

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ МЕЛЬНИЦЫ МОКРОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Н.В. Осипова

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: nvo86@mail.ru

**Аннотация:** Приведены основные проблемы, возникающие при управлении измельчительным агрегатом, работающим в замкнутом цикле с классификатором. Представлен обзор известных решений в области автоматического управления загрузкой мельниц. Показано, что основными алгоритмами при автоматизации работы данного агрегата являются экстремальное и пропорциональное регулирование с наблюдателем твердости руды. Приведено краткое описание методов контроля внутримельничного заполнения. Сформулированы основные требования для совершенствования системы стабилизации загрузки мельницы. Дано математическое описание отдельных составляющих комплекса: двигателя пластинчатого питателя, конвейера, мельницы мокрого самоизмельчения, классификатора, бутары. Представлены оценки коэффициентов в уравнениях модели, их математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение. Сформулирована цель оптимального управления процессом измельчения, для достижения которой выбран метод динамического программирования Беллмана. Показан интегральный критерий управления и методика вычисления весовых коэффициентов. Приведен алгоритм расчета оптимального управляющего воздействия — напряжения на щетках двигателя привода питателя, от которого зависит скорость вращения вала и, следовательно, расход руды на конвейер. Управление является функцией загрузки мельницы, контролируемой косвенно по показаниям сигнала активной составляющей мощности на частоте колебаний центра тяжести рудной нагрузки, и расхода песков, определяемого по току двигателя классификатора. Выполнено моделирование системы оптимального управления в среде Matlab с имитацией поступления руды с различными физико-механическими свойствами при помощи изменения коэффициентов передачи в модель, описывающую динамические процессы в мельнице.

**Ключевые слова:** пластинчатый питатель, мельница, классификатор, выход готового класса, оптимальное управление, интегральный критерий, метод динамического программирования Беллмана, Matlab, нормальный закон распределения.

**Для цитирования:** Осипова Н. В. Выбор параметров алгоритма управления загрузкой мельницы мокрого самоизмельчения железной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 146–156. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_146.

### Selecting parameters of feed control algorithm for wet autogenous mill for grinding iron ore

N.V. Osipova

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: nvo86@mail.ru

---

**Abstract:** The main problems connected with control of grinding machines in closed-loop operation with classifiers are listed. The known solutions in automatic control over mill feed are reviewed. The main algorithms for milling machine automation are the optimizing control and proportional control with hardness observance. The methods to control the mill fill are briefly described. The basic requirements of the mill fill stabilization improvement are formulated. The mathematical description is given for the system components, including an apron feeder motor, a conveyor, a wet autogenous mill, a classifier and a washing drum. The estimates of the model equation coefficients, their mathematical expectations and the standard deviations are presented. The optimizing control of milling is set as an objective, and the method of dynamic programming by Bellman is chosen to this effect. The integrated control criterion and the weight number calculation procedure are described. The computation algorithm is presented for the optimized command variable—feeder drive brush voltage which governs the shaft speed and, consequently, the ore flow rate to the conveyor. Control is a function of the mill feed indirectly monitored by the readings of active component wattage signal at vibration frequency of the ore load center and by the ground product flow rate determined from the classifier motor current. The system control optimization is modeled in Matlab with simulation of feed of ore having different physical and mechanical properties by means of varying the coefficients in the model of dynamic processes in the mill.

**Key words:** apron feeder, mill, classifier, finished size yield, optimal control, integrated criterion, dynamic programming method by Bellman, Matlab, normal distribution law.

**For citation:** Osipova N. V. Selecting parameters of feed control algorithm for wet autogenous mill for grinding iron ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):146-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_146.

---

## Введение

В последние годы намечается тенденция к внедрению цифровых технологий в различных производственных сферах. Одним из важнейших секторов экономики Российской Федерации были и остаются горно-обогатительные предприятия. При этом в добычу и переработку все больше вовлекаются бедные рудные ископаемые. Поэтому главная задача состоит в оптимальном ведении технологических процессов с целью получения из труднообогатимого сырья продукции, удовлетворяющей техническим условиям.

Особенно важную роль играет создание точных прогнозирующих моделей на предприятиях, которые могут описывать поведение отдельных узлов и агрегатов, отражать динамику качест-

венно-количественных показателей процесса. Наибольший интерес представляет моделирование систем автоматического управления объектами. Такой подход позволит оценить качество процесса управления, проверить правильность настройки и степень отклонения регулируемой величины от заданного значения при нестабильной работе агрегатов.

Среди всех обогатительных процессов самым энергоемким является измельчение. На него приходится около 50% всех энергозатрат и расходуется примерно 26 кВт·ч на одну тонну руды. Поэтому грамотное управление измельчительным агрегатом способствует снижению энергоемкости помола и получению требуемого гранулометрического состава измельченного материала.

## Обзор исследований

Автоматизация процесса измельчения осуществляется за счет использования как минимум трех подсистем: стабилизации внутримельничного заполнения, соотношения «руда-вода» и плотности слива классификатора [1].

Наибольшее распространение получили научные разработки, связанные с реализацией первой подсистемы.

В работе [2] рассмотрено устройство диагностики состояния барабанных мельниц самоизмельчения. Оно имеет два канала. Первый предназначен для выделения из сигнала активной мощности сигнала на частоте вращения барабана мельницы, а второй — для выделения сигнала на частоте колебаний центра тяжести рудной нагрузки. Показания первого канала связаны линейно с внутримельничным заполнением с обратным знаком, а другого канала — нелинейно в виде параболы, которая имеет максимум при определенном значении процента готового класса в сливе мельницы. Для управления процессом измельчения используется система экстремального регулирования. Если знаки приращений обоих каналов, измеренных за определенное время, одинаковы, то это соответствует перегрузке мельницы. Тогда расход руды на конвейер уменьшают до минимально допустимого значения, и мельница разгружается, в противном случае, его увеличивают до максимально возможного. Главные недостатки экстремального управления заключаются в сложности выбора шага управления как по амплитуде, так и по времени, что влияет на скорость выхода в зону экстремума. Если частота дрейфа статических характеристик мельницы выше частоты поиска экстремума, то теряется устойчивость.

Работа [3] посвящена построению системы управления загрузкой измельчительного агрегата, измеряемой кос-

венно по активной мощности привода мельницы мокрого самоизмельчения (ММС). Идея состоит в синтезе регулятора с наблюдателем Луенбергера, который оценивает твердость руды. Закон управления расходом руды в мельницу формируется пропорционально измеряемой координате состояния — мощности — и оцененной наблюдателем твердости. Основные проблемы данной разработки состоят в следующем. Во-первых, не учитывается циркулирующая нагрузка и другие физико-механические свойства руды помимо твердости. Во-вторых, при синтезе регулятора модель измельчительного комплекса принимается линейной, хотя на практике это не выполняется. В частности, осуществляется линеаризация зависимости активной мощности мельницы от ее заполнения в рабочей точке, лежащей на возрастающем участке функции, которая аппроксимируется параболой с экстремумом в виде максимума. При воздействии неконтролируемых возмущений значения мощности могут проходить через экстремум и становиться обратно пропорциональными загрузке, и этот показатель падает. Поскольку регулятор настроен на прямо пропорциональную зависимость, он вырабатывает управляющее воздействие, направленное на увеличение мощности, то есть увеличивает подачу руды, что вызывает еще большее падение мощности. Таким образом, система управления теряет устойчивость.

Большой вклад в создание систем автоматического управления комплексом «мельница-классификатор» внесли разработки АО «Союзцветметавтоматика» [4], где рассмотрены задачи оптимального управления процессом измельчения и классификации с возможностью косвенных измерений возмущающих воздействий, нарушающих ход технологического процесса. В данной орга-

низации созданы такие технические средства для автоматизации, как гранулометр ПИК-0,74П, измеряющий гранулометрический состав измельченной руды, виброакустические анализаторы ВАЗМ-1, ВАЗМ-1У, ВАЗМ-1М, контролирующие загрузку мельниц, позволяющие прогнозировать ее перегруз и оценивать измельчаемость руды.

Основываясь на вышеизложенном материале, выделим основные требования для совершенствования системы стабилизации загрузки мельницы: система должна обеспечить максимумы производительности по готовому классу и выхода готового класса. В данной работе предполагается использовать нелинейную модель объекта с учетом измерения циркулирующей нагрузки.

### Математическая модель измельчительного комплекса

Объектом для автоматизации выберем измельчительный комплекс, включающий мельницу мокрого самоизмельчения ММС 70×23, односпиральный классификатор 1-КСН-24Б. Они находят широкое применение на железорудных обогатительных фабриках Курской магнитной аномалии.

Рассмотрим функционирование процесса измельчения. С бункера руда, прошедшая дробление, размером не более 350 мм, поступает на пластинчатый питатель. С помощью горизонтального и наклонного конвейеров рудный материал перемещается в мельницу. На ее выходе имеется бутара с отверстиями диаметра 24–26 мм для выделения гальки и готового продукта. В зависимости от положения шибера рудная галька может использоваться как измельчающая среда для мельницы второй стадии либо направляться обратно на первую стадию возвратным конвейером. Мельница работает в замкнутом цикле со спиральным классификатором, обеспечивающим

возврат крупного класса (пески) на доизмельчение обратно в мельницу. Слив классификатора поступает в процесс магнитной сепарации.

Составим математическое описание отдельных составляющих комплекса.

По данным эксплуатации двигателей питателей, их постоянная времени примерно равна  $T_{ДВ} \approx 0,01$  мин. Так как  $T_{ДВ}$  на несколько порядков меньше постоянной времени измельчительного агрегата, то модель питателя можно представить в виде безынерционного звена:

$$Q_p(t) = kU(t), \quad (1)$$

где  $k = 4,995$  т/ч/В;  $U$  – напряжение питателя, В.

Модель конвейеров представляет собой звено запаздывания величиной 0,2 мин, что также намного меньше длительности переходных процессов в мельнице. Поэтому при моделировании ими пренебрегаем.

Работу мельницы можно описать уравнением вида:

$$T_M \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_M Q_{ex}, \quad (2)$$

где  $Q_{ex}$  – расход материала на входе мельницы, т/ч;  $\varphi$  – степень заполнения мельницы, %;  $T_M$  – постоянная времени мельницы, ч;  $k_M$  – коэффициент передачи мельницы, %/(т/ч).

Расход руды на выходе мельницы  $Q_{вых}$  можно выразить, используя уравнение материального баланса:

$$k_{M'} \frac{d\varphi}{dt} = Q_{ex} - Q_{вых}. \quad (3)$$

Коэффициент  $k_{M'}$  показывает, сколько тонн руды приходится на один процент заполнения.

Выражая  $Q_{вых}$  из (2) и, подставляя в (3), получим:

$$Q_{вых} = \left( \frac{T_M}{k_M} - k_{M'} \right) \frac{d\varphi}{dt} + \frac{1}{k_M} \varphi \quad (4)$$

Показания одного из каналов прибора  $I$ , выделяющего сигнал активной мощности ММС, контролирующего загрузку  $\varphi$ , связаны с ней нелинейной функцией вида:

$$I = A(\varphi - B)^2 + C, \quad (5)$$

а выход готового класса  $-0,071$  мм  $g_{-0,071}$  линейно зависит от  $I$ :

$$g_{-0,071} = DI + E. \quad (6)$$

Бутора разделяет выходной поток мельницы  $Q_{\text{вых}}$  на слив  $Q_{\text{сл.м}}$  и рудную галю, связанные соотношением:

$$Q_{\text{сл.м}}(t) = k_6 Q_{\text{вых}}(t). \quad (7)$$

При составлении модели классификатора примем допущение, что он идеально разделяет по классу  $-0,071$  мм. В связи с этим производительность по готовому классу  $Q_{\text{сл.кл}}$  можно определить путем умножения  $Q_{\text{сл.м}}$  на  $g_{-0,071}$ :

$$Q_{\text{сл.кл}} = Q_{\text{сл.м}} \cdot g_{-0,071}. \quad (8)$$

Расход песков классификатора  $Q_{\text{п}}$  представляет собой разницу расхода на сливе мельницы и слива классификатора:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{сл.м}} - Q_{\text{сл.кл}}. \quad (9)$$

Поток песков суммируется с потоком исходной руды, подаваемой в мельницу с конвейера  $Q_{\text{п}}$ .

Параметры  $k_{\text{м}}, T_{\text{м}}, k_{\text{м}}, k_6, A, B, C, D, E$  были определены экспериментально в работе [2]. Их математические ожидания составляют  $k_{\text{м}} = 0,262 \text{ \%}/(\tau/\text{ч})$ ;  $T_{\text{м}} = 0,139 \text{ ч}$ ;  $k_{\text{м}} = 1,174 \text{ т/\%}$ ;  $k_6 = 0,865$ ;  $A = -0,0055 \text{ А/(\%)}^2$ ;  $B = 42,78\%$ ;  $C = 1,91 \text{ А}$ ;  $D = 0,2656 \text{ А}^{-1}$ ;  $E = 0,2212$ .

### Оптимальное управление загрузкой мельницы

При идеальном разделении классификатором рудного материала можно полагать, что в установленном режиме работы мельницы  $Q_{\text{п}}$  прямо пропорционально  $Q_{\text{сл.кл}}$ . А его расход по сливу  $Q_{\text{сл.кл}}$

будет являться производительностью по готовому классу  $-0,071$  мм  $Q_{-0,071}$ . Следовательно, для правильного управления мельницей достаточно максимизировать управление  $Q_{\text{п}}$ , манипулируя напряжением двигателя питателя  $U$ .

Поскольку коэффициент  $A$  в выражении (5) отрицателен, то показания прибора  $I$  имеют максимум при заполнении 42,78%. Так как значения  $g_{-0,071}$  прямо пропорциональны  $I$ , то, чтобы получить наибольший выход  $g_{-0,071}$ , достаточно поддерживать параметр  $I$  на экстремуме.

Обобщая вышеизложенное, сформулируем цель управления ММС:

$$U \rightarrow \max \\ I \rightarrow \max \quad (10)$$

Задачу оптимального управления объектом при одновременном поддержании на экстремальном значении управляющего воздействия и выходного показателя позволяет решить метод динамического программирования Беллмана [5–7].

Он использует интегральный критерий, который для управления ММС имеет вид:

$$J(I, U, t) = \int_{t_0}^{t_k} (R_1 U + R_2 I) dt \quad (11)$$

где  $R_1, R_2$  — неотрицательно и положительно определенные коэффициенты соответственно.

Необходимо найти такое оптимальное управление  $U^*$ , которое при воздействии неконтролируемых возмущений на объект, могло бы перевести систему обратно в заданное состояние, соответствующее наибольшей производительности и выходу готового класса за время регулирования  $t_{\text{рег}} = t_k - t_0$  так, чтобы функционал качества (11) принимал максимальное значение.

Весовые коэффициенты  $R_1$  и  $R_2$  задают ограничения на  $I$  и  $U$ . Их рекомендуют вычислять как величины, обрат-

ные допустимым значениям  $I_{\text{доп}}$  и  $U_{\text{доп}}$  переменных  $I$  и  $U$  под знаком интеграла (11) и времени  $t_{\text{пер}}$  [8]:

$$R_1 = \frac{1}{t_{\text{пер}} U_{\text{доп}}}, R_2 = \frac{1}{t_{\text{пер}} I_{\text{доп}}}. \quad (12)$$

Эти граничные значения равны  $U_{\text{доп}} = 13,75$  В,  $I_{\text{доп}} = 1,15$  А. Время регулирования примем равным 0,5 ч. Тогда  $R_1 = 0,15$  (ч·В)<sup>-1</sup>,  $R_2 = 1,74$  (ч·А)<sup>-1</sup>.

Если рассматривать мельницу, работающую в открытом цикле, и принять расход песков классификатора как внешнее возмущение, то в выражении (2)  $Q_{\text{вх}} = Q_p = kU$ . Загрузка  $\varphi$  связана с показаниями  $I$  безынерционно, поэтому при изменении управляющего воздействия  $U$  инерционность  $I$  будет такая же, как и у  $\varphi$ , определяемая постоянной времени  $T_m$ . В установившемся режиме  $\varphi = k k_m U$ . Подставляя это в выражение (5) и, учитывая инерционность и расход песков, получим:

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{1}{T}I + \frac{1}{T}A(k_m(kU + Q_n) - B)^2 + \frac{1}{T}C \quad (13)$$

Определение оптимального управления по методу динамического программирования Беллмана имеет следующий алгоритм:

1. составить функцию Беллмана:

$$\begin{aligned} B\left(I, U, \frac{\partial S(I, t)}{\partial I}, t\right) &= F(I, U, t) + \frac{dS(I, t)}{dt} \frac{dl}{dt} = \\ &= R_1 U + R_2 I + \frac{dS(I, t)}{dt} \cdot \left(-\frac{1}{T}I + \frac{1}{T}A(k_m(kU + Q_n) - B)^2 + \frac{1}{T}C\right), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $F(I, U, t) = R_1 I + R_2 U$ ,

2. максимизировать эту функцию по управлению, найдя при этом оптимальное управление:

$$U^*(t, I, Q_n) = 32,6892 - 0,2Q_n + 1,07 \left(\frac{\partial S(I, t)}{\partial I}\right)^{-1} \quad (15)$$

Пески классификатора можно измерить косвенно по току его двигателя. Для решения задачи оптимального управления остается найти  $\partial S(I, t)/\partial I$ .

Для этого нужно подставить в функцию Беллмана (14) вместо  $U$  найденное  $U^*$ , приравнять ее к нулю и решить полученное уравнение относительно  $\partial S(I, t)/\partial I$ . Оно будет иметь два решения, из которых устойчиво только одно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(I, t)}{\partial I} &= \frac{0,33 + 0,12I - 0,002Q_n}{(-1,9 + I)} + \\ &+ \frac{0,3(0,976 + I + 0,16I^2 + 4,517 \cdot 10^{-5}Q_n^2 - 0,0148Q_n - 0,005IQ_n)^{0,5}}{(-1,9 + I)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Оптимальное управления находится подстановкой (16) в (15).

### Результаты моделирования

Математическая модель функционирования комплекса «мельница-классификатор» и алгоритм расчета оптимального управления реализованы на языке пакета прикладных программ Matlab [9, 10].

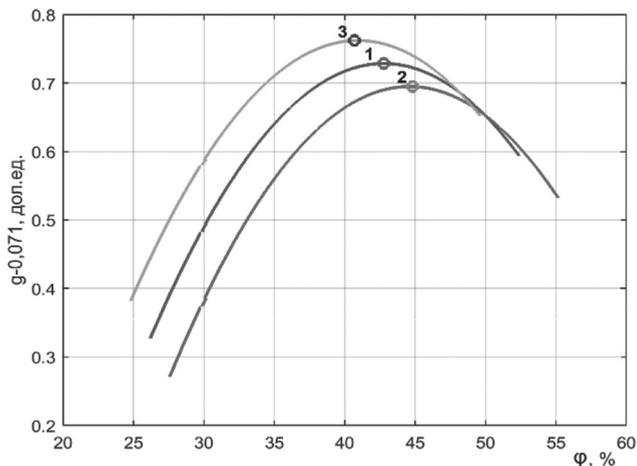


Рис. 1. Положение рабочей точки на статической характеристике, отражающей зависимость выхода готового класса  $-0,071$  мм  $g_{-0,071}$  от загрузки мельницы  $\phi$  при оптимальном управлении в условиях дрейфа: 1 – (42,78; 0,729), 2 – (44,83; 0,695), 3 – (40,69; 0,762)

Fig. 1. Position of operating point in dc characteristic reflective of relationship between yield of finished size  $-0,071$  mm  $g_{-0,071}$  and mill fill  $\phi$  in optimal control under drifting: 1 – (42,78; 0,729), 2 – (44,83; 0,695), 3 – (40,69; 0,762)

Смоделировано три варианта работы комплекса при поступлении руды с различными физико-механическими свойствами, нестабильность которых допускается имитировать изменением

коэффициента передачи мельницы  $k_M$  [11, 12] и констант  $B, C$  в формуле (5). Это можно осуществить генератором случайных чисел с нормальным законом распределения. В работе [2] было

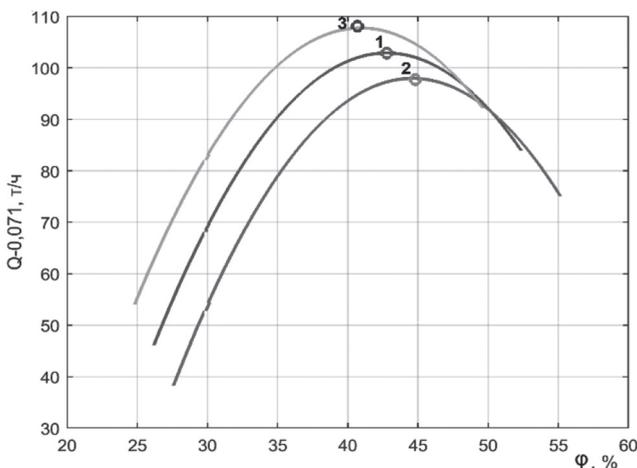


Рис. 2. Положение рабочей точки на статической характеристике, отражающей зависимость производительности по готовому классу  $-0,071$  мм  $Q_{-0,071}$  от загрузки мельницы  $\phi$  при оптимальном управлении в условиях дрейфа: 1 – (42,78; 102,9), 2 – (44,83; 97,7), 3 – (40,69; 108)

Fig. 2. Position of operating point in dc characteristic reflective of relationship between output rate of finished size  $-0,071$  mm  $Q_{-0,071}$  and mill fill  $\phi$  in optimal control under drifting: 1 – (42,78; 102,9), 2 – (44,83; 97,7), 3 – (40,69; 108)

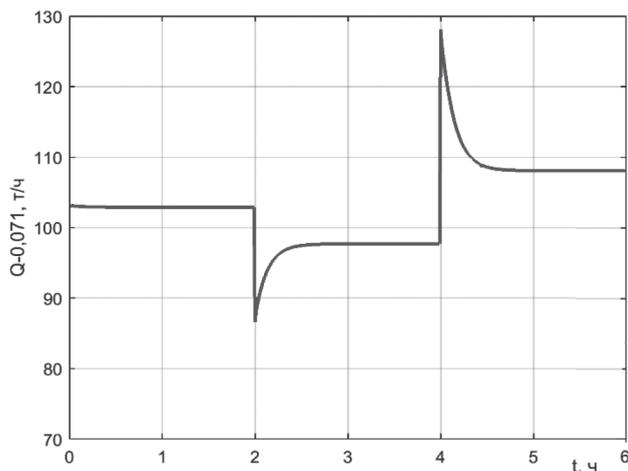


Рис. 3. Переходные процессы производительности мельницы по готовому классу  $Q_{-0.071}$  при оптимальном управлении и поступлении руды с различными свойствами в моменты времени 2 ч и 4 ч  
 Fig. 3. Transitional productivity of mill in terms of finished size  $Q_{-0.071}$  in optimal control with feed of ore having different properties at time moments of 2 and 4 h

показано, что среднеквадратичные отклонения  $k_M$  и  $B, C$  равны 0,046 %/(т/ч); 2,29% и 0,25. А соответственно.

В модели свойства менялись каждые 2 ч. Статические характеристики, отражающие взаимосвязи  $g_{-0.071}(\varphi)$  и  $Q_{-0.071}(\varphi)$ , представлены на рис. 1, 2.

Поясним результаты моделирования. На интервале времени 0–2 ч были заданы средние значения  $k_M$  и  $B, C$ . Эти параметры соответствуют точке 1 на рис. 1, 2, для которой  $g_{-0.071}$  равен 0,729 дол. ед., а  $Q_{-0.071}$  равен 102,9 т/ч. Далее в моменты времени 2–4 ч свой-

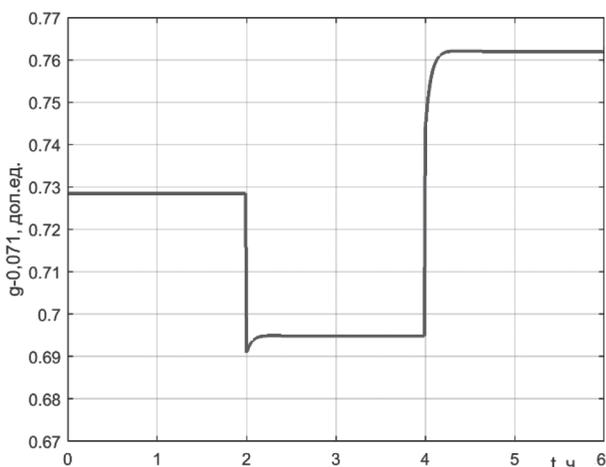


Рис. 4. Переходные процессы выхода готового класса  $g_{-0.071}$  при оптимальном управлении и поступлении руды с различным свойствам в моменты времени 2 ч и 4 ч  
 Fig. 4. Transitional productivity of mill in terms of finished size  $g_{-0.071}$  in optimal control with feed of ore having different properties at time moments of 2 and 4 h

ства руды поменялись так, что  $k_m$  увеличился до 0,276 %/(т/ч), значение константы  $B$  в уравнении (5) увеличилось с 42,78% до 44,83%, а значение  $C$  снизилось с 1,91 А до 1,76 А. Произошло небольшое уменьшение  $Q_{-0,071}$  от 102,9 т/ч до 97,7 т/ч (рис. 3) и выхода готового класса  $g_{-0,071}$  от 0,729 дол. ед. до 0,695 дол. ед. (рис. 4). Это соответствует движению от точки 1 к точке 2 на рис. 1, 2 статических характеристик, большей загрузки мельницы и, следовательно, большей производительности по исходной руде, чем могло быть, если бы  $\varphi$  осталась постоянной. На интервале 4–6 ч происходит обратный процесс:  $k_m$  уменьшается до 0,248 %/(т/ч).  $B$  становится равной 40,69%, а  $C$  – 2 А,  $Q_{-0,071}$  увеличивается с 97,7 т/ч до 108 т/ч,  $g_{-0,071}$  возрастает до 0,762 дол. ед. На статических характеристиках это отражает смещение рабочей точки вверх (точка 3 на рис. 1, 2).

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. Установившиеся значения переходных процессов по готовому классу 0,729 дол. ед., 0,695 дол. ед., 0,762 дол. ед. и производительности по готовому классу 102,9 т/ч, 97,7 т/ч, 108 т/ч примерно соответствуют максимальным значениям этих же показателей на статических характеристиках мельницы. Максимальная абсолютная ошибка расхождения составляет  $10^{-3}$  дол. ед. для готового класса и 0,3 т/ч для производительности по готовому классу, что на несколько порядков меньше представленных выше значений. Она определяется настройками параметров округления результатов и точности вычисления пакета Matlab, заданных по умолчанию.

Использование метода динамического программирования позволяет достичь поставленную цель управления загрузкой мельницы: обеспечить максимумы производительности по готовому классу и выхода готового класса в условиях

дрейфа статических характеристик измельчительного агрегата, вызванного нестабильностью свойств руды, которая имитировалась изменением коэффициентов в модели мельницы. Таким образом, сделанные выводы подтверждают адекватность разработанной модели и правильность расчета оптимального управления.

### Перспективы исследований

Следует отметить, что управление было рассчитано, исходя из средних значений коэффициентов модели ММС, которые в действительности могут отклоняться на величину большую, чем показано при моделировании. Из-за этого не всегда удастся удерживать рабочую точку строго в экстремуме. Использование метода динамического программирования Беллмана позволяет поддерживать производительность по готовому классу  $-0,071$  мм и выход готового класса на оптимальном уровне на столько, на сколько это возможно для заданного типа руды, характеризующегося различными физико-механическими свойствами.

Разработанная модель управления рекомендуется к использованию для фабрик со стабильным производством, где руда меняется не очень сильно или нечасто, либо там, где есть хорошие алгоритмы для ее усреднения по свойствам. Поэтому перспективными направлениями являются разработка метода идентификации параметров модели и перерасчет оптимального управления, исходя из новых значений коэффициентов, в автоматическом режиме.

### Заключение

Автором была разработана математическая модель управления загрузкой мельницы ММС, работающей в замкнутом цикле с классификатором. Выбраны параметры алгоритма управления. Его

особенностью является то, что вырабатывается оптимальное управляющее воздействие на питатель, регулирующий расход руды на конвейер, которая направляется в измельчительный комплекс. За счет использования метода динамического программирования получено управление как функция от показаний прибора контроля загрузки ММС и расхода песков классификатора. При изменении свойств руды, заключающееся в варьировании коэффициентов передачи в модели между расходом руды и загрузкой ММС, а также в дрейфе статической характеристики прибора контроля ее заполнения вдоль оси абсцисс и ординат, управление выводит измель-

чительный комплекс на оптимальный режим работы. Поддерживается максимальный выход готового класса и производительность по готовому классу.

Данная модель используется в НИТУ «МИСиС» в учебном процессе на кафедре Инфокоммуникационных технологий в рамках подготовки магистров направления «Управление в технических системах». Разработанный алгоритм легко применить при симуляции работы программируемых логических контроллеров и демонстрации переходных характеристик работы мельницы на экранах SCADA-системы для обучения студентов на лабораторных стендах и тренажерах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. — М.: ИД «Руда и Металлы», 2013. — 512 с.
2. Новицкий И. В. Разработка автоматических устройств технологической диагностики для оптимального управления барабанными мельницами самоизмельчения руд: Дис. ... канд. техн. наук. — Днепропетровск: ДГИ, 1984. — 200 с.
3. Тараненко Н. В. Автоматизированная система управления технологическим процессом измельчения руды в мельницах мокрого самоизмельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 10. — С. 369–372.
4. Соколов И. В., Шапировский М. Р., Кузяков А. В. Опыт создания автоматических систем оптимального управления технологическими процессами (комплексами измельчения) // Цветные металлы. — 2015. — № 9. — С. 53–57. DOI: 10.17580/tsm.2015.09.08.
5. Певзнер Л. Д. Теория систем управления. — СПб.: Изд-во «Лань». — 2018. — 420 с.
6. Calogero A. Notes on optimal control theory. Dipartimento di Matematica e Applicazioni, 2020. 158 p.
7. Derong Liu, Qinglai Wei, Ding Wang, Xiong Yang, Hongliang Li Adaptive dynamic programming with applications in optimal control. Springer International Publishing AG, 2017. 594 p.
8. Романова И. К. Об одном подходе к определению весовых коэффициентов метода пространства состояний // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2015. — № 4. — С. 105–129. DOI: 10.7463/0415.0763768.
9. Eihab B. M. Bashier. Practical numerical and scientific computing with MATLAB and Python. CRC Press, 2020. 345 p.
10. Manohar Sukhija, Tusar Nagsarkar Matlab applications for circuit and network analysis. Kindle Direct Publishing, 2020. 856 p.
11. Ананьев П. П., Осипова Н. В. Исследование модели функционирования измельчительного комплекса с применением импульсной электромагнитной обработки руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 11. — С. 236–239.
12. Осипова Н. В. Система автоматического управления измельчительным комплексом с применением импульсной электромагнитной обработки руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № S4-17. — С. 3–10. **ПАБ**

## REFERENCES

1. Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. YA., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Development and application of automated control systems for mineral processing processes], Moscow, ID «Ruda i Metally», 2013, 512 p.
2. Novitskiy I. V. *Razrabotka avtomaticheskikh ustroystv tekhnologicheskoy diagnostiki dlya optimal'nogo upravleniya barabannymi mel'nitsami samoizmel'cheniya rud* [Development of automatic technological diagnostics devices for optimal control of self-grinding drum mills], Candidate's thesis, Dnepropetrovsk, DGI, 1984. 200 p.
3. Taranenko N. V. Automated control system for the technological process of ore grinding in wet self-grinding mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 10, pp. 369–372. [In Russ].
4. Sokolov I. V., Shapirovskiy M. R., Kuzyakov A. V. Experience of technological processes optimal control (milling complexes) automated systems creation. *Tsvetnye metally.* 2015, no. 9, pp. 53–57. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2015.09.08.
5. Pevzner L. D. *Teoriya sistem upravleniya* [Theory of control systems], Saint-Petersburg, Izd-vo «Lan'». 2018, 420 p.
6. Calogero A. *Notes on optimal control theory.* Dipartimento di Matematica e Applicazioni, 2020. 158 p.
7. Derong Liu, Qinglai Wei, Ding Wang, Xiong Yang, Hongliang Li *Adaptive dynamic programming with applications in optimal control.* Springer International Publishing AG, 2017. 594 p.
8. Romanova I. K. About one approach to determine the weights of the state space method. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana.* 2015, no. 4, pp. 105–129. [In Russ]. DOI: 10.7463/0415.0763768.
9. Eihab B. M. *Bashier. Practical numerical and scientific computing with MATLAB and Python.* CRC Press, 2020. 345 p.
10. Manohar Sukhija, Tusar Nagsarkar *Matlab applications for circuit and network analysis.* Kindle Direct Publishing, 2020. 856 p.
11. Anan'ev P. P., Osipova N. V. Study of the model of functioning of the grinding complex using pulsed electromagnetic ore processing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 11, pp. 236–239. [In Russ].
12. Osipova N. V. An automatic control system for milling with the use of pulsed electromagnetic processing of ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. S4-17, pp. 3–10. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Осипова Нина Витальевна – канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: nvo86@mail.ru, НИТУ «МИСиС».

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

N.V. Osipova, Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor, e-mail: nvo86@mail.ru,  
National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 21.01.2021; принята к печати 10.09.2021.  
Received by the editors 15.12.2020; received after the review 21.01.2021; accepted for printing 10.09.2021.

