

#### Список литературы

1. В. В. Ткачев, П. Ю. Огеенко, А. В. Лозовягин, «Децентрализованное управление в задачах минимизации удельных энергозатрат», Науковий вісник НГУ №4, 2011
2. Г. Г. Пивняк, С. Н. Проценко, С. М. Стадник, В. В. Ткачев, Децентрализованное управление: Монография. – Д.: НГУ 2007. – 107 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ткачовим В.В.  
Надійшла до редакції 19.05.11*

УДК 681.5.015: 62-52

© А.В. Герасина

## **КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ И САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД**

Разработан комплексный метод идентификации нелинейных процессов крупного дробления и самоизмельчения руд, который осуществляется путем определения тенденции к изменению режимов функционирования этих процессов, по значениям чего выполняется структурно-параметрическая или параметрическая оптимизация интеллектуальных прогнозирующих моделей с вариацией типов их структур.

Розроблено комплексний метод ідентифікації нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд, що здійснюється шляхом визначення тенденції до зміни режимів функціонування цих процесів, за значеннями чого виконується структурно-параметрична або параметрична оптимізація інтелектуальних прогнозуючих моделей з варіацією типів їх структур.

The complex method of identification of nonlinear comminution processes is developed, which is carried out by definition of the tendency to variation of modes of functioning of these processes, on values of that structural-parametrical or parametrical optimization of intellectual predicting models is executed with variation of types structures.

**Введение.** Нелинейные процессы крупного дробления и самоизмельчения руд с позиций управления являются сложными динамическими объектами, модели которых имеют нестационарные параметры, нелинейные зависимости и стохастические переменные. Кроме того, эти процессы имеют различные режимы работы (переменную структуру). Создание эффективных систем управления данными процессами предусматривает их идентификацию как на стадии проектирования, так и в процессе функционирования.

**Постановка задачи.** Анализ методов и алгоритмов идентификации нелинейных объектов управления (ОУ) показал, что в работах ученых проводилась параметрическая либо структурно-параметрическая идентификация ОУ. Однако, применение параметрической идентификации является недостаточным, учитывая характер идентифицируемых процессов, а выбор структурно-параметрической идентификации не обоснован.

Реализация структурно-параметрической идентификации ОУ, предложенная Марьютой А.Н., Новицким И.В., Поркуян О.В., Корниенко В.И. и др., ориентирована на определенную структуру моделей. Однако, предполагаемое постоянство структуры приводит к существенной потере точности идентификации, и, следовательно, к снижению качества управления. Решение этой проблемы предложил Ка-

чан Ю.Г., однако его методы также имели существенные недостатки: статичность моделей ОУ и увеличение затрат вычислительных ресурсов.

Так, в работах [1, 2] предложены метод идентификации по временным реализациям и композиционный метод структурно-параметрической идентификации процессов крупнокускового дробления (ККД) и мокрого самоизмельчения (МСИ) руд, которые позволяют реализовать процедуру идентификации в реальном режиме времени.

Вместе с тем, в работе [2] не обоснован выбор типа структуры моделей процессов ККД и МСИ в виде модели Винера-Гаммерштейна [3]. Исходя из этого, можно предполагать, что композиционный метод идентификации имеет недостаточную точность вследствие неоптимальности структур прогнозирующих моделей процессов ККД и МСИ для конкретных режимов работы.

Таким образом, актуальным является разработка методов идентификации процессов ККД и МСИ, которые бы учитывали вариацию типов структур моделей, что не создавало бы увеличения затрат вычислительных ресурсов.

**Цель статьи.** Разработать метод идентификации нелинейных процессов крупного дробления и самоизмельчения руд в классе их интеллектуальных прогнозирующих моделей, который учитывает вариацию структур моделей и не приводит к существенному увеличению вычислительных затрат.

**Комплексный метод идентификации.** Предложен комплексный метод идентификации процессов ККД и МСИ, в рамках которого по временной реализации определяется состояние ОУ и размерность его моделей.

Задача структурно-параметрической идентификации ОУ состоит, прежде всего, в обосновании типа структуры модели. После этого следует выбор методов и критериев структурной оптимизации, способов учета ограничений, базисных функций и методов параметрической оптимизации с выбором критерия параметрической оптимизации.

Структурная идентификация осуществляется с помощью композиции методов глобальной и локальной оптимизации, в которой осуществляется генерирование структур моделей-претендентов (базисных функций со своими структурными характеристиками), а затем выполняется отбор лучших из них по критерию структурной оптимизации. Результатом структурной идентификации является модель ОУ оптимальной структуры, найденная с помощью алгоритма глобальной оптимизации.

Параметрическая идентификация заключается в определении параметров модели оптимальной структуры путем ее обучения методом локальной параметрической оптимизации по критерию параметрической оптимизации.

Параметр Херста  $H$  характеризует закономерность в изменении состояния стохастических динамических процессов [4], и используется как критерий необходимости проведения структурно-параметрической идентификации:

$$R(\tau) = \frac{R_0(\tau)}{S(\tau)} = (\alpha \cdot \tau)^H, \quad (1)$$

где  $R_0(\tau)$  – разница максимального и минимального значений (размах) процесса  $y(t)$ ;  $S(\tau)$  – среднеквадратическое отклонение его приращений на интервале  $\tau$ .

Энтропия Колмогорова  $K$  описывает динамическое поведение на странном аттракторе, и показывает насколько динамическая система хаотична [5, 6].  $K$ -энтропия определяется как средняя скорость потери информации о состоянии динамической системы

$$K_{ng} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \lim_{m \rightarrow \infty} \ln \left[ \frac{J_m(\sigma)}{J_{m+1}(\sigma)} \right] \leq K, \quad (2)$$

где  $J(\sigma)$  – корреляционный интеграл;  $\sigma$  – размер ячейки покрытия данного множества.

Корреляционная размерность аттрактора характеризует нижнюю границу фрактальной размерности Хаусдорфа [5, 6]

$$D_{ng} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\log J(\sigma)}{\log \sigma}. \quad (3)$$

По значению корреляционного интервала предсказуемости определяется глубина точного прогноза

$$T_{vg} \sim \frac{1}{K_{ng}} \ln \left( \frac{1}{\sigma} \right) \geq T_{pr}. \quad (4)$$

По значению размерности вложения аттрактора определяются глубины памяти входных и выходных переменных модели ОУ

$$d \geq 2D_{ng} + 1. \quad (5)$$

Задача идентификации ОУ формулируется следующим образом [2, 7]: на основании экспериментального множества функций возмущений, управлений и выходов в условиях помех определить структуру  $\Phi$  и параметры  $a$  модели

$$\hat{Y}[m+n] = \Phi\{Y[m], u[m], \chi[m], \xi[m], a[m], m\}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (6)$$

которая достаточно точно (в смысле некоторого критерия) аппроксимирует ОУ относительно входных и выходных величин во всем функциональном пространстве. Здесь  $Y[m], u[m], \chi[m], \xi[m]$  – соответственно выход процесса, его управления, возмущения и помехи к текущему такту времени  $m$  ( $m = t/T$ ) с соответствующими глубинами памяти;  $t$  – непрерывное время;  $T$  – период дискретизации;  $M$  – время наблюдения;  $n$  – глубина прогноза.

Таким образом, формирование вектора  $\Psi_s = \{\Phi, a\}$  оценки структуры  $\Phi$  (структурная идентификация) и параметров  $a$  (параметрическая идентификация) модели ОУ (1) осуществляется путем минимизации принятого функционала:

$$C[\Psi_s] \rightarrow \min_{\Psi_s} C \Rightarrow \{\Phi_{opt}, a_{opt}\}. \quad (7)$$

В методах глобальной оптимизации алгоритм поиска оптимального решения связывает следующие друг за другом решения  $\Psi_s(j+1) = F[\Psi_s(j)]$ , где  $F$  – алгоритм поиска, который показывает какие операции следует сделать на шаге  $j$  при решении  $\Psi_s(j)$ , чтобы

$$C[\Psi_s(j+1)] < C[\Psi_s(j)]. \quad (8)$$

В алгоритмах прямого случайного поиска (ПСП) задаются направления поиска и определяются значения функционала  $C$  в точках  $\Psi_s(j) \pm \gamma\zeta$ . Решение состоит в выборе шага в направлении уменьшения этого функционала

$$\Psi_s(j+1) = \Psi_s(j) - \omega\zeta\{C[\Psi_s(j) + \gamma\zeta] - C[\Psi_s(j) - \gamma\zeta]\}, \quad (9)$$

где  $\omega, \zeta, \gamma$  – параметры, которые определяют сферы принятия решения ( $\omega$ ), сбора информации ( $\gamma$ ) и единичное случайное направление ( $\zeta$ ).

Развитием метода ПСП является метод имитации отжига (МИО), который отражает поведение расплавленного материала при отверждении с применением процедуры управляемого охлаждения (отжига). В нем задаются направления поиска и определяются значения функционала  $C$  в точках  $\Psi_s(j) \pm \nu\tau$ . Решение состоит в выборе шага в направлении уменьшения этого функционала:

$$\Psi_s(j+1) = \Psi_s(j) - \omega\nu\{C[\Psi_s(j) + \nu\tau] - C[\Psi_s(j) - \nu\tau]\}, \quad (10)$$

где  $\omega, \nu, \tau$  – параметры, которые определяют сферы принятия решения ( $\omega$ ), изменение текущего решения ( $\nu$ ) и уменьшение температуры ( $\tau$ ).

Генетические алгоритмы (ГА) моделируют развитие биологической популяции на уровне геномов: мутации структуры и параметров  $\delta\Psi_s$ , их скрещивание и правило отбора, что позволяет обнаруживать благоприятные вариации, с помощью которых строится последовательность улучшенных решений

$$\Psi_s(j+1) = \Psi_s(j) + \delta\Psi_s(j). \quad (11)$$

В качестве критерия параметрической оптимизации использовался критерий регулярности, вычисляемый на всей выборке экспериментальных данных

$$C_{рег} = \frac{\|Y^*[m+n] - \hat{Y}[m+n]\|}{\|Y^*[m+n]\|}, \quad (12)$$

а для структурной – комбинированный критерий вида

$$C_{комб} = 0,2 \cdot C_{рег} + 0,8 \cdot C_{см}; \quad (13)$$

где  $C_{см}$  – критерий минимума смещения.

В качестве типов структур моделей рассматривались блочно-ориентированные модели Винера, Гаммерштейна и их комбинации, а также модели авторегрессии с дополнительным входным сигналом (ARX) [3]. В качестве линейного динамического блока в них использовались линии задержки, величины которых определяются размерностью входных и выходных переменных. В качестве нелинейного статического блока – базисные функции в виде полиномов Колмогорова-Габора, нейронных сетей (НС) прямого распространения (каскадных и вейвнет), НС с радиальными базисными функциями (РБФ) и гибридных НС с нечеткой логикой (Anfis).

В рамках предложенного комплексного метода осуществление идентификации в пакетном режиме реализуется путем структурно-параметрической оптимизации ОУ с выбором оптимальной структуры модели. В режиме реального времени идентификация реализуется путем параметрической оптимизации ОУ.

Программа реализации структурно-параметрической идентификации процессов ККД и МСИ согласно предложенному комплексному методу, имеет структуру, показанную на рис. 1.



Рис. 1. Структура программы реализации структурно-параметрической идентификации ОУ

**Моделирование.** Моделирование решения задачи структурно-параметрической идентификации при вариации типов структур моделей ОУ выполнялось с помощью разработанной программы в среде Matlab.

Для моделирования процесса ККД в качестве входных сигналов использовался полосовой авторегрессионный сигнал с гауссовским шумом амплитудой 10% от уровня сигнала. Сам процесс моделировался нелинейным конечно-разностным уравнением. При этом, в соответствии с динамическими свойствами процесса ККД глубина прогноза составляла  $n = 3$  такта, а глубина памяти – 4 такта. Размер реализации составлял  $N = 1024$ .

В качестве критерия оценки моделей выбран критерий регулярности (12), в качестве структур – модели Винера, Гаммерштейна, Гаммерштейна-Винера и

ARX с базисными функциями в виде каскадных НС, вейвнетов (НС с функциями активации в виде вейвлет) и полиномов Колмогорова-Габора.

Результаты идентификации ОУ со структурой модели ARX и базисными функциями в виде вейвнета и каскадной НС приведены на рис. 2,а. При этом значения критерия регулярности составили 0,0644 для вейвнета и 0,0995 для каскадной НС.

Результаты идентификации ОУ со структурой модели Гаммерштейна-Винера и базисными функциями в виде вейвнета и полинома Колмогорова-Габора приведены на рис. 2,б. При этом значения критерия регулярности составили 0,0334 для вейвнета и 0,0370 для полинома Колмогорова-Габора.

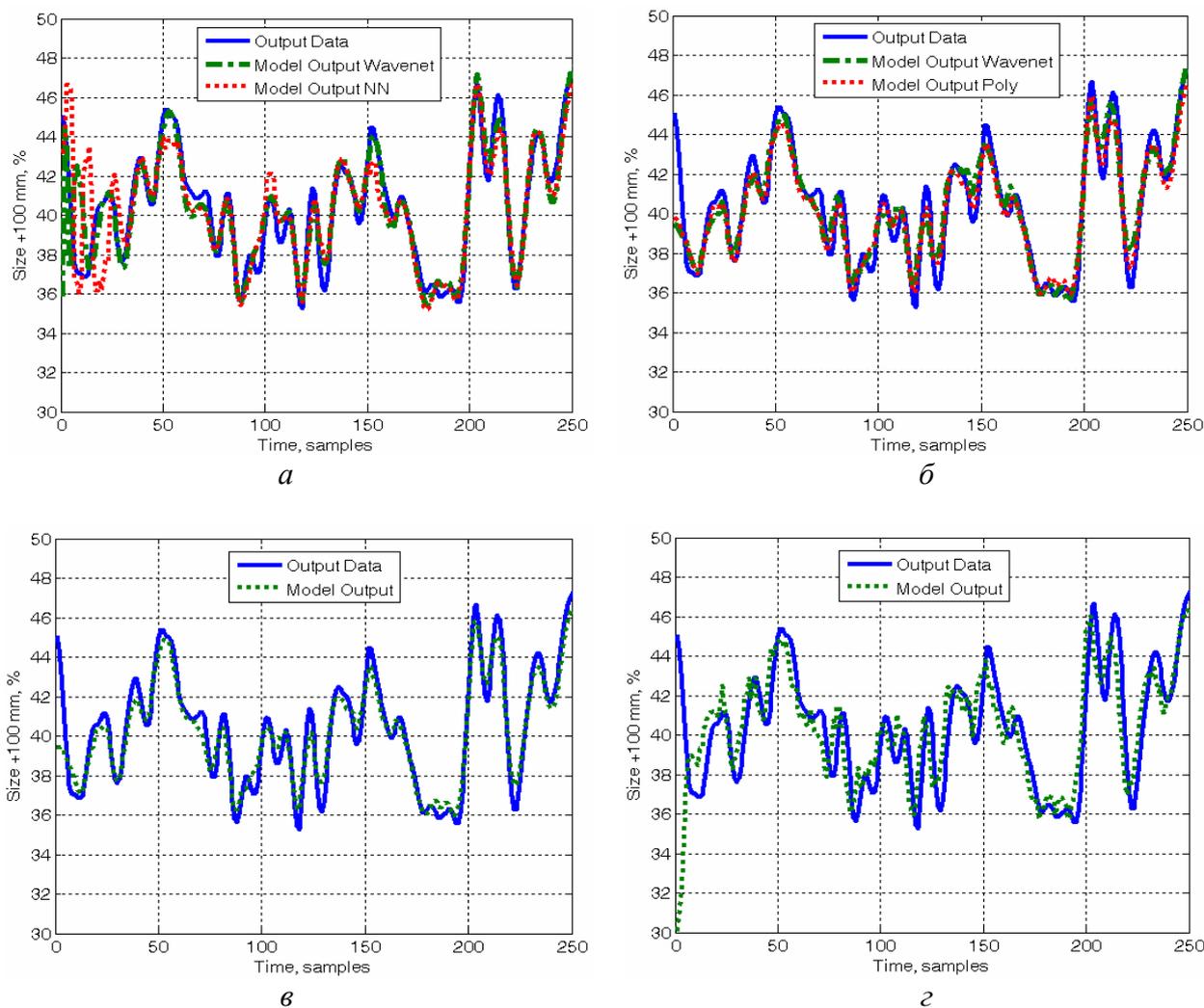


Рис. 2. Результат идентификации процесса ККД в виде моделей ARX (а), Гаммерштейна-Винера (б), Винера (в) и Гаммерштейна (г)

Результаты идентификации ОУ с базисными функциями в виде вейвнет и со структурами моделей Винера и Гаммерштейна приведены на рис. 2,в-г, соответственно, а значения критерия регулярности составили: для моделей Винера – 0,0336, Гаммерштейна – 0,0723.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что в качестве структуры модели процесса ККД предпочтительной является структура Гаммерштейна-Винера, поскольку она дает меньшие значения критерия регулярности (12) при различных базисных функциях. Для процесса МСИ структура Гаммерштейна-Винера также является предпочтительной [8].

Общее время проведения структурно-параметрической идентификации для процессов ККД и МСИ согласно предложенному комплексному методу составляет 1,5...2 часа, что предполагает значительные затраты вычислительных ресурсов в автоматизированных системах управления этими процессами.

Сравнительный анализ комплексного и композиционного методов идентификации процессов ККД и МСИ отражен в таблице.

Таблица

Сравнительный анализ композиционного и комплексного методов идентификации

№	Композиционный метод	Комплексный метод
1.	-	Исследованы различные режимы работы процессов ККД и МСИ. Обоснована необходимость проведения структурно-параметрической идентификации этих процессов при изменении их режимов функционирования [9].
2.	-	В рамках метода исследованы различные типы блочно-ориентированных структур моделей процессов ККД и МСИ, и установлено, что оптимальной для них является структура Гаммерштейна-Винера.
3.	Реализует идентификацию в реальном режиме времени.	Реализует идентификацию в пакетном режиме путем структурно-параметрической, а в режиме реального времени - параметрической оптимизации посредством добавления в него критерия необходимости проведения структурно-параметрической идентификации. Это позволяет снизить вычислительные затраты на идентификацию процессов ККД и МСИ.
4.	При глобальной оптимизации использовались ГА и ПСП, а при параметрической в качестве базисных функций – каскадные НС, НС РБФ и НС Anfis.	При глобальной оптимизации дополнительно использовался МИО, а при параметрической оптимизации в качестве базисных функций – вейвлеты и полиномы Колмогорова-Габора. Это позволило установить преимущества каждого из алгоритмов глобальной оптимизации по скорости сходимости, быстродействию и точности сходимости, а также расширить поиск оптимальных структурных характеристик и параметров моделей процессов ККД и МСИ.

**Выводы.** Предложен комплексный метод идентификации нелинейных процессов ККД и МСИ, который содержит вариацию типов структур моделей, что с одной стороны, позволяет повысить точность идентификации для разных режимов функционирования.

С другой стороны это предполагает значительные затраты вычислительных ресурсов, для снижения которых предложено добавить в метод критерий необходимости проведения структурно-параметрической идентификации. Это позволяет выполнять идентификацию процессов ККД и МСИ не только в режиме реального времени, но и в пакетном режиме.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку интеллектуальных прогнозирующих моделей процессов ККД и МСИ и оценку их эффективности.

### Список литературы

1. Корнієнко В.І. Ідентифікація нелінійних процесів по часових реалізаціях / В.І. Корнієнко, Д.Ю. Скриль // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 3. – С. 85-89.
2. 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.
3. Ljung L. Identification of Nonlinear Systems / L. Ljung // Proceeding of the IEEE. – 2006. – № 6. – P. 1-10.
4. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
5. Кузнецов С.П. Динамический хаос / С.П. Кузнецов – М.: Физматлит, 2002. – 296 с.
6. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение / Г. Шустер – М.: Мир, 1988. – 256 с.
7. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского, - М.: Наука, 1987. – 712 с.
8. Герасина А.В. Идентификация объектов управления в АСУТП рудоподготовки / А.В. Герасина, В.И. Корниенко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – № 10. – С. 102-106. – ISSN 2071-2227.
9. Герасина А.В. Идентификация режимов работы нелинейных процессов рудоподготовки / А.В. Герасина, В.И. Корниенко // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2010. – Вип. 85 – С. 82-90. – ISSN 0201-7814.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесарєвим В.В.  
Надійшла до редакції 16.06.11*

УДК 621.787.044

© Л.В. Грязнова, А.Г. Лисняк

## **СФЕРОИДИЗАЦИЯ ПЕРЛИТА В СТАЛИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

В работе исследовано влияние параметров ударно волнового нагружения на микроструктуру легированной стали. При обработке сталей ШХ15 и 55ХФА обнаружено явление динамической сфероидизации перлита, происходящее во время прохождения ударной волны, генерируемой двухслойным зарядом взрывчатого вещества..

У роботі досліджений вплив параметрів ударно хвильового навантаження на микроструктуру легованої сталі. При обробці сталей ШХ15 і 55ХФА виявлене явище динамічної сфероидизації перліту, що відбувається під час проходження ударної хвилі, генеруємою двошаровим зарядом вибухової речовини.

In this work influence of parametres of impact waves on a microstructure of the alloyed steel was investigated .After processing of steels ШХ15 and 55ХФА is investigated the phenomenon dynamic sferoidization in pearlit, an event is revealed during passage of the shock wave generated by a two-layer charge of explosion.

**Введение.** Углеродистые и легированные инструментальные и шарикоподшипниковые стали часто, подвергают сфероидизирующему отжигу на зернистый перлит. Сталь с такой структурой обладает наименьшей твердостью и легче обрабатывается резанием. Кроме того, зернистый перлит является оптимальной исходной структурой под закалку, т.к. имеет меньшую склонность к росту аусте-