

УДК 681.515: 519.7

В.И. Корниенко, С.М. Мацюк, И.М. Удовик

ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ РУДОПОДГОТОВКИ

Выполнен анализ принципов построения информационных систем управления сложными нелинейными процессами и обосновано использование перспективных методов и принципов оценивания, идентификации и прогнозирования, позволяющих повысить качество и эффективность управления технологическими процессами крупного дробления и самоизмельчения руд.

**Ключевые слова:** объект управления, нелинейные модели, дробление, измельчение, принципы управления.

### Введение

Эффективное использование ресурсов предполагает функционирование технологических процессов (ТП) в граничных режимах, что требует рассматривать их как нелинейные системы.

Для управления сложными объектами управления (ОУ), характеризующимися нестационарностью, нелинейностью и стохастичностью, актуальным является решение задач идентификации и прогнозирования, что позволяет повысить качество управления такими ОУ за счет повышения точности оценки их состояния. При этом целесообразным является использование информационных технологий (ИТ).

**Постановка задачи.** С позиций управления сложными динамическими ОУ являются, например, ТП рудоподготовки (дробление и измельчение руд), затраты на которые составляют больше половины себестоимости горно-обогатительного производства. То есть актуальны исследования с целью снижения затрат на эти процессы путем создания информационных систем управления (ИСУ) ними.

В 70-х годах XX века освоена технология самоизмельчения руд, особенностью которой является наличие лишь одной стадии дробления – крупного дробления (КД), после которого используется процесс самоизмельчения (СИ). Это позволяет снизить капитальные затраты на строительство предприятий на 20%, но при этом на 20% увеличиваются удельные затраты электроэнергии и других ресурсов [1].

Процесс КД находится в начале технологической линии дробления, а процесс СИ – в начале технологической линии переработки и обогащения руды. То есть актуальным является повышение качества управления этими головными процессами для снижения удельных затрат и уменьшения дисперсии технологических параметров, что приводит к улучшению качества продуктов обогащения.

Процессы КД и СИ с позиций управления являются сложными динамическими ОУ, их модели имеют нестационарные параметры, нелинейные за-

висимости и стохастические переменные. Эти процессы имеют различные режимы работы (переменную структуру моделей), значительные транспортные запаздывания и чувствительны к качеству руды.

Процессы дробления и измельчения являются управляемыми технологическими системами (рис. 1), в которых ТП контролируется и управляется посредством внешней информационной среды (ВИС). Система управления (СУ) на основе контроля и анализа входных  $X$  и выходных  $Y$  переменных ОУ (их оценок  $\hat{X}$  и  $\hat{Y}$ ) в соответствии с целью управления формирует (с использованием модели ОУ) и реализует управляющие воздействия  $U$ .



Рис. 1. Структура информационной системы управления

Технологический принцип управления ТП дробления и измельчения заключается [2] в максимизации скорости сокращения классов руды, крупнее предельного зерна в конечном продукте и минимизации скорости для классов, меньше предельного зерна. То есть, дробление и измельчение должны вести к увеличению готового класса и скачкообразной функции содержания (разделения).

Наиболее трудоемким и важным в оптимизации процессов КД и СИ руд является выбор критерия оптимальности (цели управления) и математи-

ческих моделей ТП. Причем, поскольку рудоподготовка относится к подготовительным процессам, то для их управления используют технологические критерии [3].

Примерами моделей процессов КД и СИ являются блочно-ориентированные модели Винера-Гаммерштейна (Wiener-Hammerstein) или их вариации (модели Гаммерштейна и Гаммерштейна-Винера [4]).

Процессы КД и СИ также представляются с помощью нелинейных диссипативных осцилляторов, которые имеют периодические и хаотические режимы [5].

Для управления процессами рудоподготовки широкое распространение получили СУ, которые используют или линеаризованные динамические модели ОУ с адаптацией параметров, или статическую оптимизацию. Они в условиях вариации качества руды и переменных режимов работы не могут обеспечить качественное управление нелинейными процессами рудоподготовки.

Таким образом, нерешенной задачей является исследование принципов и методов управления сложными нелинейными ТП рудоподготовки.

**Цель статьи.** Анализ существующих принципов построения ИСУ ТП дробления и измельчения руд и обоснование использования перспективных принципов построения, позволяющих повысить качество и эффективность управления ТП КД и СИ руд.

### **Существующие принципы построения ИСУ ТП дробления и измельчения**

Улучшение работы горных комбинатов находится в области принятия оптимальных производственных решений, которые связаны с созданием единого информационного пространства предприятия. То есть, актуальным путем их развития является интеграция ИТ в масштабах предприятия, что повышает эффективность принятых решений в изменяющихся условиях и подготавливает предприятия к возможности использования интеллектуальных ИТ: искусственных нейронных сетей, эволюционного моделирования, экспертных систем и др.

Для построения автоматизированного управления процессами КД и СИ используются следующие системы [3]:

- поисковые системы с непосредственным измерением характеристик готовой продукции;
- системы управления, использующие регрессионные статические зависимости;
- экстремальные системы управления по средней мощности двигателя и шума мельницы;
- системы управления контуром регулирования степени внутримельничного заполнения;
- адаптивные системы на основе структурных моделей ОУ с параметрической идентификацией в процессе управления.

Наиболее эффективными из вышеперечисленного являются адаптивные системы, основанные на структурных моделях ОУ с параметрической идентификацией в процессе управления. Такие системы характеризуются сложными алгоритмами обработки информации в управляющей части.

К недостаткам этих систем относят использование линейных моделей для прогноза нелинейных процессов дробления и измельчения, а также неоптимальность управления. Однако использование оперативных данных о внутреннем состоянии ОУ и априорной информации о закономерностях процессов в сочетании с современными методами адаптивной идентификации и управления является наиболее перспективным методом.

Основная особенность адаптивных систем управления – возможность получения информации в процессе функционирования и использования ее для управления, что позволяет повысить его качество при наличии помех. Это достигается тем, что в данных системах стратегия управления основана на включении математической модели в контур управления и прогнозе в режиме реального времени результатов процесса. Для получения динамических моделей используются ИТ их идентификации [6].

### **Обоснование перспективных принципов построения ИСУ ТП КД и СИ**

Ведущая концепция современной теории управления заключается в достижении главной конечной цели на каждом этапе функционирования СУ, которая обеспечивается путем оптимизации ОУ в реальном масштабе времени [7]. Это требует полного использования имеющейся априорной информации в виде моделей этого ОУ и возможно при:

- оптимальном оценивании (фильтрации) динамических процессов в ОУ;
- идентификации (оптимальном оценивании структуры и параметров модели) ОУ;
- синтезе оптимального управления на каждом этапе функционирования системы;
- адаптации (настройке оптимального управления при неполной информации).

Из особенностей процессов КД и СИ следует необходимость обоснования и разработки методов и алгоритмов синтеза в процессе функционирования ИСУ оптимального управления, которые учитывают стохастичность ОУ и используют адаптацию прогнозирующих моделей для компенсации запаздываний и нестационарности параметров с контролем возмущений в реальном масштабе времени.

Традиционный путь создания СУ включает [7]:

- формулировку критерия (функционала);
- разработку математической модели ОУ;
- синтез законов (алгоритмов) управления;

- разработку алгоритмов адаптации законов управления по режимам функционирования ОУ;
- реализацию полученных законов.

Такой подход приводит к сужению возможностей управляющих алгоритмов, поскольку структура и параметры алгоритмов выбираются для конкретных условий. Объединение же последних трех этапов позволяет создать на базе вычислительных средств ИСУ, которая осуществляет синтез оптимального управления в процессе функционирования ОУ (объединенный синтез управления [7]).

Кроме того, сейчас для сложных, нелинейных ОУ активно развиваются интеллектуальные методы управления, которые рассматривают ОУ не как абсолютно известную точку в пространстве признаков, а лишь как некоторую информацию о ней [4]. При таком подходе пытаются воспроизвести принципы естественных СУ – нервных систем живых организмов, которые реализуют универсальные принципы обработки эмпирической информации и поисковые алгоритмы адаптации.

Среди ограничений, накладываемых на управление ТП рудоподготовки, выделяются информационные ограничения. Они имеют место как в отношении априорной и текущей информации, так и к статистическим характеристикам шумов, возмущений, параметров. При этом экспериментальное определение многомерных законов распределения вероятностей требует недопустимых затрат.

Идентификация сложных ОУ традиционными способами требует больших расходов на экспериментальные исследования. Методы же нелинейной динамики позволяют с единых позиций классифицировать и исследовать режимы функционирования ТП по отдельным временным реализациям, а также оценить структуру ОУ и синтезировать его модель [6].

Для реализации систем оценивания и идентификации ОУ также используются адаптивные фильтры-аппроксиматоры (АФА) [6], которые реализуют рекурсивные и нерекурсивные алгоритмы. В процессе работы АФА по величине ошибки между измеряемым и прогнозируемым значениями сигнала осуществляется адаптация его параметров. При этом, в качестве структуры АФА перспективными считаются АФА на основе методов систем искусственного интеллекта и вейвлетного анализа.

Разнообразие технологических схем рудоподготовки и сложность ее процессов вызывает необходимость применения универсальных по целям и эффективным по результатам принципов управления. Это реализуется с помощью оптимального управления, цель которого заключается в обеспечении экстремального значения показателя качества управления [7].

Применение метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) Летова-Калмана для нелинейных ОУ сводит задачу синтеза

к поиску решения нелинейного дифференциального уравнения Беллмана в частных производных относительно вырабатываемой функции, которая определяет закон оптимального управления. Полученные на основе таких функций регуляторы будут оптимальными и они обеспечивают асимптотическую устойчивость движения системы.

Развитием теории АКОР Летова-Калмана является принцип минимума обобщенной работы, разработанный академиком А.А. Красовским, согласно которому оптимизация управления осуществляется по функционалу обобщенной работы (ФОР) [7].

Преимущество метода АКОР по ФОР заключается в том, что его функциональное уравнение, в отличие от функционального уравнения по АКОР Летова-Калмана, представляет собой линейное дифференциальное уравнение в частных производных, что имеет принципиально более простые решения.

Наиболее эффективен этот метод при использовании прогнозирующей модели ОУ [7]. Метод оптимизации нелинейных динамических систем по ФОР имеет, кроме отмеченных преимуществ вычислительного характера, также и возможность объединенного синтеза законов управления, то есть формализованного определения управлений с текущей идентификацией математической модели ОУ.

Развитие нелинейной динамики и синергетики (теории неравновесных процессов) стало основой разработки принципиально новых подходов к синтезу оптимального управления нелинейными динамическими ОУ [8].

Применение идей синергетики в управлении заключается в целевом способе самоорганизации синтезированных систем управления, при котором цель – аттрактор (асимптотически устойчивое множество, желаемый режим работы) определяет самоуправление и направленную самоорганизацию нелинейного динамического процесса [8].

Для применения синергического подхода внешние воздействия представляются в виде информационных моделей, которые агрегируют в общую структуру расширенной системы.

Метод синтеза управления в такой постановке получил название аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [8]. В основу АКАР положено общее использование теории устойчивости Ляпунова и оптимального управления. Метод обеспечивает асимптотическую устойчивость СУ без поиска решений нелинейных динамических уравнений ОУ. При этом оптимизируемый функционал является оценкой качества переходных процессов, который эффективно подавляет большие отклонения за возможно малое время и используется для стабилизации состояния ОУ в режиме малых отклонений.

Наиболее эффективными методами адаптации структуры и параметров системы управления явля-

ются поисковые методы. Процесс поиска в них состоит из повторяемых этапов, каждый из которых представляет переход от одного решения к другому (лучшему), что и образует процедуру последовательного улучшения решений. Алгоритм решения задачи оптимизации здесь выполняет функции сбора информации и принятия решения.

Развитием методов случайного поиска, в первую очередь, в повышении эффективности процедур направленного поиска, являются эволюционные алгоритмы адаптации, которые реализуют биокибернетический подход для поиска оптимальных решений. Среди них наибольшее распространение получили генетические алгоритмы [9].

Рассмотренные принципы и методы позволяют строить высокоэффективные адаптивные оптимальные ИСУ ТП КД и СИ с их интеллектуальными прогнозирующими моделями в контурах управления.

## Выводы

Сложность ТП КД и СИ предполагает использование универсальных по целям и эффективным за результатами принципов управления, которые реализуются путем синтеза оптимального управления с помощью методов аналитического конструирования оптимальных и агрегированных регуляторов.

Оптимальное управление требует наличия соответствующей априорной (адекватных прогнозирующих моделей) и апостериорной (текущих измерений и результатов обработки) информации. Это предполагает использование малозатратных и эффективных средств оценивания и идентификации, для чего наиболее перспективным является использование методов систем искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей и систем с нечеткой логикой, которые способны к обучению и являются универсальными и эффективными аппроксиматорами.

Нестационарность и стохастичность ТП КД и СИ предполагает создание адаптивных ИСУ, которые эффективны в условиях вариации возмущений и неконтролируемых изменений свойств (режимов работы)

ОУ. Для адаптации моделей и алгоритмов управления перспективными являются поисковые и эволюционные методы, в частности, генетические алгоритмы.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку алгоритмов оценивания, идентификации, прогнозирования и синтеза оптимального управления для ИСУ ТП КД и СИ.

## Список литературы

1. Зайцев Г.В. Современные направления развития техники и технологии производства высококачественного железорудного концентрата с высокими технико-экономическими показателями [Электронный ресурс] / Г.В. Зайцев // Горная техника. – 2005. – № 7. – С. 1-14. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.stroyka.spb.ru>.
2. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
3. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках / А.Н. Марюта. – М.: Недра, 1975. – 231 с.
4. Nelles O. Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural and Fuzzy Models / O. Nelles. – Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
5. Кузнецов С.П. Динамический хаос / С.П. Кузнецов. – М.: Физматлит, 2002. – 296 с.
6. Корнієнко В.І. Автоматизація оптимального керування процесами дроблення і здрібнювання руд / В.І. Корнієнко. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 191 с.
7. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
8. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – Ч. II. – 559 с.
9. Скобцов Ю.А. Вероятностные и компактные генетические алгоритмы / Ю.А. Скобцов, Я.В. Дубов // Искусственный интеллект. – Донецк. – 2006. – № 2. – С. 108-116.

Поступила в редколлегию 6.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.А. Алексеев, ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск.

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ РУДОПІДГОТОВКИ

В.І. Корнієнко, С.М. Мацюк, І.М. Удовік

Виконаний аналіз принципів побудови інформаційних систем управління складними нелінійними процесами і обґрунтовано використання перспективних методів і принципів оцінювання, ідентифікації і прогнозування, що дозволяють підвищити якість і ефективність управління технологічними процесами крупного дроблення і самозривнювання руд.

**Ключові слова:** об'єкт управління, нелінійні моделі, дроблення, подрібнення, принципи управління.

## CONSTRUCTION PRINCIPLES OF INFORMATION CONTROL SYSTEM BY NONLINEAR TECHNOLOGICAL PROCESSES COMMINUTION

V.I. Kornienko, S.M. Matsyuk, I.M. Udovik

The analysis of principles construction informations control system by difficult nonlinear processes and grounded use of perspective methods and principles of estimation, identification and prediction which allow to promote quality and efficiency of control of the large crushing and selfgrinding ores technological processes is executed.

**Keywords:** control object, nonlinear models, crushings, grindings down, control principles.