

*А.В. Герасина, канд. техн. наук, В.И. Корниенко, д-р. техн. наук  
(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»)*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РУДОПОДГОТОВКИ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПО МЕТОДУ ВАРИАЦИИ СТРУКТУР**

### **Введение**

Особенностью нелинейных процессов рудоподготовки (крупнокускового дробления (ККД) и мокрого самоизмельчения (МСИ)) является наличие в них различных динамических режимов работы. Это обуславливает необходимость решения задачи идентификации управляемых процессов не только на стадии проектирования, но и в процессе функционирования их АСУТП.

### **Постановка задачи**

Одной из основных проблем при решении задачи идентификации объекта управления (ОУ) является выбор типа структуры модели. Наиболее продуктивным является определение структуры модели ОУ на основе наблюдений его входных и выходных переменных с использованием аппроксимаций в виде блочно-ориентированных моделей.

В результате исследования метода [1], позволяющего определить режим функционирования ОУ, его размерность, а затем с помощью процедуры идентификации рассчитать структурные характеристики и параметры модели ОУ, установлено, что в методе не обоснован выбор типа структуры моделей ОУ при изменении их режимов работы. Также в данном методе выполнение процедуры структурно-параметрическую идентификации предполагается проводить в режиме реального времени, что не является целесообразным, поскольку для управляемых процессов она проводится несколько часов.

В работе [2] предложено обосновать выбор типа структур моделей ОУ путем исследования вариации их типов, что позволяет, в отличие от метода [1], повысить точность идентификации для разных режимов функционирования со снижением ошибок интеллектуальных прогнозирующих моделей. Также предложено включить в метод вариации структур [2] определение параметра Херста как критерий перехода к процедуре структурно-параметрической идентификации ОУ. При этом параметрическую идентификацию предложено проводить в режиме реального времени, а структурно-параметрическую – планировать, то есть выполнять ее в периоды небольшой нагрузки на вычислительные устройства и распределять между ними, и таким образом, снизить требования к их производительности и вычислительные затраты. Вместе с тем, в работе [2] отсутствует оценка эффективности идентификации ОУ согласно предложенного метода.

### **Цель статьи**

Оценить эффективность управления процессами рудоподготовки по разработанной интеллектуальной прогнозирующей модели крупнокускового дробления руд с использованием структурно-параметрической идентификации по методу вариации структур.

### **Адаптивная система управления процессом крупнокускового дробления руд**

В работах [3, 4] предложены системы управления процессом ККД (рис. 1), которые используют прогнозирующую модель в контуре управления. В таких системах входная руда после дробления в конусной дробилке (КД) через промежуточный бункер (ПБ) с помощью пластинчатых питателей поступает на конвейер 1 и далее в накопительный бункер (НБ).

Из НБ руда затем подается в мельницу самоизмельчения (МС), готовый продукт которой в сливе спирального классификатора (СК) подается на обогащение. В качестве МС на первой обогатительной фабрике Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОКа) используются мельницы типа ММС 70х23. При этом порция руды, загружаемая в отдельный накопительный бункер, превышает количество руды, продавливаемой за такт управления. Время измельчения руды, продробленной за один такт управления (2 думпкара) с учетом проектной загрузки думпкаров  $P_{\delta}^n = 105$  т и проектной производительности мельницы по исходной руде  $Q_{исх}^n = 188$  т/час, равно  $T_{изм} = 2 \cdot P_{\delta}^n / Q_{исх}^n = 210 / 118 = 1,8$  час. А поскольку постоянные времени мельницы ММС 70х23 не превышают десятков минут, то такту управления процессом крупнокускового дробления соответствует период работы мельницы, за который ее можно считать статическим объектом [5]. Это позволяет воспользоваться статической зависимостью производительности мельницы по исходной руде от содержания в ней класса +100 мм  $Q_{исх}(\Gamma_{+100})$  [6], экспериментально полученной в условиях Лебединского ГОКа для работающей в замкнутом цикле мельницы ММС 70х23, которая представлена на рис. 2, и аппроксимируется уравнением параболы:

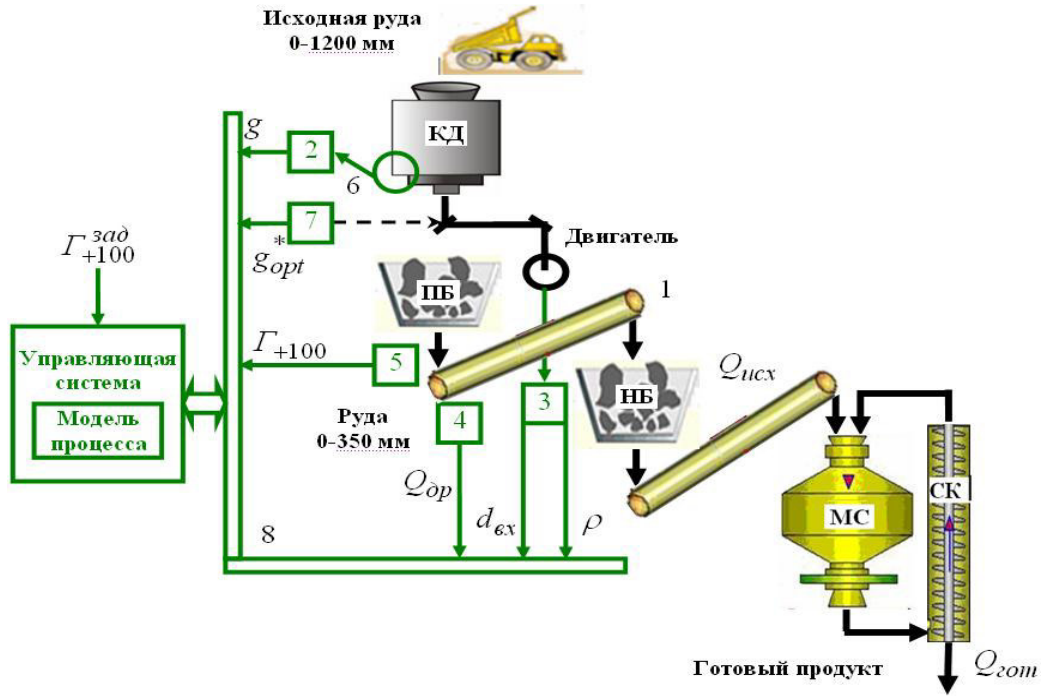


Рис. 1. Схема системы адаптивного управления процессом ККД

$$Q_{исх} = -7,96 \cdot 10^{-2} \cdot \Gamma_{+100}^2 + 9,07 \cdot \Gamma_{+100} - 130,6. \quad (1)$$

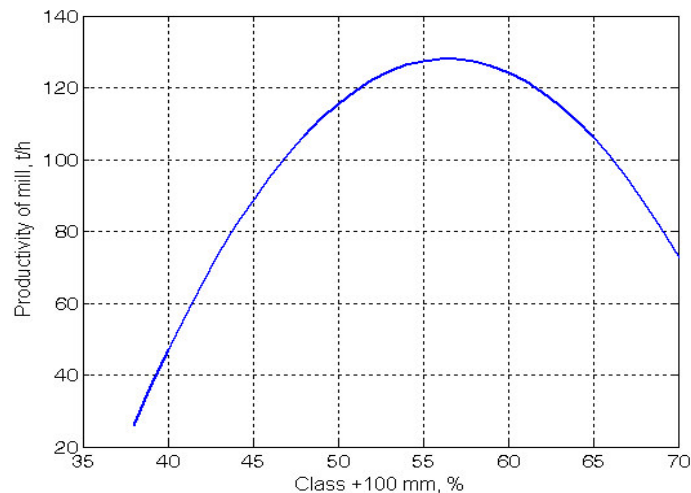


Рис. 2. Зависимость производительности мельницы ММС 70x23 по входной руде от содержания в ней класса +100 мм

Тогда средняя производительность по исходной руде за время наблюдения определяется как:

$$\bar{Q}_{исх} = 1/m \sum_{i=1}^m Q_{исх,i}; \quad (2)$$

$$Q_{исх,i} = -7,96 \cdot 10^{-2} \cdot (\Gamma_i)^2 + 9,07 \cdot \Gamma_i - 130,6, \quad (3)$$

где  $m$  — количество тактов за время наблюдения;  $\Gamma_i$  — усредненное за такт управления значение содержания класса +100 мм в дробленой руде.

Управляющая система выполняет оценку текущего состояния процесса ККД до момента начала очередного интервала управления. Для этого осуществляется опрос и усреднение за предыдущий интер-

вал показания устройства 2 контроля ширины щели ( $g$ ), устройства 3 контроля крупности и крепости входной руды ( $d_{ex}$ ,  $\rho$ ), конвейерных весов 4 ( $Q_{dp}$ ), а также гранулометра 5 ( $\Gamma_{+100}$ ).

Целью управления является стабилизация содержания класса +100 мм в дробленой руде:

$$\bar{\varepsilon} = \left\| \Gamma_{+100} - \Gamma_{+100}^{зад} \right\| \rightarrow \min. \quad (4)$$

Далее выполняется идентификация прогнозирующей модели процесса ККД согласно методу [2]. Сначала выполняется структурно-параметрическая идентификация модели процесса ККД (ее обучение). Затем, в текущем режиме выполняется адаптация параметров модели процесса ККД. Если погрешность модели меньше некоторого допустимого значения и параметр Херста для процесса  $< 0,5$ , то переходят к прогнозированию процесса ККД на заданный интервал управления. А если нет, то выполняется структурно-параметрическая идентификация модели процесса ККД.

По оценкам и прогнозу процесса ККД определяется значение изменения ширины разгрузочной щели дробилки 6  $g_{opt}^*$  на следующий интервал, которое обрабатывается гидравлической системой 7 регулирования щели. Устройства 2-7 связаны с управляющей системой с помощью информационной шины 8.

Глубина прогноза модели выбирается из условия ее превышения суммы времени транспортирования руды (времени запаздывания) через конусную дробилку ККД-1500, бункер ПБ и конвейер 1 к месту контроля гранулометра 5, а также времени поиска управления  $g_{opt}^*$  и времени его отработки исполнительным механизмом 7.

### Моделирование

Оценка эффективности системы управления технологическим процессом ККД с разработанной интеллектуальной прогнозирующей моделью процесса выполнялась путем ее имитационного моделирования в среде Matlab с помощью разработанной программы.

В качестве характеристики гранулометрического состава входной руды использовалась средне-взвешенная крупность  $d_{ex}$ , а в качестве характеристики выходной руды  $\Gamma_{вых}$  – содержание класса +100 мм  $\Gamma_{+100}$ . Качество входной руды (ее крупность  $d_{ex}$  и крепость  $\rho$ ) моделировалось генераторами возмущений с корреляционными функциями и статистическими характеристиками, определенными по экспериментальным последовательностям [7], а процесс ККД моделировался нелинейным конечно-разностным уравнением [8]. Ошибки измерения качества входной руды принимались на уровне 10% (гауссовская модель шума с уровнем 0,1 от уровня сигналов). Нестационарность ОУ принималась на уровне 20% от номинальных значений его параметров за время наблюдения в 256 тактов (продолжительность цикла управления равнялась одному такту).

В системе управления для прогнозирования ОУ использовалась модель (ModelKKD) в виде каскадной нейронной сети (НС) прямого распространения с 28 нейронами в скрытом слое, логистической сигмоидальной функцией активации скрытого слоя, линейной – выходного, алгоритмом обучения НС – методом Флетчера-Ривса [9].

Из особенностей процесса ККД глубина прогноза принималась  $n = 3$  такта, а глубина памяти по разным входам от 1 до 4 тактов. Диапазоны значений входных ( $d_{ex}$  [130...330 мм],  $\rho$  [4...19 ед.]) и выходных ( $\Gamma_{+100}$  [30...70%]) переменных были занормированы в сигналы с уровнем 0...1. Значения ширины разгрузочной щели дробилки  $g$  ограничивались значениями  $g_{min} = 160$  мм и  $g_{max} = 240$  мм.

В качестве задания ( $\Gamma_{+100}$ ) использовались значения  $\Gamma_{+100}^{зад} = 57\%$ , что соответствует оптимальному значению для Лебединского ГОКа [6]. Точность идентификации и управления оценивались с помощью среднеквадратических ошибок  $\bar{\varepsilon}$  и  $\bar{\varepsilon}$  соответственно.

Результаты моделирования работы системы управления процессом ККД в управляемом (Control) и неуправляемом (notControl) режимах приведены на рис. 3.

Значения ошибок составили  $\bar{\varepsilon}_{Control} = 0,036$  и  $\bar{\varepsilon}_{notControl} = 0,108$ , что определяет снижение среднеквадратичной ошибки в управляемом режиме в 3 раза. При этом ошибка прогнозирующей модели составила  $\bar{\varepsilon}_{ModelKKD} = 0,021$ . В общем, ошибки управления определяются ошибками прогнозирования. Предобучение прогнозирующей НС модели улучшает сходимость алгоритмов адаптации и, соответственно, обеспечивает снижение ошибки управления.

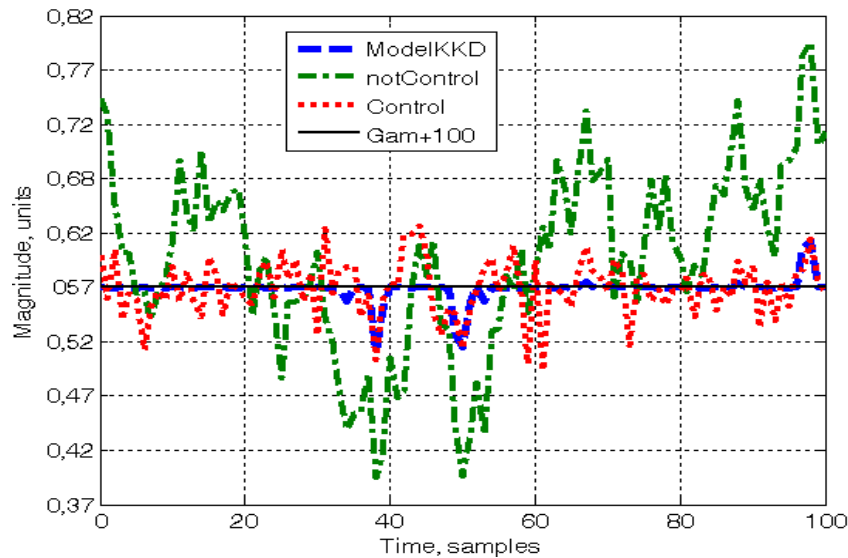


Рис. 3. Результаты управления процессом ККД с разработанной моделью

Полученное повышение качества управления процессом ККД позволяет, согласно зависимости (см. рис. 2), повысить производительность по входной руде мельниц самоизмельчения типа ММС 70х23 на 6,45 т/ч. или на 5,3 % (что существенно лучше, чем в системах оптимизации, которые имеют в контуре управления модели, полученные с помощью метода [1], где снижение ошибки управления составляет в 2,5 раза, а повышение производительности – на 5,5 т/ч.).

#### Выводы

Выполнена оценка эффективности управления процессами рудоподготовки по разработанной интеллектуальной прогнозирующей модели ККД согласно методу вариации структур [2]. Установлено, что система управления с предложенной прогнозирующей моделью в контуре управления обеспечивает по сравнению с системами, которые имеют в контуре управления модели, полученные в работе [1], снижение в 1,2 раза ошибки управления и повышения на 0,8 % или 0,95 т/ч производительности процесса самоизмельчения за счет стабилизации содержания класса +100 мм в его входной руде.

#### Список литературы

1. Кузнецов Г.В. Композиційна структурно-параметрична ідентифікація нелінійних динамічних об'єктів керування / Г.В. Кузнецов, В.І. Корнієнко, О.В. Герасіна // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2009. – № 5. – С.69-75. – ISSN 1810-0546.
2. Герасина А.В. Комплексный метод идентификации нелинейных процессов крупного дробления и самоизмельчения руд / А.В. Герасина // Збірник наукових праць НГУ. – 2011. – №. 36, т. 1 – С. 150-157.
3. Качан Ю.Г. Вычислительные исследования алгоритма оптимизации процесса крупнокускового дробления / Ю.Г. Качан, В.И. Корниенко // Горн. электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1988. – Вып. 53. – С. 48-53.
4. Корнієнко В.І. Адаптивне керування процесами рудопідготовки за мінімумом узагальненої роботи з інтелектуальним прогнозуванням / Корнієнко В.І. // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2009. – Вып. 83. – С. 79-88.
5. Марюта А.Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, В.А. Бунько. – М.: Недра, 1983. – 277 с.
6. Семунькин М.Б. Влияние кусковатости руды на производительность мельниц самоизмельчения / М.Б. Семунькин // Комплексное развитие КМА. – Губкин: НИИКМА им. Л.Д.Шевякова, 1978. – Вып. 2. – С. 84-90.
7. Качан Ю.Г. Моделирование возмущающих параметров процесса крупнокускового дробления для задач технологических исследований и АСУТП / Ю.Г. Качан, Н.М. Трипутень // Горная электромеханика и автоматика. – Киев. – 1986. – Вып. 49. – С. 29-36.
8. Качан Ю.Г. Результаты идентификации процесса дробления по принципу самоорганизации / Ю.Г. Качан, В.И. Корниенко // Горн. электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1988. – Вып. 53. – С. 32-38.
9. Герасіна О.В. Алгоритми глобальної і локальної оптимізації в задачі ідентифікації складних динамічних систем / О.В. Герасіна, В.І. Корнієнко // Системи обробки інформації. – 2010. – № 6(87). – С. 73-77. – ISSN 1681-7710.

Рекомендовано до друку проф. Слесаревим В.В.