

УДК 621.926:534.16

Жамиль Абедельрахим Жамиль Альсаййде,
Е.В. Кочура, д-р техн. наук, проф.Государственное высшее учебное заведение „Националь-
ный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: KochuraE@gmail.com

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ПО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Jamil Abedalrahim Jamil Alsayaydeh,
Ye.V. Kochura, Dr. Sci. (Tech.), ProfessorState Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: KochuraE@gmail.com

AUTOMATIC OPTIMIZATION OF PRODUCTIVITY OF MAGNETIC CONCENTRATION TECHNOLOGICAL COMPLEX

Цель. Научное обоснование возможности автоматической оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения по сигналам электромагнитного поля сепаратора.

Методика. Методика исследований включает экспериментальное определение математической модели комплекса и решение задачи на компьютере. Выполнена постановка задачи оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения железных руд. В качестве критерия оптимизации предложено использовать производительность по магнитному продукту. При этом накладываются односторонние ограничения на массовую долю железа в концентрате и „хвостах“, а также на извлечение железа в концентрат. Задача сформулирована как задача нелинейного программирования. Приводятся результаты решения задачи оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения в составе шаровой мельницы, работающей в замкнутом цикле со спиральным классификатором, последовательно соединенным с группой магнитных сепараторов. Предложено получать информацию о массовых долях железа в руде, концентрате и „хвостах“ по сигналам магниточувствительных элементов, расположенных, соответственно, в зонах подачи питания, выделения концентрата и „хвостов“.

Информацию о производительности комплекса по магнитному продукту получают по сигналам электродвижущей силы электрической катушки, размещенной на полюсном наконечнике в зоне выделения концентрата. Задача оптимизации решена методом Ньютона. Приводится графическая интерпретация решения задачи. Получены оптимальные значения расхода воды в мельницу и классификатор, которые обеспечивают максимальную производительность комплекса при ограничениях на массовую долю железа в концентрате и „хвостах“, а также на извлечение железа в концентрат.

Результаты. Результатами работы являются функциональная схема автоматической оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения и описание обобщенного алгоритма работы системы.

Научная новизна заключается в установлении оптимального соотношения между расходом воды в мельницу и классификатор, которое обеспечивает максимальную производительность комплекса магнитного обогащения с учетом технологических ограничений.

Практическая значимость заключается в разработке алгоритма оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения по производительности, что повышает производительность комплекса не менее, чем на 5%.

Сделан вывод, что применение промышленного сепаратора в качестве источника информации о массовых долях железа в концентрате, „хвостах“ и исходной руде, а также производительности по магнитному продукту дает принципиальную возможность практически решить задачу автоматической оптимизации технологических комплексов магнитного обогащения руды.

Ключевые слова: *автоматический контроль, магнитный сепаратор, магнитный продукт, производительность, электродвижущая сила*

Состояние вопроса. Задача автоматической оптимизации технологических комплексов магнитного обогащения (ТКМО) руд по производительности при ограничениях на массовые доли железа в концентрате и хвостах до настоящего времени является практически не решенной и актуальной. В последнее время предложены методы оптимального управления технологическими комплексами магнитного обогащения с помощью моделей Гаммерштейна [1], нейронных се-

тей [2], Сетей Петри [3]. Однако их реализация является проблематичной в связи с отсутствием надежных датчиков массовых долей железа в руде, концентрате и хвостах, а также датчиков производительности магнитных сепараторов по магнитному продукту.

Постановка задачи. В работе [4] предложено использовать промышленный магнитный сепаратор как автоматический анализатор массовых долей железа в руде, концентрате, хвостах, а в работе [5] как датчик производительности технологического комплекса магнитного обогащения по производительности. С

учетом новых подходов к использованию промышленного магнитного сепаратора как технического средства автоматизации представляется возможным решить задачу автоматической оптимизации магнитного обогащения железных руд.

Целью настоящей работы является научное обоснование возможности автоматической оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения руд по производительности на основе применения промышленного магнитного сепаратора как технического средства автоматизации.

Постановка задачи оптимизации включает выбор целевой функции и ограничений. Если производительность комплекса по переработанной руде Q_0 задается планом, то управляющими воздействиями являются расход воды в мельницу и классификатор, соответственно B_M и B_K . Математически постановка задачи управления ТКМО первой стадии может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} Q_M &\rightarrow \max; \\ Q &= Q_0; \beta \geq \beta_3; \varepsilon \geq C; \nu \leq a; \\ B_{M \min} \leq B_M \leq B_{M \max}; B_{K \min} \leq B_K \leq B_{K \max}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q_M – производительность комплекса по магнитному продукту; Q – производительность комплекса по переработанной руде; Q_0 – плановое значение переработки руды; β – массовая доля железа в концентрате; β_3 – заданное значение массовой доли железа в концентрате по технологической карте; ε, ν – соответственно, извлечение и потери железа в хвостах; a, c – плановые значения технологических параметров обогащения по технологической карте; $B_{M \min}, B_{M \max}, B_{K \min}, B_{K \max}$ – соответственно, минимальные и максимальные допустимые значения расхода воды в мельницу и классификатор.

Методом регрессионного анализа для 22 секции обогатительной фабрики СевГОКа были получены следующие уравнения моделей технологического комплекса магнитного обогащения

$$\begin{aligned} Q_M &= 0,35 - 0,15 \cdot 10^{-6} Q^2 - 0,11 \cdot 10^{-4} B_M^2 - \\ &- 0,2 \cdot 10^{-5} B_K^2 + 0,29 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0,15 \cdot 10^{-3} f_2^2 - \\ &- 0,49 \cdot 10^{-3} f_3^2 - 0,97 \cdot 10^{-3} f_4^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \beta &= 47,0 - 0,19 \cdot 10^{-4} Q^2 + 0,33 \cdot 10^{-2} B_M^2 + \\ &+ 0,69 \cdot 10^{-4} B_K^2 - 0,95 \cdot 10^{-2} \alpha^2 + 0,41 \cdot 10^{-3} f_2^2 + \\ &+ 0,16 \cdot 10^{-1} f_3^2 + 0,109 f_4^2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \nu &= 2,36 - 0,8 \cdot 10^{-6} Q^2 + 0,36 \cdot 10^{-3} B_M^2 + \\ &+ 0,23 \cdot 10^{-4} B_K^2 - 0,3 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0,2 \cdot 10^{-2} f_2^2 + \\ &+ 0,35 \cdot 10^{-2} f_3^2 - 0,29 \cdot 10^{-1} f_4^2; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,78 + 0,72 \cdot 10^{-7} Q^2 - 0,62 \cdot 10^{-5} B_M^2 + \\ &+ 0,1 \cdot 10^{-5} B_K^2 + 0,76 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 0,1 \cdot 10^{-3} f_2^2 - \\ &- 0,29 \cdot 10^{-3} f_3^2 - 0,45 \cdot 10^{-5} f_4^2. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнениях (2) – (4) f_1, f_2 – соответственно, содержание общего и магнитного железа в исходной руде; f_3 – удельная работа дробления исходной руды, по которой оценивается твердость руды; f_4 – средневзвешенная крупность исходной руды. f_1, f_2, f_3, f_4 являются возмущающими воздействиями на процесс обогащения. Уравнения (2) – (5) также являются ограничениями в постановке задачи оптимизации (1).

Целью управления является определение оптимальных управляющих воздействий расхода воды в мельницу B_M и классификатор B_K , удовлетворяющих постановке задачи оптимизации (1) – (5).

Данная задача оптимизации относится к классу задач нелинейного программирования и решалась методом Ньютона. Графически интерпретация решения задачи представлена на рис. 1. Заштрихованная область A_0BCD представляет собой область допустимых значений управляющих воздействий, удовлетворяющих наложенным ограничениям. Кривая целевой функции Q_M касается области допустимых значений в точке A_0 . Координаты точки A_0 соответствуют оптимальным значениям расхода воды в мельницу B_{M0} и классификатор B_{K0} . В нашем случае $B_{M0} = 45 \text{ м}^3/\text{час}$, $B_{K0} = 217 \text{ м}^3/\text{час}$.

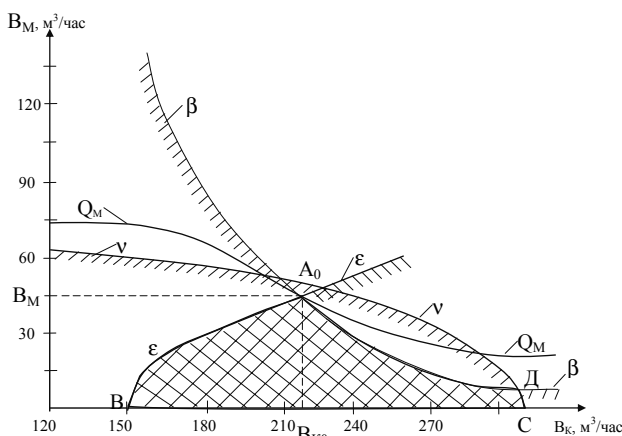


Рис. 1. Графическая интерпретация решения задачи оптимизации комплекса магнитного обогащения по производительности

Функциональная схема системы автоматической оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения представлена на рис. 2.

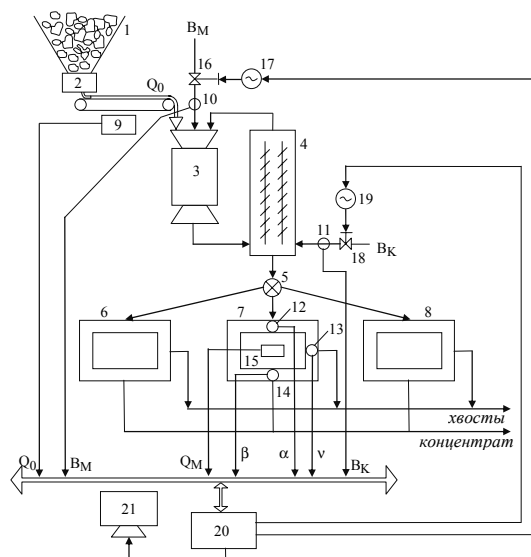


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматической оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения

Обозначения на рис. 2: 1 – бункер с рудой; 2 – вибропитатели; 3 – мельница; 4 – классификатор; 5 – пульподелитель; 6, 7, 8 – магнитные сепараторы; 9 – конвейерные весы; 10, 11 – датчики расхода воды в мельницу и классификатор соответственно; 12, 13, 14 – соответственно, датчики массовой доли железа в исходном питании, хвостах и концентрате; 15 – датчик производительности сепаратора по магнитному продукту; 16, 18 – регулирующие клапаны расхода воды в мельницу и классификатор соответственно; 17, 19 – исполнительные электродвигатели; 20 – промышленная компьютерная рабочая станция; 21 – монитор; Q_0 – сигнал датчика расхода воды в мельницу; B_M , B_K – соответственно, расходы воды в мельницу и классификатор; Q_M – сигналы датчиков производительности магнитных сепараторов по магнитному продукту; β , α , ν – соответственно, сигналы датчиков массовой доли железа в концентрате, исходном питании и хвостах.

Система автоматической оптимизации технологического комплекса магнитного обогащения работает следующим образом. Сигналы с датчиков технологических переменных Q_0 , B_M , β , α , ν , B_K попадают через устройство связи с объектом в промышленную компьютерную рабочую станцию, которая по результатам опроса датчиков методом регрессионного анализа определяет математические модели технологического комплекса вида (2), (3), (4), (5). Затем решается задача оптимизации (1) и находятся оптимальные значения расхода воды в мельницу B_{M0} и классификатор B_{K0} .

Перспективы дальнейших исследований заключаются в рассмотрении предложенного метода оптимизации на технологические комплексы магнитного обогащения вторых и третьих стадий.

Выводы. Применение промышленного магнитного сепаратора в качестве источника информации о массовых долях железа в концентрате, хвостах и исходной

руде, а также производительности по магнитному продукту дает принципиальную возможность решить задачу автоматической оптимизации комплекса магнитного обогащения по магнитному продукту.

Список литературы / References

1. Поркуян О.В. Идентификация объектов управления на основе моделей Гаммерштейна относительно к процессам магнитной сепарации / Поркуян О.В. // Вісник Криворізького технічного університету. – 2007. – №19. – С.77 – 85.

Porkuyan O.V. (2007), “Identification of controlled objects on the basis of Hammerstein models of magnetic separation process”, *Visnyk Kryvorizkoho tekhnichnoho universytetu*, no.19, pp. 77–85.

2. Купін Д.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / Купін Д.І. – К.: Корнійчук, 2008 – 200 с.

Kupin D.I. (2008), *Intelektualna identyfikatsia ta keruvannia v umovakh protsesiv zbahachuvalnoi tehnologii* [Intelligent Identification and Control in Conditions of Concentrating Technologies], Korniiuchuk, Kiev, Ukraine.

3. Хорольский В.П. Управление процессами обогащения руд на основе сетевых моделей Петри / Хорольский В.П., Хоцкіна В.Б., Бабец Е.К. // Науковий вісник НГУ – Дніпропетровськ, 2005 – №8, С.83–87.

Khorolskiy, V.P., Khotskina, V.B. and Babets, Ye.K. (2005), *Process control of ore dressing on basis of Petri net models*, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.8, pp.83–87.

4. Кочура Е.В. Способ автоматического контроля процесса магнитной сепарации. Л.С. 1708420 (СССР). / Кочура Е.В. – Опубл. 30.01.92 Бюл. №4 // Открытия. Изобретения. – 1992.

Kochura, Ye.V. (1992), “Method for automatic control of magnetic separation process”, L.S. 1708420 (USSR). *Otkrytiya. Izobreteniya*, Publ. 30.01.92 Bull. No.4.

5. Кочура Е.В. Теоретические зависимости системы активной мощности приводного двигателя барабана магнитно сепаратора от характеристик концентрата./ Кочура Е.В. // Обогащение руд – №6. – 1994. – С.46–49.

Kochura, Ye.V. (1994), “Theoretical dependence of active power signal of drive motor of magnetic separator bowl on concentrate characteristics”, *Obogashchenie rud*, no.6, pp. 46–49.

Мета. Наукове обґрунтування можливості автоматичної оптимізації технологічного комплексу магнітного збагачення за сигналами електромагнітного поля сепаратора.

Методика. Методика досліджень включає експериментальне визначення математичної моделі комплексу та вирішення задачі на комп'ютері. Виконана постановка задачі оптимізації технологічного комплексу магнітного збагачення залізних руд. В якості критерію оптимізації запропоновано використовувати продуктивність за магнітним продуктом. При цьому накладаються односторонні обмеження на масову частку заліза в концентраті і „хвостах“, а також на вилучення заліза в концентрат. Задача сформульована як задача нелінійного програму-

вання. Наводяться результати рішення задачі оптимізації технологічного комплексу магнітного збагачення в складі кульового млину, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором, послідовно з'єднаним із групою магнітних сепараторів. Запропоновано отримувати інформацію щодо масової частки заліза в руді, концентраті і „хвостах“ за сигналами магніточутливих елементів, розташованих, відповідно, у зонах подачі живлення, виділення концентрату і „хвостів“. Інформацію щодо продуктивності комплексу за магнітним продуктом отримують за сигналами електрорушійної сили електричної котушки, розміщеної на полюсному наконечнику в зоні виділення концентрату. Задача оптимізації вирішена методом Ньютона. Наводиться графічна інтерпретація розв'язання задачі. Отримано оптимальні значення витрати води в млин і класифікатор, які забезпечують максимальну продуктивність комплексу при обмеженнях на масову частку заліза в концентраті і „хвостах“, а також на вилучення заліза в концентрат.

Результати. Результатами роботи є функціональна схема автоматичної оптимізації технологічного комплексу магнітного збагачення і опис узагальненого алгоритму роботи системи.

Наукова новизна полягає у встановленні оптимального співвідношення між витратою води в млин і класифікатор, які забезпечують максимальну продуктивність комплексу магнітного збагачення з урахуванням технологічних обмежень.

Практична значимість полягає в розробці алгоритму оптимізації технологічного комплексу магнітного збагачення за продуктивністю, що підвищує продуктивність комплексу не менше, ніж на 5%.

Зроблено висновок, що застосування промислового сепаратора в якості джерела інформації щодо масової частки заліза в концентраті, „хвостах“ і вихідній руді, а також продуктивності за магнітним продуктом дає принципову можливість практично вирішити завдання автоматичної оптимізації технологічних комплексів магнітного збагачення руди.

Ключові слова: *автоматичний контроль, магнітний сепаратор, магнітний продукт, продуктивність, електрорушійна сила*

Purpose. To give scientific substantiation of the possibility of the automatic optimization of the technological complex of the iron ore magnetic separation by the signals of electromagnetic field of the separator.

Methodology. It involves experimental determination of the mathematical model of the complex and computational solution of the problem. Problem of optimization of technological complex of iron ore magnetic separation was raised. It is proposed to use performance by magnetic product as an optimization criterion. Unilateral restrictions should be imposed on the mass fraction of iron in concentrate and in tailings, as well as on the extraction of iron to concentrate. The problem was formulated as a nonlinear programming task. Results of the optimization problem solution of magnetic concentration complex that involves ball crusher, operating in closed loop with spiral classifier concatenated with a group of magnetic separators are given. It is proposed to use signals of magneto-sensitive elements, located in areas of ore feeding and concentrate and rejects separations, as an information source of mass fractions of iron in ore, concentrate and rejects, respectively. The optimization problem is solved by Newton's method. Graphic interpretation of the solution is shown. There have been derived an optimal values of water consumption for the mill and the classifier, which provide maximum complex productivity with constraints on mass fractions of iron in concentrate and rejects, as well as with extraction of iron into concentrate limitation.

Findings. Functional diagram of automatic optimization of the technological complex of magnetic separation as well as description of generalized algorithm of system operation are the results of the research.

Originality. The optimal balance between the water consumptions by the mill and by the classifier was established. This provides maximum performance of the magnetic concentration complex taking into account technological limitations.

Practical value. The optimization algorithm of the magnetic concentration complex was designed. It improves the performance of the complex by at least 5%. Conclusions are drawn that the usage of industrial separator as a source of information on the mass fractions of iron in concentrate, tails and ore, as well as on the performance by magnetic product, gives the possibility for practical solution of the problem of automatic optimization of technological complexes of iron ore magnetic separation.

Keywords: *automatic control, magnetic separator, magnetic product, performance, electromotive force*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Ткачовим. Дата надходження рукопису 12.01.12.

Редакция журнала сообщает о том, что в выпусках журнала „Научный вестник Национального горного университета“ №6 за 2011 год и №1 за 2012 год ФИО автора Жамиль Абдельрахим Жамиль Альсайаиде на английском языке были приведены в транслитерации с русского языка в соответствии с общими требованиями – Zhamil Abdelrahim Zhamil Alsaiaide. В выпуске №3 за 2012 год и в последующих выпусках ФИО автора будут даны в оригинальном написании – **Jamil Abdealrahim Jamil Alsayaydeh**.

Читателям следует иметь в виду, что в обоих случаях речь идет об одном и том же авторе. Редакция журнала приносит свои извинения за причиненные неудобства.

Editorial office of the journal “Scientific Bulletin of National Mining University” informs that in the issue no.6 published in 2011 and in the issue no.1 published in 2012, the name of author Jamil Abdealrahim Jamil Alsayaydeh was given in transliteration from Cyrillic into Roman alphabet, Zhamil Abdelrahim Zhamil Alsaiaide, instead of the original spelling. In the issue no.3 published in 2012 and in further issues the name will be written in the original spelling **Jamil Abdealrahim Jamil Alsayaydeh**.

We apologize for the inconveniences and would like to emphasize that in both cases the authorship belongs to the same person.