
3. **Праздников А.В., Клоцман Е.Я., Шутылев Ф.М., Головкин В.И.** и др. «Способ подачи шихтовых материалов в доменную печь». Авторское свидетельство СССР № 694446. МПК С21В7/20. Заявка № 2380955. Приоритет изобретения 01.07.1976г. Опубликовано 30.10.1979 бюл. № 40.
4. **Большаков В.И., Иванча Н.Г.** Формирование смешанных порций шихтовых материалов на доменном конвейере//Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002. - №6. - С.79-83.
5. Авторское свидетельство СССР № 1049549. МПК С21В7/20. Способ управления механизмами транспортной шихтоподдачи доменных печей / **Золотницкая Г.Д., Френкель М.М., Бургутин Б.Г., Гарбуз Е.Я., Клоцман В.И., Головкин А.С. Гуров.** - Заявка № 3358183. Приоритет изобретения 26.11.1981 г. Опубликовано 23.10.1983 бюл. № 39.
6. **Порх В.И.** «Способ управления механизмами транспортной шихтоподдачи доменных печей». Патент РФ № 2016068. МПК С21В7/20. Заяв. 23.10.1991; опубл. 15.07.1994.
7. Пат.79643 Украина, МПК(2013.01) С21В7/00, С21В7/04,(2006.01). Способ подачи шихтовых материалов в доменную печь / **Верховская А.А., Головкин В.И., Иващенко В.П., Рыбальченко М.А.**; заявитель и патентообладатель НМетАУ (Украина) - № U201213017; заявл. 15.11.12; опубл. 24.04.13,Бюл.№8.
8. **Поляков Н.С., Штокман И.Г.** Основы теории и расчеты рудничных транспортных установок. Научно-техническое издательство литературы по горному делу: М., 1962.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.15

УДК 62-503.56:622.73

В.В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц. **Ю.В. ГУЛЯЄВА**, магістрант
Криворізький національний університет

ОПТИМАЛЬНЕ І МОДАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СТАДІЄЮ ЗБАГАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Наведено результати дослідження методу оптимального керування стадією збагачення технологічних різновидів залізорудної сировини. Виконано аналіз використовуваних підходів до оптимального автоматизованого керування млинами першої стадії подрібнення та критеріїв оцінювання ефективності процесу подрібнення. У процесі дослідження основні регулюючі впливи як: витрата руди та води у млин; як вихідні керувані показники - вміст заліза у хвостах першої стадії збагачення та вміст заліза у концентраті. Розраховано та виконано порівняльний аналіз перехідних процесів системи керування та реакцію системи на випадкові вхідні сигнали. Досліджено роботу системи керування при застосуванні модальних регуляторів та класичного ПІД-регулятора. Здійснено параметричний синтез керування і розроблено комп'ютерну модель системи у середовищі Simulink. Представлено схеми підключення трьох регуляторів та результати моделювання процесу керування першою стадією збагачення при використанні модального, астатичного модального, ПІД-регуляторів. Виконано порівняльний аналіз одержаних у результаті моделювання показників вмісту заліза у хвостах.

Ключові слова: оптимальне керування, подрібнення руди, модальний регулятор, ПІД-регулятор.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Найбільш енергоємною операцією в збагаченні є подрібнення руди, на яку припадає понад 60 % витрат електроенергії. Енергоспоживання технологічного збагачувального обладнання значною мірою визначається характеристиками руди, що надходить на переробку. Зокрема, коефіцієнт кореляції між витратами електроенергії і якістю руди становить 0,71-0,74 [1]. Коливання характеристик технологічних різновидів збагачуваної руди також негативно впливає на якість вітчизняного залізорудного концентрату. Середнє значення вмісту корисного компоненту в концентраті по залізорудних підприємствах України становить 64-65 %, в той час коли конкурентоспроможною на

світовому ринку вважається залізорудна продукція, що містить 67-68 % заліза у концентраті [2]. Отже, актуальним завданням є підвищення ефективності технологічних процесів збагачення технологічних різновидів залізорудної сировини шляхом підвищення продуктивності роботи збагачувального обладнання із забезпеченням необхідної якості кінцевої продукції.

Аналіз досліджень та публікацій. У роботі [3] для оптимізації технологічного процесу на збагачувальних фабриках запропоновано використання таких видів регуляторів: пропорційний (1), ізодромний (2), астатичний (3), екстремальний (4)

$$y = k_1 x \quad (1)$$

$$y = k_1 x + k_2 \int_0^t x dt \quad (2)$$

$$y = k_2 \int_0^t x dt \quad (3)$$

$$y = k_3 \operatorname{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (4)$$

Методи оптимального налаштування регуляторів запропоновано у праці [4]. У даній роботі зазначено, що оптимальними вважаються налаштовані регулятори, які відповідають мінімуму (або максимуму) певного показника якості, який встановлюється виходячи з технологічних вимог. Для кожного регулятора вибрано оптимальні параметри та у результаті порівняльного аналізу перехідних характеристик систем керування з різними регуляторами встановлено, що найкращим є екстремальний регулятор, використання якого дозволяє підвищити продуктивність стадії на 2,5 % та зменшити середньоквадратичне відхилення витрат руди від 27 до 10 %.

У праці [5] описано метод оптимального керування заповненням млина, згідно з яким регулювання подрібнюючого середовища (куль) та матеріалу (пульпи) в об'ємі барабану млина ґрунтується на вимірюванні неосновного параметру - споживаної електродвигуном млина потужності [6]. Недоліком даного способу є недостатньо висока точність регулювання і, як наслідок, зниження продуктивності технологічного обладнання. Ускладненням також є процес виділення із загального сигналу потужності достовірної інформації про заповнення млина, оскільки згадана потужність залежить не тільки від вагової кількості пульпи і куль, які перебувають у млині, а й від великої кількості інших змінних факторів: фізико-механічних характеристик технологічних різновидів руди, густини і в'язкості пульпи, зносу футеровки.

Метод оптимального керування роботою млина самоподрібнення, що включає змінення подачі вихідного споживання і подрібнених тіл, пошук екстремуму потужності електроприводу млина і вимірювання ваги матеріалу у млині запропоновано у роботах [7,8].

У праці [9] подано спосіб керування системою переробки сировини для досягнення оптимізації показників продуктивності, що дозволяє підвищити показники ефективності за рахунок оптимізації обсягів надходження технологічних різновидів сировини до збагачувального відділення. Запропоновані у праці [10] пропозиції спрямовані на зниження втрат заліза у хвостах першої стадії збагачення дають прямий економічний ефект в умовах фабрики, а зниження коливання вмісту заліза в концентраті, при забезпеченні його якості на заданому рівні, дає значний економічний ефект в умови аглодоменного виробництва. У роботі [11], проведено аналіз якості та об'ємів видобутку сировини в Україні.

Отже, завдання розробки методу оптимального керування стадією збагачення залізорудної сировини, представленої технологічними різновидами, є актуальним і потребує дослідження.

Постановка завдання. Завданням даної роботи є формування оптимального керування стадією збагачення залізорудної сировини, представленої технологічними різновидами, і апробація сформованого керування з використанням комп'ютерного моделювання.

Викладання матеріалу та результати. Основними керуючими впливами у системі керування стадією збагачення залізорудної сировини є витрати руди та води, вихідними (керованими) показниками - вміст заліза у хвостах першої стадії збагачення та вміст заліза у концентраті [5-8,12]. Схема досліджуваної математичної моделі процесу збагачення руди на першій стадії ґрунтується на результатах досліджень [12] і представлена на рис. 1.

На схемі (рис. 1) позначено: x - кількість класу -0,074 мм у подрібненій руді; δ - густина пульпи; β та ν - вміст заліза у концентраті та хвостах. Початкові умови вибрано такими:

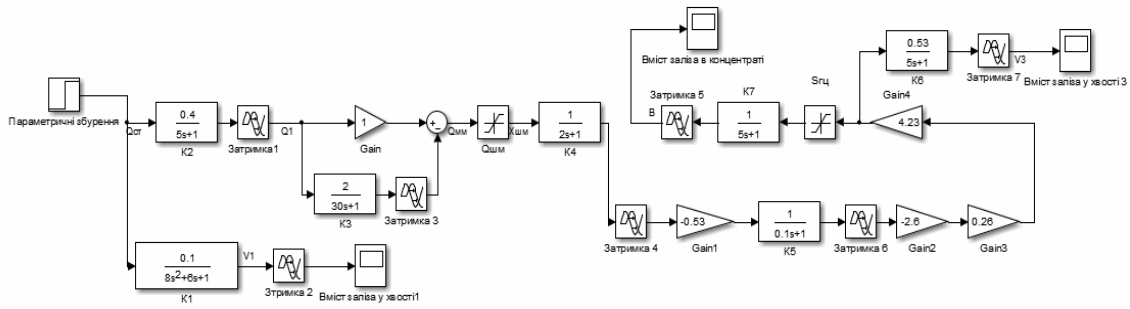


Рис. 1. Структурна схема моделі

При подачі одиничного ступінчатого сигналу (Step) на вхід системи було одержано графіки перехідних процесів, що представлені на рис. 2а. Реакцію системи на випадкові вхідні сигнали (Uniform Random Number) представлено на рис. 2б.

Розглянемо синтез керування по каналу «продуктивність ()» → «вміст заліза у хвостах (δ)». Завдання синтезу оптимальних систем керування формується як варіаційна задача. При цьому крім рівняння об'єкта керування повинні бути задані обмеження на керування і фазовий вектор, крайові (граничні) умови і критерій оптимальності [13].

Для кожного початкового стану x_0 оптимальний лінійний регулятор породжує оптимальне програмне керування $u(x,k)$ і оптимальну траєкторію $x(k)$. Одними з найважливіших завдань теорії керування є дослідження керованості та спостережливості динамічних систем. Наведемо відповідні визначення та критерії для стаціонарних лінійних систем, отримані Калманом [14]. Система називається цілком керованою, якщо вибором керуючого впливу $u(t)$ на інтервалі часу $[t_0, t_1]$ можна перевести систему з будь-якого початкового стану $x(t_0)$ у довільний заздалегідь заданий кінцевий стан $x(t_1)$. Система цілком спостерегається, якщо по реакції $y(t_1)$ на виході системи на інтервалі часу $[t_0, t_1]$ при заданому керуючому впливі $u(t)$ можна визначити початковий стан $x(t_0)$. Для того щоб система була цілком керованою, необхідно і достатньо, щоб ранг матриці керованості [13]

$$M_u = \begin{pmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{pmatrix} \quad (5)$$

дорівнював розмірності вектора стану: $\text{rank } M_u = n$.

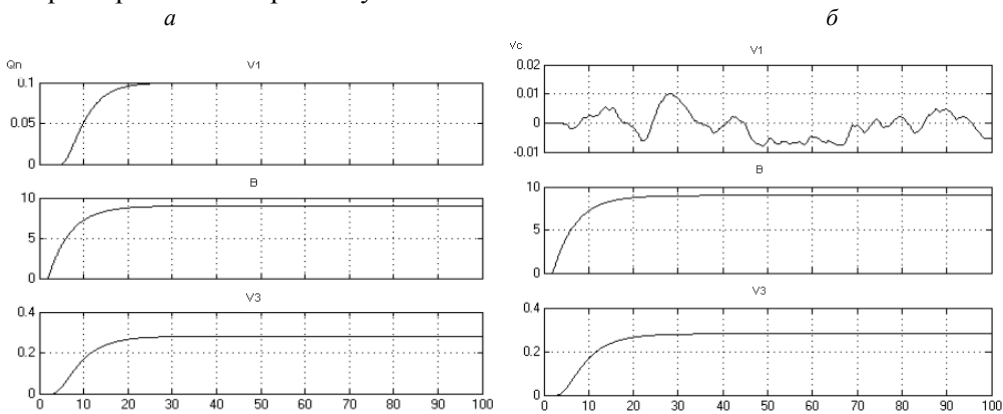


Рис. 2. Реакція об'єкта керування на вхідні сигнали різних типів

Для того щоб система була цілком спостережною необхідно і достатньо, щоб ранг матриці спостережності

$$M_Y = \begin{pmatrix} C^T & A^T C^T & (A^T)^2 C^T & \dots & (A^T)^{n-1} C^T \end{pmatrix} \quad (6)$$

дорівнював розмірності вектора стану: $\text{rank } M_Y = n$.

Для синтезу оптимального регуляторів лінійних стаціонарних систем у Control System Toolbox було використано функції розв'язків рівнянь Беллмана [15]. Функція dlqr обчислює ма-

трицю коефіцієнтів регулювання по всім змінним стану K для дискретної системи зі середньо-квадратичним функціоналом якості без термінального члена [16]

$$J = \int_{t_0}^{t_1} [x^T Q x + u^T S u + 2x^T N u] dt \quad (7)$$

Після обрання функції (синтез дискретного регулятора) обчислюємо параметри регулятора $[kpe] = dlqr(A, B, Q, R);$

$$x = \text{zeros}(2, N); \quad (8)$$

$$u = \text{zeros}(2, N - 1);$$

Задана система управління описується кінцево – різницевиими рівняннями у просторі станів $x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k), (k = 0,1)$ (9)

Визначена матриця K , формує закон керування $u = Kx$. Результати обчислення наступні: значення параметрів оптимального регулятора: $k = -0.5091 \ -0.0880; p = 1.1887 \ 0.0318, \ 0.0318 \ 0.5055; e = -0.1204 + 0.1500i, -0.1204 - 0.1500i$.

У систем, описуваних за допомогою змінних стану, зазвичай оцінюють спостережності і керованість. Для цього командами `obsv()` і `ctrb()` формуються матриці спостережності і керованості, а потім за допомогою функції `rank()` обчислюється ранг матриці. Система повністю керована, якщо ранг матриці керованості дорівнює порядку системи, повністю некерована, якщо ранг матриці керованості (спостережності) дорівнює нулю. В інших випадках вказується порядок керованості (спостережності), який дорівнює відповідно рангу матриці керованості [13]

$$U = [B \ AB \ A^2 B \ \dots \ A^{n-1} B] \quad (10)$$

або спостережності

$$N = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Модальний регулятор являє собою П-регулятор з коефіцієнтом K і зворотними зв'язками по змінним стану $x_1 \dots x_n$. Вибір коефіцієнтів k_i матриці зворотних зв'язків k^T забезпечує отримання заданих динамічних властивостей системи, причому єдиним чином. Керування U описується матричним рівнянням із впливом завдання r [13]

$$U = K(r - k^T x) \quad (12)$$

а одномірне рівняння регулятора відповідає використанню в ланцюзі зворотного зв'язку ПД-регулятора.

Обрано в якості бажаного характеристичного полінома замкненої системи нормований поліном Баттерворта другого порядку з коефіцієнтами $a_1 = 1,41, a_2 = 1$, що дозволяє отримати показники якості системи з регулятором стану $t_p = 2,9, \sigma = 4,5 \%$. З умови нульової помилки регулювання значення коефіцієнта $K = a_2/b = 1/0,0125 = 80$, тоді значення коефіцієнтів зворотного зв'язку по змінним стану рівні [17]

$$k_1 = \frac{a_1 - a_{10}}{Kb} = \frac{a_1 - a_{10}}{a_2} = 1,41 - 0,75 = 0,66 \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{a_2 - a_{20}}{Kb} = \frac{a_2 - a_{20}}{a_2} = 1,0 - 0,125 = 0,875 \quad (14)$$

Одержана схема комп'ютерної моделі системи керування першою стадією збагачення залізородної сировини представлена на рис. 3.

Результати моделювання перехідних процесів у системі при використанні різних типів регуляторів наведено на рис. 4.

Слід відзначити, що із досліджуваних регуляторів саме астатичний модальний регулятор забезпечив найменший час перехідного процесу та відсутність перерегулювання. При цьому модальний регулятор призвів до появи перерегулювання у 5-7%. А ПД-регулятор має істотно більшу тривалість перехідного процесу.

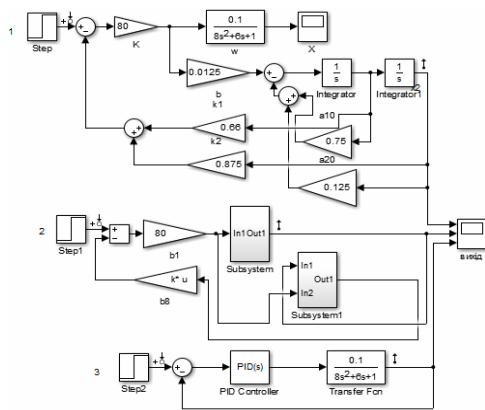


Рис. 3. Схеми комп'ютерної моделі системи керування: 1 - модальний регулятор з коефіцієнтами $k = -0,5091 - 0,0880$; 2 - астатичний модальний регулятор з коефіцієнтами (11), (12); 3 - ПІД-регулятор з коефіцієнтами $K = 21,11$; $A = 3,87$; $B = 28,68$

ної сировини є доцільним. У подальшому необхідно виконати дослідження впливу параметричної невизначеності об'єкта керування на якість роботи системи.

Список літератури

1. Пивень В. А. Экономическая эффективность повышения качества горно-металлургического сырья / В. А. Пивень, Г. В. Шиповский, Н. И. Дядечкин // Горный журнал, 2003. – №9. – С. 57-58.
2. Губін Г. Г. Гірничо-металургійний комплекс України між кризами / Г. Г. Губін, А. Г. Губіна // Вісник КТУ, 2010. – Вип. 25. – С. 218-224.
3. Нестеров Г.С. Технологическая оптимизация обогатительных фабрик / Г.С. Нестеров – М.: Недра, 1976. – 120 с.
4. Тимченко О., Меденець Я., Стрепко О. Методи налаштування регуляторів/ О. Тимченко, Я. Меденець, О. Стрепко // Українська академія друкарства.-2013.- С. 54-59.
5. Пат. 933111 СССР, кл. В 02 С 25/00. Способ оптимального управления заполнением мельниц измельчаемым материалом и измельчающей средой / Кузнецов П. В., Тихонов О. Н., Андреев Е. Е. и Ольховой В. А.; заявитель Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно – исследовательский и проектный институт механической обработки полезных ископаемых. - № 2577435; заявл. 09.02.78; опубл. 07.06.82, Бюл. №21.
6. Пат. 466047 СССР, кл. В 02с 25/00. Способ автоматической оптимизации процесса помола сырья в барабанных мельницах мокрого самоизмельчения/ Марюта А. П., Воронов В. А.; заявитель Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени горный институт им. Артема. – №1779086; заявл. 30.04.72; опубл. 05.04.75, Бюл. №13.
7. Пат. 740281 СССР, кл. В 02 С 25/00. Способ управления работой мельницы самоизмельчения / Кузнецов П. В., Тихонов О. Н., Андреев Е. Е. и Трушин А. А.; заявитель Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно – исследовательский и проектный институт механической обработки полезных ископаемых. - № 2542411; заявл. 09.11.77; опубл. 15.06.80, Бюл. №22.
8. Пат. 1222312 СССР, кл. В 02 С 25/00. Способ автоматического управления агрегатом мокрого измельчения с замкнутым циклом / Андреев.Е. Е., Бойко А, Ю., Златорунская Г, Е, Кузнецов П. В., Матвеев В, Н., Миллер Г, В., Тихонов О. Н. и Щекленн Е, С.; заявитель Ленинградский горный институт им. Г. В. Плеханова. - №1678454; заявл. 11.04.89; опубл. 23.09.91, Бюл. №35.
9. Xiaoling Huang. Production Process Management System for Production Indices Optimization of Mineral Processing / Xiaoling Huang, Yangang Chu, Yi Hu, Tianyou Chai // IFAC – Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang, P.R.China 110004. – 2005.
10. Азарян А. А. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / А. А. Азарян, Ю. Ю. Кривенко, В. Г. Кучер // Вісник Криворізького національного університету, 2014. – Вип.36. – С. 275-280.
11. Вилкул Ю.Г. Анализ качества и объемов добычи железорудного сырья в Украине / Ю. Г. Вилкул, А. А. Азарян, В. А. Колосов // Вісник Криворізького національного університету, 2014. – Вип. 36. – С. 13-18.
12. Нестеров Г.С. Технологическая оптимизация обогатительных фабрик / Г.С. Нестеров – М.: Недра, 1976. – С. 64.
13. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.2 Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб.пособие./ Д. П. Ким – М.: ФИЗМАТЛИТ,2004. – 464с.
14. Зубов В.И. Лекции по теории управления. / Зубов В.И. М., Наука, 1975
15. Олійник В.П. Принципи оптимальності. Рівняння Беллмана / В.П. Олійник // Вінницький національний аграрний університет. – 2013. – 34.
16. Колоділін В.М. Оптимальні системи керування електроприводом промислових установок: конспект лекцій / В.М. Колоділін. – 2014.
17. Методические указания с дисциплины «Теория нелинейных систем автоматического управления» ONLINE.– Режим доступа до електронного ресурсу: <http://lib.znate.ru/docs/index-214429.html?page=5>

Рукопис подано до редакції 14.04.15

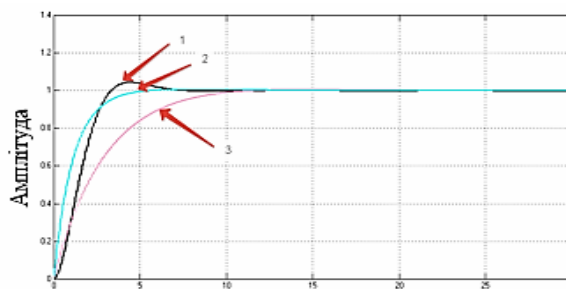


Рис. 4. Перехідні процес у системі керування вмістом заліза у хвостах першої стадії збагачення: 1 - модальний регулятор; 2 - астатичний модальний регулятор; 3 - ПІД-регулятор

Висновки та напрямки подальших досліджень. Отже, результати виконаних досліджень дозволяють зробити висновок, що застосування методів оптимального керування до формування керуючих впливів щодо стадії збагачення залізорудної сировини є доцільним.