

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 681.515: 519.7: 62-52

С.М. Мацюк, И.М. Удовик, канд. техн. наук,  
В.И. Корниенко, д-р. техн. наук  
(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»)

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КРУПНОКУСКОВОГО ДРОБЛЕНИЯ РУД

### Введение

Затраты на технологические процессы рудоподготовки (дробление и измельчение) составляют около половины себестоимости горно-обогатительного производства. Поэтому актуальным является повышение эффективности этих процессов, например, путем создания информационных систем управления (ИСУ) ними.

Процессы дробления с позиций управления являются сложными объектами управления (ОУ), характеризующимися существенной нелинейностью зависимостей вход-выход, стохастичностью возмущений, переменными параметрами и структурой, которые имеют значительные транспортные запаздывания [1]. Это вызывает необходимость использования в ИСУ этими процессами алгоритмов адаптации моделей и законов управления к реальным условиям функционирования ОУ.

### Состояние вопроса

Со второй половины XX века освоена технология самоизмельчения магнетитовых кварцитов, особенностью которой является наличие лишь одной стадии дробления – крупнокускового дробления (ККД). Это позволило снизить капитальные затраты на строительство предприятий на 20%, но при этом существенно увеличились удельные затраты электроэнергии.

Процесс ККД осуществляется обычно в конусных дробилках ККД-1500 (рис. 1, а). Руда крупностью 0 – 1200 мм из карьера доставляется автосамосвалами или самоопрокидывающимися вагонами (думпка-

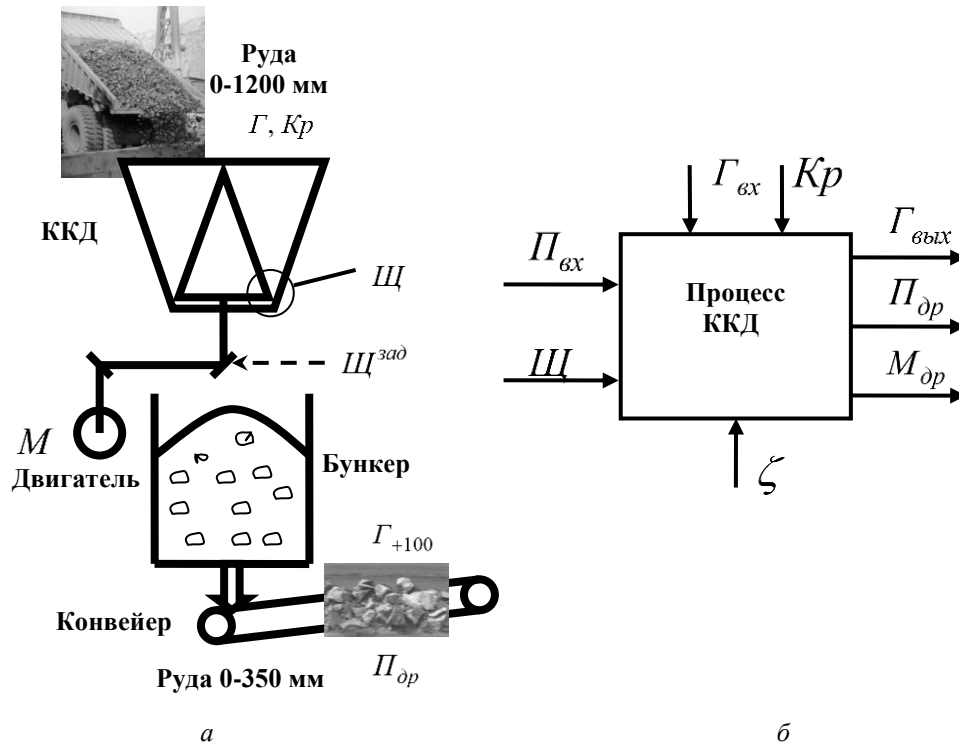


Рис. 1. Технологическая схема процесса ККД (а) и его представление как объекта управления (б)

рами). Дробленая руда крупностью 0 – 350 мм через бункер под дробилкой с помощью пластинчатых питателей поступает на конвейеры, которые подают ее в бункера технологических секций самоизмельчения.

Для процесса ККД выходными переменными являются гранулометрический состав дробленого продукта  $\Gamma_{вых}$ , производительность процесса  $P_{др}$  и потребляемая мощность  $M_{др}$  (рис. 1, б). Управляющими воздействиями являются производительность рудного питания (подача)  $P_{вх}$  и размер разгрузочной щели дробилки  $Щ$ . К возмущениям относят гранулометрический состав входной руды  $\Gamma_{вх}$ , ее крепость  $Kp$ , состояние футеровок  $\zeta$  и многое другое [1].

Наиболее трудоемким и важным в оптимизации процессов ККД руд является выбор критерия оптимальности (цели управления) и математической модели технологического процесса.

Кроме обеспечения качества продукта процессы рудоподготовки должны быть согласованы по производительности. При этом на горно-обогатительных комбинатах по переработке магнетитовых кварцитов тесная взаимосвязь между качеством и производительностью дробления существенно ослаблена, и управление процессом ККД целесообразно осуществлять по качественному показателю [2], например, путем минимизации разницы между текущим  $\Gamma_{вых}$  и заданным  $\Gamma_{вых}^{зад}$  гранулометрическими составами продукта дробления

$$\left\| \Gamma_{вых} - \Gamma_{вых}^{зад} \right\| \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях на допустимые мощность  $M_{др} \leq M_{дрmax}$  и производительность  $P_{др} \geq P_{дрmin}$ . При этом, заданный гранулометрический состав  $\Gamma_{вых}^{зад}$  соответствует максимальной производительности по входной руде следующего в технологической линии процесса самоизмельчения.

Сложность процессов дробления требует разработки и использования универсальных и эффективных принципов управления ними в соответствии с принятыми критериями качества. Это выполняется с помощью оптимального управления, где одним из универсальных и эффективных в практическом приложении к сложным нелинейным ОУ является принцип минимума обобщенной работы, который реализуется, например, с помощью метода с прогнозирующей моделью и функционалами обобщенной работы (ФОР) [3].

Кроме того, нестационарность и стохастичность ОУ с запаздыванием требует создания адаптивных алгоритмов управления, в которых управляющие воздействия вырабатываются при заранее неизвестных или изменяющихся в процессе эксплуатации свойствах ОУ [3, 4].

Таким образом, нерешенной задачей является разработка оптимальных по ФОР адаптивных ИСУ нелинейным процессом ККД с прогнозирующей моделью.

### **Цель работы**

Разработка алгоритма синтеза адаптивного оптимального (по ФОР с прогнозирующей моделью) управления нелинейным, нестационарным, стохастическим процессом ККД с запаздыванием.

### **Алгоритм синтеза адаптивного управления процессом ККД по ФОР с прогнозирующей моделью**

По способу реализации процесса оптимизации управления различают решение задания при проектировании ИСУ, когда на период функционирования системы возлагается лишь реализация полученного закона, а также объединенный синтез, когда все оптимизационные задания формируются и решаются в процессе функционирования ИСУ.

Использование законов оптимального управления, полученных на этапе проектирования ИСУ, оправданно, когда процесс ККД имеет постоянные режимы работы и отсутствуют вариации возмущений (несущественны изменения свойств руды).

В реальных условиях функционирования процесса ККД, например, при переходе к разработке в карьере от одного блока руды к другому свойства руды существенно изменяются, что приводит к вариации режимов ОУ и возмущений. В этом случае эффективными являются универсальные алгоритмы синтеза оптимального управления, основанные на текущей идентификации ОУ (обработке текущей информации в реальном масштабе времени) по прогнозирующим моделям [4, 5] и контролю возмущений.

Дробилки ККД-1500/180 оснащены гидравлической системой регулирования ширины разгрузочной щели  $Щ$  и предназначены для работы под завалом, в результате чего подача руды  $P_p$  не является существенным фактором при прогнозировании гранулометрического состава дробленого продукта  $\Gamma_{вых}$ .

При этом, для прогнозирования  $\Gamma_{\text{вых}}$  существенными переменными являются – гранулометрический состав входной руды  $\Gamma_{\text{вх}}$ , ее крепость  $Kp$ , а также размер разгрузочной щели дробилки  $\mathcal{W}$ .

Тогда для процесса ККД прогнозирующая модель принимает следующий вид:

$$\hat{\Gamma}_{\text{вых}}[k+n] = F_{\hat{\Gamma}} \{ \Gamma_{\text{вых}}[k], \mathcal{W}[k], \Gamma_{\text{вх}}[k], Kp[k], \zeta[k], a_{\hat{\Gamma}}[k], k \}, \quad (2)$$

где  $k, n$  – такт времени и глубина прогноза;  $F_{\hat{\Gamma}}$ ,  $a_{\hat{\Gamma}}$  – обобщенная функция (алгоритм) преобразования и параметры модели.

Переменные  $\Gamma_{\text{вых}}$ ,  $\Gamma_{\text{вх}}$  и  $Kp$  могут контролироваться с помощью автоматических средств, которые реализуют как прямые методы контроля (например, контроль  $\Gamma_{\text{вых}}$  и  $\Gamma_{\text{вх}}$  с помощью обработки оптических изображений), так и не прямые (например, контроль  $\Gamma_{\text{вх}}$  и  $Kp$  по спектральным составляющим потребляемой активной мощности дробилки [6]). Очевидно, что при оценивании переменных по непрямым методам контроля необходимо выполнять прогнозирование их значений.

Таким образом, результатом оценки состояния процесса ККД будет формирование вектора:

$$\bar{Z} = \{ \mathcal{W}, \Gamma_{\text{вх}}, Kp, \Gamma_{\text{вых}}, P_{\text{др}}, M_{\text{др}} \} \quad (3)$$

Если принять технологический критерий управления (1), то соответствующая ему функция затрат  $Q_3$  при оценивании и идентификации в функционале оптимизации представляет собой норму вектора (ошибку) разницы прогнозируемого и реального значений гранулометрического состава продукта дробления на текущий интервал:

$$Q_{3\text{Оц}} = \| \hat{\Gamma}_{\text{вых}}[k] - \Gamma_{\text{вых}}[k] \|, \quad (4)$$

а при синтезе оптимального управления – норму вектора разницы прогнозируемого и заданного значений гранулометрического состава продукта дробления на прогнозируемый интервал:

$$Q_{3\text{Vnp}} = \| \hat{\Gamma}_{\text{вых}}[k+n] - \Gamma_{\text{вых}}^{\text{зад}}[k+n] \|. \quad (5)$$

Для упрощения решения задачи синтеза оптимального управления необходимо перейти от обобщенной модели (2) к модели ОУ с линейно входящим управлением. Такой переход легко выполняется, если в качестве управления использовать не управляющую координату, а ее скорость [3], т.е. если управление – это ширина разгрузочной щели дробилки  $\mathcal{W}$ , то искомое оптимальное управление – ее изменение на текущий такт управления:

$$\mathcal{W}^*[k] = \mathcal{W}[k] - \mathcal{W}[k-1]. \quad (6)$$

При этом модель (2) приобретает расширенный вид:

$$\begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_{\text{вых}}[k+n] \\ \mathcal{W}[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\hat{\Gamma}} \\ \mathcal{W}[k-1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathcal{W}^*[k], \quad (7)$$

или более компактно

$$\bar{\Gamma}[k+n] = \bar{A} + \bar{B} \cdot \mathcal{W}^*[k], \quad (8)$$

где  $\bar{\Gamma}[k+n] = \{ \hat{\Gamma}_{\text{вых}}[k+n], \mathcal{W}[k] \}$ ;  $\bar{A} = \{ F_{\hat{\Gamma}}, \mathcal{W}[k-1] \}$ ;  $\bar{B} = \{ 0, 1 \}$ .

Тогда ФОР с квадратичными функциями затрат на управление для процесса ККД следующая:

$$J_{\text{ККД}} = E \left\{ V_3 \left( \bar{\Gamma}[k_{j+1}] \right) + \sum_{k=k_j+n}^{k_{j+1}-1} Q_3 \left( \bar{\Gamma}[k], \Gamma_{\text{вых}}^{\text{зад}}[k] \right) + K^{-1} \cdot \left\{ \sum_{k=k_j}^{k_{j+1}-n-1} \left( \mathcal{W}^*[k] \right)^2 + K^{-1} \cdot \sum_{k=k_j}^{k_{j+1}-n-1} \left( \mathcal{W}^{\text{опт}}[k] \right)^2 \right\} \right\}. \quad (9)$$

При этом задача синтеза оптимального управления заключается в нахождении значения  $\Pi_{opt}^*$ , которое минимизирует функционал (9) при соблюдении ограничений  $M_{op} \leq M_{opmax}$ ;  $\Pi_{op} \geq \Pi_{opmin}$ ;  $\Pi_{min} \leq \Pi \leq \Pi_{max}$ .

Дискретное уравнение Беллмана с учетом выражений (2), (6) – (9) приобретает вид:

$$V_i(\vec{\Gamma}[i+n]) = E \left\{ Q_3(\vec{\Gamma}[\kappa], \Gamma_{вых}^{зад}[\kappa]) + V_{i+1} \left\{ \vec{A} + \vec{B} \cdot \Pi_{opt}^*[i] \right\} - \frac{\partial V_{i+1}}{\partial \Pi[i+1]} \cdot \Pi_{opt}^*[i] \right\};$$

$$i = \kappa_{j+1} - n - 1, \kappa_{j+1} - n - 2, \dots, \kappa_j. \quad (10)$$

Основное функциональное уравнения Гамильтона-Якоби для автономного движения процесса ККД ( $\Pi_{opt}^* = 0$ ).

$$E \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial \vec{\Gamma}} \cdot \vec{A} \right\} = E \left\{ -Q_3(\vec{\Gamma}, \Gamma_{вых}^{зад}) \right\}. \quad (11)$$

При предельном условии  $V_{\kappa_{j+1}}(\vec{\Gamma}[\kappa_{j+1}]) = V_3(\vec{\Gamma}[\kappa_{j+1}])$  решение рекуррентного уравнения (10) определяется в соответствии с равенством

$$\frac{\partial}{\partial \Pi_{opt}^*} U_3(\Pi_{opt}^*[i]) = -\frac{\partial V_{i+1}}{\partial \vec{\Gamma}[i+1]} \cdot \vec{B}, \quad (12)$$

а оптимальное управление имеет вид:

$$\Pi_{opt}^*[i] = -K \cdot \frac{\partial V_{i+1}}{\partial \Pi[i+1]}. \quad (13)$$

Таким образом, решение задачи синтеза оптимального управления процессом ККД осуществляется в ходе функционирования ИСУ на скользящем интервале оптимизации с привлечением информации о состоянии процесса ККД к новому интервалу оптимизации и его будущего состояния по прогнозирующей модели, что позволяет упростить синтез и компенсировать возмущения, а это обеспечивает повышение качества управления этим процессом.

Системы управления, которые реализуют оптимальное управление (13) по функционалу (9) при функции затрат (5) являются оптимальными по точности системами в статистическом смысле [3].

Алгоритмическая структура адаптивной оптимальной (АО) ИСУ процессом ККД по ФОР с прогнозирующей моделью приведена на рис. 2, а алгоритм синтеза адаптивного оптимального управления состоит из следующих процедур:

- 1) оценка текущего состояния процесса ККД в моменты начала очередного интервала управления ( $\kappa_j$ ) согласно (3);
- 2) идентификация структуры  $F_{\vec{\Gamma}}$  и параметров  $a_{\vec{\Gamma}}$  модели процесса ККД (2);
- 3) прогнозирование свободного движения процесса ККД по модели (2) в расширенном виде (6) – (8) при  $\Pi^*[\kappa] = 0$  на заданном интервале  $[\kappa_j + n, \kappa_{j+1} - 1]$  оптимизации управления;
- 4) вычисление градиента целевой функции  $V_{i+1}(\vec{\Gamma}[i+n+1])$  для текущего состояния процесса ККД и формирование сигнала оптимального управления согласно (13).

Алгоритм синтеза адаптивного оптимального управления представлен на рис. 3.

### Выводы

В реальных условиях функционирования процесса ККД свойства руды существенно изменяются, что приводит к вариации режимов ОУ и возмущений. В этом случае эффективными являются универсальные алгоритмы синтеза оптимального управления, основанные на текущей идентификации ОУ (обработке текущей информации в реальном масштабе времени) по прогнозирующим моделям. Решение задачи синтеза оптимального управления процессом ККД осуществляется в ходе функционирования ИСУ с привлечением информации о состоянии управляемого процесса к новому интервалу оптимизации и его будущего состояния по прогнозирующей модели, что позволяет упростить решение задачи синтеза для нелинейного процесса ККД и компенсировать возмущения. Разработан алгоритм адаптивного оптимального управления процессом ККД, включающий процедуры оценки сос-



Рис. 2. Алгоритмическая структура АО ИСУ процессом ККД по ФОР с прогнозирующей моделью



Рис. 3. Процедуры алгоритма синтеза адаптивного оптимального управления процессом ККД по ФОР с прогнозирующей моделью

тояния управляемого процесса, идентификации его прогнозирующей модели, прогнозирования движения процесса, а также синтеза оптимального управления, что позволяет реализовать ИСУ процессом ККД, инвариантную к изменениям режимов работы оборудования.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку информационной технологии структурно-параметрической идентификации процесса ККД.

**Список литературы**

1. Марюта А.Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А.– М.: Недра, 1983. – 277 с.
2. Качан Ю.Г. Выбор критерия управления циклами дробления горно-обогатительных комбинатов по переработке магнетитовых кварцитов / Качан Ю.Г. // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1984. – Вып. 34. – С. 14–16.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
4. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами/ Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
5. Herbst, J.A., Alba, F.A., Pate, W.T., Oblad, A.E. (1988), " Optimal Control of Communion Operations International" *Journal of Mineral Processing*. — Vol. 22. – № 1-4. – pp. 275-296.
6. Корнієнко В.І. Підвищення точності спектральних пристроїв контролю технологічних процесів рудопідготовки. Проблеми інформатизації та управління. : зб. наук.пр. НАУ / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусев – 2009. – Вип. 1 (25). – С. 75-81.

***Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Алексєєвим М.О.***