

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

*В. П. Розен, В. П. Калинин, кандидаты техн. наук, А. В. Мейта, асп.  
(НТУУ «КПИ»)*

*Рассмотрено взаимное влияние теоретического и практического подходов к управлению процессами дробления и измельчения, выделены основные переменные, принимаемые в качестве целевых функций управления измельчением, предложена модель управления дробильно-измельчительным комплексом с учетом современных требований к технологии и энергосбережению.*

В решении вопросов автоматизации любого производственного процесса можно выделить два основных взаимовлияющих направления: теоретические разработки, описывающие процесс, и практическая реализация имеющихся знаний. В силу того, что физически дробление и измельчение представляют собой разрушение горных пород под действием внешней приложенной силы, они описываются одинаковыми законами [1, 2]. Законы дробления–измельчения описывают зависимости между затратами энергии на разрушение материала и крупностью выходного продукта.

В наиболее простой форме уравнение, выражающее эмпирический закон дробления, выглядит так:

$$dE = -k_m \cdot \frac{dx}{x^n}, \quad (1)$$

где  $E$  – удельная энергия, сообщаемая единице объема разрушаемого тела, необходимая для прироста энергии вновь образованной поверхности;  $k_m$  – коэффициент условий измельчения;  $x$  – средний диаметр зерен;  $n$  – коэффициент, который зависит от диапазона крупности и способа дробления (измельчения).

На основании уравнения (1) и эмпирических данных были получены уравнения Риттингера, Кика–Кирпичева, Бонда, которые определяли зависимость энергии разрушения от геометрических размеров измельчаемого вещества.

Другим важным аспектом, рассматриваемым при изучении дробления и измельчения, является кинетика этих процессов [1–3]. В простейшем случае полагают, что скорость убывания массы продукта крупного класса пропорциональна массе недоизмельченного крупного класса:

$$\frac{dQ}{dt} = -kQ, \quad (2)$$

где  $Q$  – масса остатка крупного класса;  $t$  – продолжительность измельчения.

Уравнение (2) преобразуется к виду

$$Q = Q_0 \cdot e^{-kt}, \quad (3)$$

где  $Q_0$  – остаток крупного класса до измельчения.

Уравнение (3) было скорректировано В. В. Товаровым [2, 3]:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-kt^m}, \quad (4)$$

где  $m$  – параметр, характеризующий изменение относительной скорости измельчения.

На данном этапе изучения процессов дробления и измельчения был сделан упор на рассмотрении внутренних процессов, протекающих в веществе, а именно, на распределении и изменении гранулометрического состава. Изучалась динамика изменения количества вещества внутри объекта (дробилки, мельницы), влияние свойств вещества на его разрушение и на объект [2]. На теоретическом этапе были выявлены закономерности в изменении характеристик материала и воздействий на него. Это дало возможность применять полученные результаты для создания систем управления дроблением и измельчением и для проектирования измельчительного оборудования

Первые, наиболее простые одноконтурные системы управления (СУ) реализовали принцип управления, согласно которому изменение некоторого параметра, характеризующего работу мельницы  $\Delta Y$ , например вращающего момента, соответствовало изменению управляющего воздействия  $\Delta X$ , например подачи [4] (рис. 1).

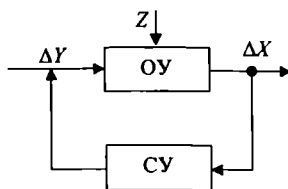


Рис. 1. Схема одноконтурной системы управления

Такие одноконтурные СУ различались между собой лишь выбранными управляющими воздействиями (загрузка, частота вращения, выходная производительность) и управляемыми величинами (ток пылеуловительной системы, внутримельничное заполнение, давление масла в цапфе) [5, 6].

Дальнейшее усовершенствование систем управления привело к созданию многоконтурных систем управления и использованию задатчиков (рис. 2).

Выработка управляющих воздействий  $Y_0 \dots Y_N$  по контурам производится при условии, что некоторая управляемая величина  $X_0$ , например тонкость измельчения, фиксируется в заданных пределах, а регулировка осуществляется с учетом изменения остальных управляемых переменных  $X_1 \dots X_N$  (таких как степень загрузки, ток пылеуловительной системы, разность давлений в камерах) и возмущающего воздействия [7].

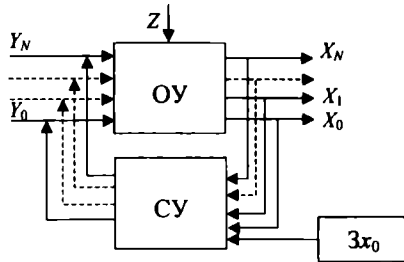


Рис. 2. Схема многоконтурной системы управления

При создании подобного рода систем использовался математический аппарат операторного исчисления. Полученные теоретические представления о процессе дробления—измельчения в дальнейшем позволили создать модели, имитирующие объекты типа мельницы и дробилки, и технологические цепочки с их применением.

Согласно [8–10] дробилка как объект автоматического регулирования математически может быть описана инерционным звеном первого или второго порядка с учетом транспортного запаздывания. Таким образом, динамические свойства дробилок по каналам производительность питателя—производительность дробилки, крупность исходного материала—производительность дробилки, прочность дробимого материала—потребляемая мощность могут быть представлены в виде передаточной функции [11]

$$W_{др} = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{T \cdot p + 1}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент усиления;  $\tau$  – время запаздывания;  $T$  – постоянная времени объекта.

Такой же вид имеет и передаточная функция шаровой мельницы [12]:

$$W_m = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{T \cdot p + 1}. \quad (6)$$

Такое описание позволяет осуществлять моделирование объекта и управлять процессом на основании поступающей информации. В процессе управления измельчением в качестве целевой функции управления чаще всего

принимают три величины: качество измельчения, производительность по готовому продукту и потребляемую мельницей мощность. Анализ существующих систем и методов управления, выполненный при проведении патентных исследований (изучался период с 1985 по 1998 гг.), показал, что задачи управления дроблением и измельчением в основном сводились к поддержанию на заданном уровне либо изменению по требуемому закону производительности питателя  $Q$  и тонкости помола  $T$ . Эти две величины характеризуют измельчение как технологический процесс по показателям количества и качества. Однако такое описание процесса измельчения не затрагивает очень важной характеристики процесса – его эффективности. Критерием эффективности можно считать показатель электропотребления  $W$ . Разрушение вещества дроблением и истиранием – энергоемкий процесс с большими потерями, поэтому важно правильно использовать энергию, которая непосредственно совершает полезную работу, и не увеличивать и без того большие потери. Это может быть достигнуто благодаря оптимальному управлению.

Любой производственный процесс представляет собой с математической точки зрения задачу многокритериальной оптимизации, основная методологическая трудность которой состоит в том, что не вполне понятно, какое решение считать оптимальным. Учитывая важность энергосбережения, цель оптимального управления можно сформулировать следующим образом: достижение минимального электропотребления при поддержании производительности оборудования и качества измельчения материала в регламентируемых пределах. Эту же цель можно сформулировать и как задачу многокритериальной оптимизации, а именно: достичь минимального электропотребления, максимальной производительности и максимального качества измельчения (рис. 3).

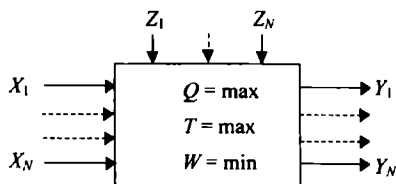


Рис. 3. Схема предлагаемого подхода к управлению процессом измельчения

В настоящее время авторами разрабатывается модель описания объектов измельчающего комплекса, использование которой позволит решать сформулированную задачу многокритериальной оптимизации процесса измельчения материалов.

Подходящим математическим аппаратом для решения подобного рода задач являются искусственные нейронные сети (ИНС) [13–15]. Нейронные сети обучаемы, предназначены для работы с большим количеством переменных, осуществляют прогнозирование и могут заменить человека в принятии

решений. Задача моделирования процесса измельчения с помощью нейронных сетей реализуется следующим образом (рис. 4).

Каждому входу сети соответствует один из факторов. Выходы сети соответствуют производительности, тонкости помола и электропотреблению. Весовые коэффициенты сети определяют значимость входных факторов. Таким образом можно выявить иерархию факторов. В дальнейшем, на основании полученной иерархии, можно будет свести задачу многокритериальной оптимизации к однокритериальной. Сеть может также прогнозировать состояние системы на основании имеющихся данных и оптимизировать работу по заданным параметрам. В качестве оптимизационных параметров можно принять  $T$ ,  $W$  и  $Q$  либо ввести обобщающий показатель, отражающий все три критерия в зависимости от их значимости. На основе описанной нейронной сети можно построить систему оптимального управления измельчением. Принятые входные факторы и выходные переменные определяются для каждого конкретного случая моделирования.

Потребляемая мельницей мощность зависит от ее загрузки и скорости вращения, поэтому модель электропотребления мельницы можно представить в виде двух взаимодействующих составляющих: скорости вращения  $n$  и внутримельничного заполнения (ВЗ). Скоростная составляющая однозначна, не ниже некоторого значения, при котором вообще возможно измельчение, и легко управляется при помощи регулируемого привода.

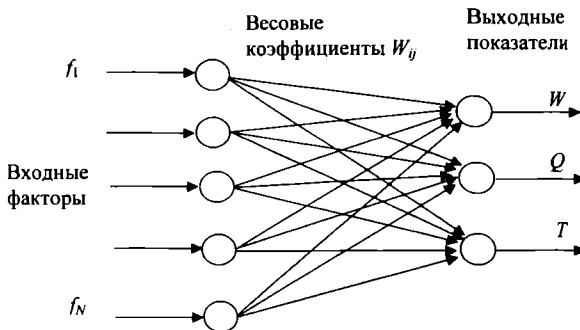


Рис. 4. Модель нейронной сети для управления процессом измельчения

Внутримельничное заполнение, напротив, является функцией многих переменных. Прежде всего, эта величина определяется заданными производительностью и качеством, затем она должна учитывать по возможности как можно большее число возмущающих воздействий и, кроме того, быть функцией времени – выполнять функции прогнозатора (ПР), определяя влияние предыдущих значений факторов на их текущие значения. Такое представление о внутримельничном заполнении позволит учесть многофакторность объекта и устранить влияние его инерционности (рис. 5).

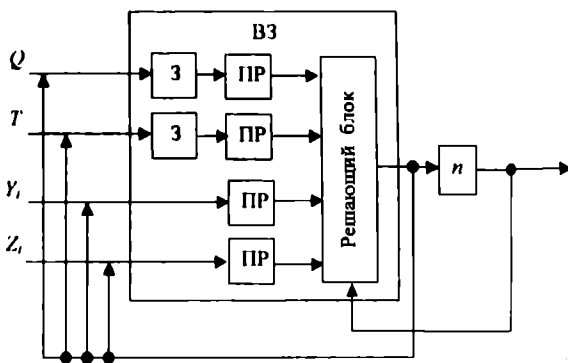


Рис. 5. Модель электропотребления мельницы

Рассмотренная модель мельницы в качестве составного элемента включается в схему многостадийного измельчения при последовательной работе двух мельниц или комплекса дробилка-мельница. В этом случае получаем систему из двух электропотребляющих объектов и задачей уже будет подбор скоростей, обеспечивающих минимальное электропотребление. При этом первая мельница будет выполнять функции питателя для второй мельницы, что позволяет регулировать не только производительность, но и тонину помола. Здесь возникает дополнительная задача – подбор степени измельчения породы первой мельницей для обеспечения оптимальной (по электропотреблению) работы системы. Если в случае работы одной мельницы скорость являлась регулирующим параметром, а производительность и тонина – рассчитываемыми, то при совместной работе все три переменные первой мельницы становятся регулирующими для второй мельницы (рис. 6).

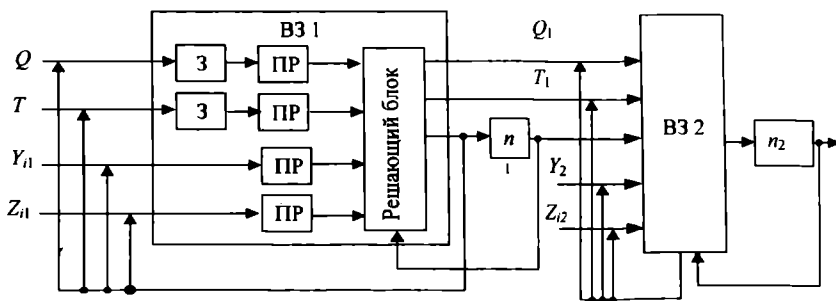


Рис. 6. Модель электропотребления измельчительного комплекса

Реализация описанной модели означает переход в управлении дробильно-измельчительным оборудованием на новый, системный уровень, при котором учитывается не только влияние одного единичного фактора на другой, но и их комплексное взаимовлияние.

Результаты сравнения системного подхода к созданию систем управления измельчением с другими существующими направлениями представлены в виде таблицы.

| Направление                                      | Математическая модель  | Характеристики   | Решаемая задача  |
|--|--|--|--|
| 1. Теоретическое описание                        | Законы дробления (измельчения), уравнения кинетики измельчения [1–3] | Хорошо описаны внутренние процессы. Объект не рассматривается как часть системы  | Исследование объекта и установление основных закономерностей |
| 2. Моделирование при помощи передаточных функций | Передаточные функции на основе операторного исчисления [8–10]        | Объект представлен как элемент системы, налажена связь с другими элементами системы. Недостаточно учтены внутренние процессы, не отражено взаимное влияние различных факторов        | Создание контуров управления                                 |
| 3. Системный подход                              | Искусственные нейронные сети [13–15]                                 | Реализует принципы системного подхода, учитывает многообразие факторов и связей между ними. Требуется наличие некоторой базы для проведения настройки системы и время на ее обучение | Многокритериальная оптимизация                               |

### Выводы

1. Проанализированы направления развития систем управления измельчением. Выявлена их взаимосвязь, преимущества и недостатки каждого из них. Наиболее перспективным можно считать системный подход, при котором объект рассматривается комплексно, с учетом всех определяющих его факторов и внутренних связей.

2. Модель на базе ИНС по своей структуре многосвязна и является наиболее подходящим математическим аппаратом для реализации принципов системного подхода.

3. Нейронная сеть способна решить задачу построения многофакторной модели мельницы. По имеющимся обучающим последовательностям сеть может установить значимость факторов (весовые коэффициенты), связь между ними и закономерности изменения каждого из факторов. Полученная информация дает возможность осуществлять прогнозирование и оптимизацию процесса измельчения по параметрам  $W$ ,  $Q$  и  $T$ , а также свести задачу многокритериальной оптимизации к однокритериальной по принятому обобщенному параметру эффективности.

1. *Перов В. А., Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990.

2. *Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А.* Закономерности измельчения и исчисление гранулометрического состава. – М.: Металургиздат, 1959.

3. *Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980.

4. *Утеуш З. В. Утеуш Э. В.* Управление измельчительными агрегатами. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.

5. *А. с. 1351673, В 02С 25/00.* Система автоматического контроля параметров цикла измельчения.

6. *А. с. 895511, В 02С 25/00.* Способ автоматического управления внутримельничной загрузкой многокамерной шаровой мельницы.

7. *А. с. 718168, В 02С 25/00.* Способ автоматического управления внутримельничной загрузкой в цементной мельнице.

8. *Комарский Б. Д., Ситковский А. Я., Красноомовец А. В. и др.* Автоматическое управление обогатительными фабриками. – М.: Недра, 1977.

9. *Назаренко В. М.* О колебании грузопотоков поточно-транспортных систем дробильных фабрик ГОКов // Изв. вузов. Горный журнал. – № 9, 1977. – С. 138–143.

10. *Назаренко В. М.* Системы управления механизмами дробильно-сортировочных фабрик. – М.: Недра, 1985.

11. *Гинзбург И. Б., Смоленский А. Б.* Автоматизация цементного производства. Справочное пособие. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отд. – 1986.

12. *Нестеров Г. С.* Технологическая оптимизация обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1976.

13. *Суровцев И. С., Клюкин В. И., Пивоварова Р. П.* Нейронные сети. – Воронеж: ВГУ, 1994.

14. *Заенцев И. В.* Нейронные сети: основные модели. – Воронеж: ВГУ, 1999.

15. *Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Пер. с англ.* – М.: Горячая линия–телеком, 2000.