

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.51.011

DOI: 10.14529/ctcr190211

## ВЫБОР РЕШЕНИЙ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ НЕЙРОУПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА ШИХТЫ В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Предлагается метод нейроуправления технологическим процессом помола шихты в цементном производстве с целью повышения его энергоэффективности. Необходимость применения нейроуправления вызвано тем, что качество помола и потребление ресурсов зависит от многих факторов, которые представляют большие трудности их измерения и прогнозирования показателей эффективности. Достоверное измерение влияющих факторов необходимо для решения задачи определения наилучшего сочетания объема шаровой нагрузки помола и необходимого количества твердых веществ для оптимизации показателя уменьшения размера частиц шихты при минимальном удельном расходе энергии. Нейроуправление строится на основе обучения нейронной сети с учителем, в роли которого выступает опытный оператор мельницы, реализующий эффективное управление процессом помола. Контроллер, построенный на основе нейронных сети, должен работать в реальном времени и отражать текущее состояние процесса помола. Выбор решений при решении задачи оперативного управления с использованием нейронной сети относится к классу многокритериальных задач. В работе предложен метод принятия решений, исходя из множества допустимых технических условий, накладываемых на процесс помола. Подобная постановка задачи в общем случае является противоречивой. В работе предложен подход к решению данной задачи на основе определения максимального числа совместных взвешенных условий, налагаемых на процесс. Подобный подход позволяет организовать интерактивную процедуру выбора допустимого решения при оперативном управлении процессом помола. Предложена оперативная компьютерная модель процесса помола клинкера при производстве цемента.

*Ключевые слова:* цемент, клинкер, нейронная сеть, шихта, процесс помола, оперативное управление, выбор решений в противоречивой постановке.

### Введение

Технологический процесс помола относится к энергоемким производствам. Вопросы, связанные с уменьшением энергопотребления, повышением качества и оптимизацией технологического процесса помола, являются актуальными.

На эффективность процесса измельчения влияет как скорость размола, так и скорость транспортировки шихты через мельницу, которые, в свою очередь, зависят от конструктивных и эксплуатационных факторов, таких как профиль гильзы, объем груза, свойства суспензии и скорость вращения мельницы [1–3]. Известно, что на станках с переменной скоростью, характерных для обычных шаровых мельниц, свойства суспензии и объем загрузки являются наиболее влиятельными рабочими факторами [4, 5].

Клинкер транспортируется к мельнице, чтобы быть измельченным в мелкий порошок – цемент. Для контроля заданных свойств получаемого цемента добавляется небольшое количество гипса во время измельчения. Весьма типично добавлять определенное количество воды и небольшие количества органических шлифовальных добавок для контроля температуры мельницы и облегчения процесса измельчения. Смешанные цементы и кладочные цементы могут включать большие добавки (до 40 %) [6]. Наиболее распространенным оборудованием для измельчения цемента является шаровая мельница, заполненная стальными шарами. Материал, подаваемый через мельницу, измельчается при ударе и при истирании между шарами. Для повышения эффек-

тивности системы замкнутого цикла широко используется при измельчении цемента материал, выходящий из шаровой мельницы, который направляется в сепаратор и разделяется на крупную и мелкую фракции. Грубая фракция направляется на вход мельницы для повторного измельчения, а мелкая фракция становится цементом. Скорость начальной реакции цемента и воды прямо пропорциональна удельной поверхности цемента [7], поэтому процесс измельчения тщательно контролируется для получения продукта с желаемыми характеристиками тонкости.

С другой стороны, уровень заполнения мельницы (объем нагрузки) определяет режим движения нагрузки внутри мельницы и интенсивность помола. Эти события в значительной степени влияют на потребление энергии и скорость сокращения размеров. Понимание основных эффектов взаимодействия двух рабочих факторов производительности мельницы имеет важное значение для установления оптимальных параметров для эффективного помола.

При производстве цемента невозможно измерить все параметры помола, поэтому является перспективным применение современных интеллектуальных технологий на основе нейронных сетей. Применение нейронных сетей вызывает определенную сложность, так как требуется статистика за длительный период. Поскольку параметры исходных материалов могут достаточно быстро изменяться, то актуальной задачей здесь является оперативная настройка сети.

### 1. Нейроуправление процессом помола шихты в цементном производстве

Нейронные сети обладает целым рядом свойств, привлекательных с точки зрения их практического использования на процессах измельчения и классификации:

- высокое быстродействие за счёт использования параллелизма обработки информации;
- толерантность к ошибкам: работоспособность сохраняется при повреждении значительного числа нейронов;
- способность к обучению, программирование вычислительной системы заменяется обучением.

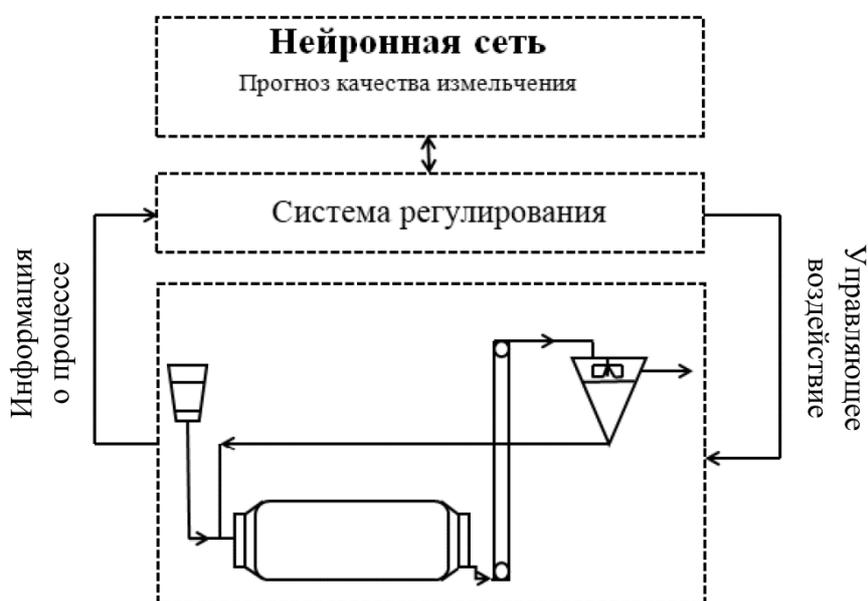


Рис. 1. Структура системы управления процессом помола замкнутого цикла

Эффективное управление процессом (рис. 1) имеет большое значение для увеличения пропускной способности контура измельчения и качества конечного продукта, а также для значительного сокращения производственных затрат, особенно в отношении потребления энергии, составляющего высокий процент таких затрат [6]. В качестве метода управления применяется нейронная сеть, на основе которой осуществляется прогнозирование поведения объекта управления при различных входных воздействиях. Обратная связь в таких системах управления используется для корректировки неточностей, связанных с внешними помехами и неточностью математической

модели объекта управления. Регулятор полагается на эмпирическую модель процесса для того, чтобы предсказать дальнейшее его поведение, основываясь на предыдущих значениях переменных состояния [6, 7].

### 2. Замкнутый цикл измельчения

При измельчении в замкнутом цикле измельченный в мельнице материал поступает в сепаратор, отделяющий готовый продукт от класса крупной «крупки», которая возвращается в мельницу для измельчения (рис. 2). Крупка циркулирует в системе сепаратора, пока не будет измельчена до требуемой крупности [8–15].

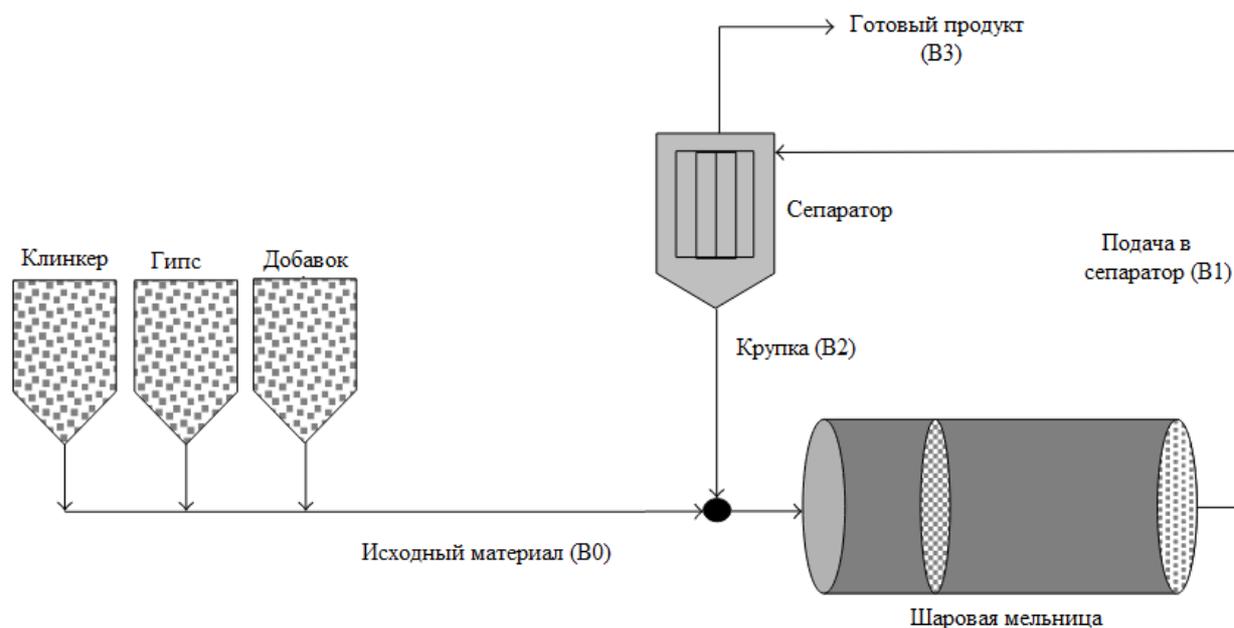


Рис. 2. Измельчение с замкнутым контуром

Исходный материал (В0) (клинкер, гипс и добавок) поступает в мельницу. После измельчения элеватор передает весь измельченный материал (В1) в роторный сепаратор, где он разделяется на две фракции. Грубая фракция представляет собой отбраковку (крупка) сепаратора (В2), которая отправляется обратно на мельницу для дополнительного цикла измельчения, тогда как мелкая фракция становится конечным продуктом (В3).

Конструктивные параметры промышленной трубной мельницы и роторного сепаратора приведены в табл. 1.

Расчетные параметры трубной шаровой мельницы и сепаратора

Таблица 1

Трубная шаровая мельница	Отделение		Роторный сепаратор	
	1	2		
Внутренний диаметр, м	3,6	3,7	Диаметр ротора, м	2
Внутренняя длина, м	3,6	8,4	Высота ротора, м	1,6
Степень наполнения, %	29,5	34	Мощность мотора, кВт	110
Вес загрузки, т	43	138	Скорость ротора, об/мин	260
Размер шаров, мм	20–50	15–20	Мощность вентилятора, кВт	280
Мощность двигателя мельницы, кВт	3200		Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	1500
Скорость мельницы, об/мин	17		–	–
Мощность двигателя вентилятора, кВт	150		–	–
Производительность, т/ч	90		–	–

Рабочие условия мельницы, работающей в замкнутом контуре с сепаратором, могут быть выражены следующими основными уравнениями:

$$B1a = B3b + B2c ;$$

$$B1 = B3 + B2 = B0 + B2 ,$$

где  $B0$  – количество исходного материала, поступающего в мельницу;

$B1$  – количество материала, поступающего в сепаратор;

$B2$  – количество «крупки»;

$B3$  – количество готовой продукции;

$a, b, c$  – количество мелкой фракции, проходящей через контрольное сито, соответственно, в материале, поступающем в сепаратор; в готовом продукте – крупке, %.

При измельчении в замкнутом цикле количество готового продукта всегда равно количеству исходного материала, при повторном входе в измельчение циркулирующие зерна могут быть в несколько раз больше исходного материала. Циркулирующего материала (крупки) может быть в несколько раз больше, чем исходного материала.

Стационарное количество циркулирующего зерна называется циркулирующей нагрузкой, которая может быть выражена относительным значением  $A$ , т. е. отношением количества крупки, возвращаемой в сепаратор, к количеству готовых продуктов или исходного материала:

$$A = \frac{B2}{B3} \text{ или } A = \frac{B2}{B0} .$$

При замкнутом цикле на мельницу подается комбинированная нагрузка, состоящая из исходного материала и циркулирующей крупки; ее относительная величина называется кратностью циркуляции:

$$C_{ц} = \frac{B1}{B3} \text{ или } C_{ц} = \frac{B1}{B0} .$$

Кратность циркуляции можно определить по результатам просева на ситах по формуле

$$C_{ц} = \frac{bc}{a - c} .$$

Производительность сепаратора характеризуется значением КПД, т. е. отношением количества мелких фракций в готовом продукте к количеству их в материале, поступающем в сепаратор:

$$\text{КПД} = \frac{bB3}{aB1} .$$

КПД может быть определен по результатам просева на ситах:

$$\text{КПД} = \frac{b}{a} \cdot \frac{a - c}{b - c} .$$

При замкнутом цикле измельчения производительность мельницы с тем же энергопотреблением возрастает с увеличением коэффициента циркуляции. Чем больше коэффициент циркуляции, тем больше загрузка материала в мельницу. Поскольку количество материалов в мельнице остается практически постоянным, увеличение количества загружаемого материала в мельнице влияет только на скорость прохождения материала через мельницу.

Увеличение скорости прохождения материала через мельницу с увеличением кратности циркуляции способствует повышению эффективности работы шаров, что в свою очередь также вызывает увеличение производительности мельницы.

Следовательно, для каждого измельчаемого материала должна быть выбрана его собственная оптимальная кратность циркуляции в зависимости от его физико-механических свойств.

С.Е. Андреевым и рядом других исследователей [16] установлено, что отрицательное влияние низкой эффективности сепаратора на производительность мельницы влияет больше при малых значениях кратности циркуляции, чем при высоких значениях. Одним из условий нормальной работы центробежных сепараторов является их постоянная равномерная загрузка материала. Неравномерность подачи материала в сепаратор приведет к снижению качества сепарации и приведет к увеличению содержания готовой мелкой фракции в крупках, возвращаемых на мельницу, и в грубых материалах в готовом продукте.

### 3. Потребность в энергии для производства цемента

Производство цемента является энергоемким процессом. Типичное энергопотребление современного цементного завода составляет около 110–120 кВт·ч на тонну производимого цемента [17]. В то время как постоянно растущий мировой спрос на цемент растет, спрос на энергию на заводе также растет. Несмотря на технологические инновации последних десятилетий, нацеленные на повышение эффективности производственного процесса (сухой процесс по сравнению с мокрым; использование подогревателей, предварительных кальцинаторов, высокоэффективных динамических сепараторов и т. д.), цементный завод сегодня имеет постоянно увеличивающееся общее потребление энергии благодаря более высоким производственным показателям, возврату к углю, повышению тонкости цемента и более строгим требованиям по защите окружающей среды [17].

Распределение общей энергии, потребляемой цементным заводом, между этапами производственного процесса показано на рис. 3.

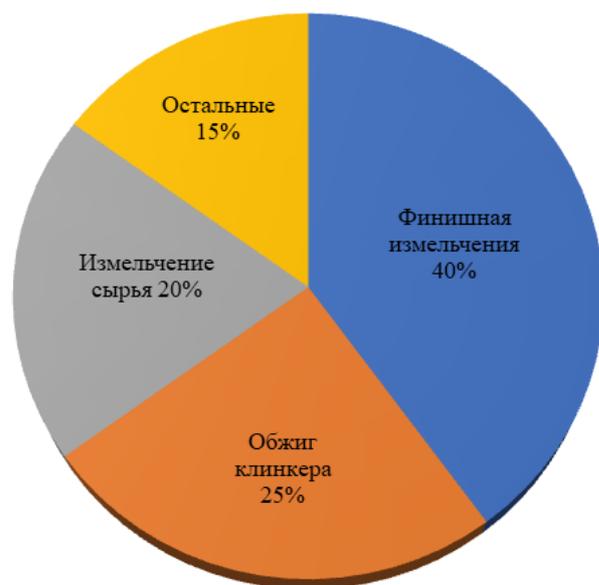


Рис. 3. Распределение энергии среди оборудования для производства цемента

Несмотря на то, что печь является крупнейшей движущейся частью оборудования на цементном заводе, она использует только 25 % энергии завода. Наиболее энергоемким процессом производства цемента является финишный помол, который потребляет в среднем 40 % всей энергии, необходимой для производства тонны цемента [17]. Такое высокое значение может быть оправдано тем фактом, что значительное количество энергии, подаваемой двигателем мельницы, выделяется в виде тепла, создаваемого трением в измельчающей среде. Кроме того, потребность в энергии измельчения гиперболически возрастает с увеличением крупности частиц цемента [6].

В реальных условиях эксплуатации мельницы параметры процесса помола могут изменяться, в этом случае стоят задачи оперативной перенастройки нейронной сети. Эту задачу во многих случаях решить сложно, так как теку-

щие данные эксплуатации могут не содержать достаточно информации о параметрах процесса.

В работе предлагается метод принятия решения по выбору управляющих факторов с учетом заданных технико-экономических ограничений, который позволяет оператору выбрать оптимальные параметры для загрузки мельницы, чтобы получить качественный продукт при минимизации потребляемых ресурсов.

### 4. Решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы

Особенность задачи выбора рационального выбора параметров загрузки мельницы состоит в том, что число управляющих факторов невелико, а количество ограничений значительно превышает число управляющих факторов.

Действительно, в качестве управляющих факторов мы будем рассматривать величину загрузки мельницы  $x_1$  – клинкер,  $x_2$  – гипс и  $x_3$  – добавки. Выходными параметрами являются множество показателей  $\{y_i\}$  согласно табл. 2. Ограничения на показатели:

$$a_i \leq y_i \leq b_i. \quad (1)$$

На основе построения эмпирических зависимостей с использованием метода наименьших квадратов и нейронных сетей можно получить

$$y_i = h_i(x_1, x_2, x_3). \quad (2)$$

С учетом (1) и (2) можно получить

$$a_i \leq h_i(x_1, x_2, x_3) \leq b_i; \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

Таблица 2

Данные, собранные с течением времени  
во время промышленного измельчения за день

День/ время, ч:мин	Подача (B0), т/ч	Откло- нено (крупка) (B2), т/ч	Удельный расход электро- энергии кВт·ч/т	Блейн, см <sup>2</sup> /г	Звук мельницы, дБ	Мощность двигателя мельницы, %	Роторный мотор, кВт	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	Циркули- рующая нагрузка
1/8:00	25,5	12,9	28	3820	82	79,3	108,4	1366	1,43
1/9:00	26	11	28,1	3840	83,3	79,1	105,6	1380	1,45
1/10:00	25,5	12,7	28,3	3885	81,9	79,3	108	1365	1,43
1/11:00	26,5	12,3	28	3850	82,7	79,3	108,3	1294	1,43
1/12:30	32,6	15	28,1	3660	86,1	74	113,5	1310	1,56
1/13:00	34	17	29	3835	85	75,9	113,8	1406	1,73
1/14:00	35,6	18	29,4	4105	85,7	76,1	122	1415	1,69
1/15:00	38,1	17,3	30	3860	81,3	78,5	121	1303	1,62
1/16:00	38,6	19,1	32	3825	80,7	78,8	128,1	1304	1,58
1/17:00	32,6	11,8	28,9	3660	86,1	74	113,5	1310	1,56
1/18:00	34	16,5	28,1	3835	85	75,9	113,8	1406	1,73
1/19:00	35,6	16,8	28,3	4105	85,7	76,1	122	1415	1,69
1/20:00	38,1	19,2	29,2	3860	81,3	78,5	121	1303	1,62

В итоге рациональный выбор параметров загрузки мельницы состоит в формальном решении системы неравенств (3).

Для решения система неравенств приводится к канонической форме:

$$h_i(x_1, x_2, x_3) - b_i \leq 0; \quad (4a)$$

$$a_i - h_i(x_1, x_2, x_3) \leq 0. \quad (4b)$$

Формально неравенство (4) можно писать в следующем виде:

$$f_i(x_1, x_2, x_3) \leq 0. \quad (5)$$

В общем случае система неравенств (5) является несовместной. Поэтому решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы математически сводится к решению системы несовместных неравенств:

$$f_i(x) \leq 0, \quad i \in I_{\text{нер}}. \quad (6)$$

Здесь  $I_{\text{нер}}$  – множество значений индексов неравенств соответственно;  $x$  – вектор искомым параметров;  $f_i(x)$  – монотонные, непрерывные и дифференцируемые функции. Необходимо определить максимально совместную подсистему уравнений и неравенств (6) по критерию

$$\max_{(x)} C(x), \quad C(x) = \Phi(\mu(x)), \quad (7)$$

где  $\mu$  – вектор, составленный из характеристических функций  $\mu_i$  неравенств ( $\mu_i = 1$ , если  $i$ -е неравенство выполняется, в противном случае  $\mu_i = 0$ );  $\Phi(\mu)$  – монотонная положительно определенная числовая функция булевых переменных  $\mu$ .

В частном случае критерий (7) имеет вид

$$C(x) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu_j(x), \quad (8)$$

где  $\alpha_j$  – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям

$$\forall_j \alpha_j \geq \sum_{j=1}^m \alpha_j = 1.$$

Решение системы неравенств (6) по критерию (8) позволяет выделить среди всех максимально совместных подсистем системы (6) такую подсистему, которая обладает максимальным суммарным весом. Другими словами, в данном случае выделяется максимально совместная подсистема

тема, наиболее важная с точки зрения решаемой предметной задачи. При равенстве весов решение задачи (6), (8) выделяет максимально совместную подсистему с максимальным числом неравенств. В общем случае, когда рассматривается задача (6), (7), соответствующее решение позволяет выделить максимально совместную структуру неравенств, оптимальную по обобщенному критерию (6).

Содержательная интерпретация рассмотренного выше алгоритма поиска оптимальных решений в противоречивых условиях состоит в следующем.

На начальном этапе лицо, принимающее решения (ЛПР), формулирует набор условий, которым должно удовлетворять искомое решение. Понимая, что не все желательные условия могут быть выполнены, ЛПР формулирует предпочтения, определяющие желательность выполнения отдельных условий, а также общую целевую функцию, которая количественно выражает степень выполнения поставленных условий в целом.

С математической точки зрения целевая функция представляет собой отображение

$$\mu \xrightarrow{\phi_1} C, \quad \mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T,$$

где

$$\mu_j = \begin{cases} 1, & \text{если } \gamma_j \in D_j; \\ 0, & \text{если } \gamma_j \notin D_j; \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

Здесь каждое  $j$ -е условие описывается вектором своих параметров  $\gamma_j$ . Само условие представляется в виде области допустимых значений параметров  $D_j$ . Характеристическая функция условия  $\mu_j$  определяет факт принадлежности вектора параметров  $\gamma_j$  соответствующей области допустимых значений  $D_j$ .

Далее, основываясь на рассмотренном выше методе ветвей и границ, ЛПР осуществляет глобальный поиск оптимального решения поставленной задачи согласно приведенному выше алгоритму. Однако полученное решение в общем случае может не оправдывать ожидания ЛПР. Часть поставленных условий при этом не будут выполнены и реальное значение целевой функции  $C^P(\ell_n)$  будет меньше ожидаемого  $C_{\max}^{\text{ож}}$ . Поэтому полученное решение  $x_1^{\text{opt}}$  будет являться частным.

Дальнейшее развитие процесса решения задачи может осуществляться на основе двух подходов.

Первый подход основывается на переводе недостигнутых ограничений в разряд частных целевых функций. В результате может быть поставлена задача оптимизации, в которой ограничениями выступают выполненные ограничения, а в качестве целевой функции используется обобщенная целевая функция, составленная из частных целевых функций недостигнутых ограничений. В результате решения подобной задачи оптимизации будут определены величины ограничений, необходимые для непротиворечивой постановки задачи выбора решений.

Необходимо отметить, что в общем случае каждое ограничение отражает определенный аспект рассмотрения реального объекта оптимизации, за которым стоят специальные теории и технические решения. Поэтому постановка задачи снятия частных ограничений приводит к соответствующим задачам специальных научно-практических исследований.

Второй подход основывается на следующем.

После получения частного решения ЛПР стремится достичь невыполненные ограничения в том виде, в каком они были поставлены, и сосредоточит на этой цели свое внимание. В результате изменится структура предпочтений ЛПР, соответственно изменится и целевая функция задачи:

$$\mu \xrightarrow{\phi_2} C.$$

Решение поставленной задачи с измененной структурой целевой функции позволит получить следующее оптимальное решение  $x_2^{\text{opt}}$ , для которого уже будут выполняться ранее не выполнявшиеся условия. Однако и это решение в общем случае также будет частным, так как не все условия поставленной задачи будут выполняться.

Процесс изменения структуры целевой функции и повторные решения задачи могут итеративно повторяться до тех пор, пока на совокупности полученных частных решений  $\{x_1^{opt}, x_2^{opt}, \dots\}$  не будут выполнены все поставленные условия. Дальнейшее движение вперед основывается на неформальном содержательном изучении данной совокупности частных решений с целью исследования возможности их логического объединения в целостную систему. В общем случае полученные частные решения противоречат друг другу, характеризуются несовместимыми свойствами. Поэтому объединить их можно лишь на абстрактном уровне путем отвлечения от несовместимых свойств и выдвижения на этой основе общей объединяющей идеи. Последующая разработка выдвинутой идеи должна опираться на всю совокупность знаний в рассматриваемой предметной области и представлять собой сложную интеллектуальную операцию синтеза конкретного решения. В результате подобной интерактивной процедуры можно прийти к синтетическому решению, логически объединяющему свойства, которые вначале были несовместимыми.

На рис. 4 представлена оперативная компьютерная модель процесса помола клинкера при производстве цемента.

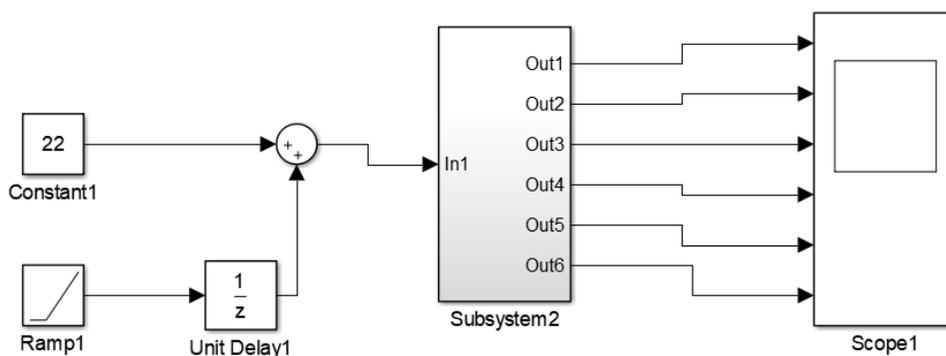


Рис. 4. Оперативная компьютерная модель процесса помола клинкера при производстве цемента

Результаты компьютерного моделирования процесса помола клинкера при производстве цемента представлены на рис. 5.

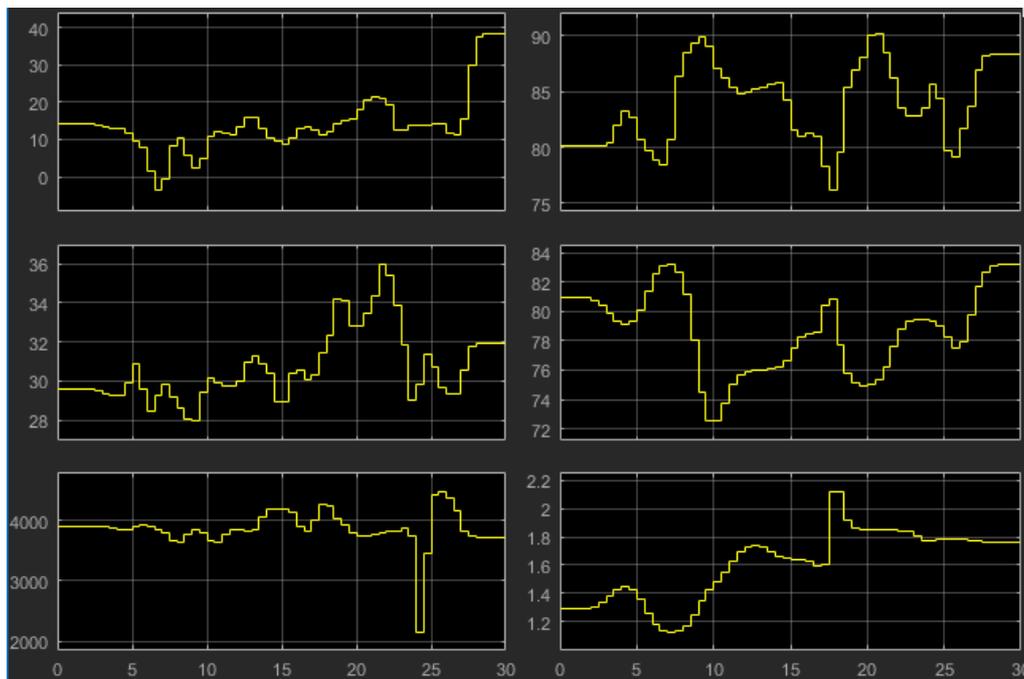


Рис. 5. Изменения крупки на повторном помоле (score1); удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т (score2); тонкость помола по Блейну, см<sup>2</sup>/г (score3); роторный мотор, кВт (score4); мощность двигателя мельницы, кВт (%) (score5) и циркулирующая нагрузка (score6)

Таким образом, в результате исследования, проведенного на компьютерной модели процесса, выявлены конкретные технологические режимы проведения процесса помола клинкера при производстве цемента.

### Заключение

Для повышения эффективности помола шихты в цементном производстве перспективным является использование нейронных сетей. Настройка нейронной сети, как правило, производится на основе статистики данных эксплуатации технологического процесса помола. Выбор решений при решении задачи оперативного управления с использованием нейронной сети относится к классу многокритериальных задач. В работе предложен метод принятия решений, исходя из множества допустимых технических условий, накладываемых на процесс помола. Подобная постановка задачи в общем случае является противоречивой. В работе предложен подход к решению данной задачи на основе определения максимального числа совместных взвешенных условий, налагаемых на процесс. Подобный подход позволяет организовать интерактивную процедуру выбора допустимого решения при оперативном управлении процессом помола.

### Литература

1. Austin, L.G. *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling* / L.G. Austin, R.R. Klimpel, P.T. Luckie. – New York: SME/AIME, 1984.
2. Songfack, P. *Hold-up studies in a pilot scale continuous ball mill: Dynamic variations due to changes in operating variables* / P. Songfack, R. Rajamani // *International Journal of Mineral Processing*. – 1999. – Vol. 57. – P. 105–123. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00010-1
3. *Measurement of shear rates in a laboratory tumbling mill* / I. Govender, N. Mangesana, A.N. Mainza, J.-P. Franzidis // *Minerals Engineering*. – 2011. – Vol. 24. – P. 225–229. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.08.009
4. Makokha, A.B. *Characterizing slurry hydrodynamic transport in a large overflow tubular ball mill by an improved mixing cell model based on tracer response data* / A.B. Makokha, M.H. Moys // *Powder technology*. – 2011. – Vol. 211. – P. 207–214. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.04.019
5. *Optimisation of the secondary ball mill using an on-line ball and pulp load sensor – The Sensomag* / P. Keshav, B. de Haas, B. Clermont et al. // *Minerals Engineering*. – 2011. – Vol. 24 (3). – P. 325–334. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.10.011
6. Bhatti, J. *Innovations in Portland Cement Manufacturing* / J. Bhatti, F. Miller, S. Kosmatka. – Skokie, Ill, USA: Portland Cement Association, 2004. CD-ROM: SP400.
7. Mehta P.K. *Concrete: structure, properties, and materials*. – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1986. 450 p.
8. Михелева, М.В. *Управление асинхронным двигателем с изменяющейся нагрузкой при технологическом процессе помола клинкера: дис. ...канд. техн. наук* / М.В. Михелева. – Белгород, 2010. – 140 с.
9. Чохонелидзе, А.Н. *Разработка системы автоматизированного управления для замкнутой цепью измельчения с использованием метода управления с прогнозирующими моделями* / А.Н. Чохонелидзе, Ф. Лемпого, В.Б. Аквей // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2014. – № 6 (25). – DOI: 10.15862/131TVN614
10. Аквей, В.Б. *Разработка матричной модели замкнутой схемы измельчения* / В.Б. Аквей, А.Н. Чохонелидзе, Ф. Лемпого // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2014. – № 3 (22).
11. Клюев, А.С. *Техника чтения схем автоматического управления и технической контроле* / А.С. Клюев, Б.В. Глазов, М.Б. Миндин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 420 с.
12. Кочетов, В.С. *Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов* / В.С. Кочетов, А.А. Марченко, Л.Р. Немировский. – Л.: Стройиздат, 1981. – 417 с.
13. Пироцкий, В.З. *Технологические системы измельчения (ТСИ) клинкера: характеристики и энергоэффективность* / В.З. Пироцкий, В.С. Богданов // *Цемент и его применение*. – 1998. – № 6. – С. 12–16.
14. Голиков, В.М. *Снижение энергозатрат при производстве цемента с применением вибрационных машин* / В.М. Голиков, С.В. Репин, А.И. Сапожников // *Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки*. – 2016. – № 3. – С. 105–113.

15. Потапов, Ф.П. Повышение эффективности размола / Ф.П. Потапов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых: сб. науч. тр. науч.-практ. конф. – Белгород: БГТУ, 2009. – С. 97–109.

16. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 384 с.

17. Alsop P. Cement plant operations handbook for dry process plants / P. Alsop. – Tradeship Publications Ltd., Portsmouth, United Kingdom, 2001. – 159 p.

**Казаринов Лев Сергеевич**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kazarinovls@susu.ru.

**Хасанов Джасурджон Рустамджонович**, аспирант, кафедра автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; jacur@mail.ru.

*Поступила в редакцию 1 марта 2019 г.*

DOI: 10.14529/ctcr190211

## SELECTION OF SOLUTIONS FOR THE OPERATIONAL NEUROCONTROL OF THE MIXTURE GRINDING PROCESS IN CEMENT PRODUCTION

*L.S. Kazarinov, kazarinovls@susu.ru,*

*Dzh.R. Khasanov, jacur@mail.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The article proposes a method of neurocontrol by the technological process of grinding the mixture in cement production in order to increase its energy efficiency. The need to use neural control is caused by the fact that the quality of grinding and the consumption of resources depend on many factors that present great difficulties in their measurement and prediction of performance indicators. Reliable measurement of influencing factors is necessary to solve the problem of determining the best combination of the volume of the ball load of grinding and the required amount of solids to optimize the rate of reduction of the particle size of the charge with a minimum specific energy consumption. Neurocontrol is based on the training of a neural network with a teacher, which is played by an experienced mill operator, who realizes the effective control of the grinding process. The controller, built on the basis of the neural network, should work in real time and reflect the current state of the grinding process. The choice of solutions for solving operational control problems using a neural network belongs to the class of multi-criteria tasks. The paper proposes a decision-making method based on the set of permissible technical conditions imposed on the grinding process. Such a formulation of the problem is generally contradictory. The paper proposes an approach to solving this problem on the basis of determining the maximum number of joint weighted conditions imposed on the process. This approach allows you to organize an interactive procedure for selecting a feasible solution for the operational control of the grinding process. An operative computer model of the clinker grinding process in cement production is proposed.

*Keywords: cement, clinker, neural network, charge, grinding process, operational control, choice of solutions in a contradictory formulation.*

### References

1. Austin L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T. *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*. New York, SME/AIME, 1984. 561 p.

2. Songfack P., Rajamani R. Hold-up Studies in a Pilot Scale Continuous Ball Mill: Dynamic Varia-

tions Due to Changes in Operating Variables. *International Journal of Mineral Processing*, 1999, vol. 57, pp. 105–123. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00010-1

3. Govender I., Mangesana N., Mainza A.N., Franzidis J.-P. Measurement of Shear Rates in a Laboratory Tumbling Mill. *Minerals Engineering*, 2011, vol. 24, pp. 225–229. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.08.009

4. Makokha A.B., Moys M.H. Characterizing Slurry Hydrodynamic Transport in a Large Overflow Tubular Ball Mill by an Improved Mixing Cell Model Based on Tracer Response Data. *Powder Technology*, 2011, vol. 211, pp. 207–214. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.04.019

5. Keshav P., de Haas B., Clermont B., Mainza A., Moys M.H. Optimisation of the Secondary Ball Mill Using an On-line Ball and Pulp Load Sensor – The Sensomag. *Minerals Engineering*, 2011, Vol. 24 (3), pp. 325–334. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.10.011

6. Bhatti J., Miller F., Kosmatka S. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, Ill, USA: Portland Cement Association, 2004. CD-ROM: SP400. 155 p.

7. Mehta P.K. *Concrete: Structure, Properties and Materials*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ., 1986. 450 p.

8. Miheleva M.V. *Upravlenie asinkhronnym dvigatelem s izmenyayushheysya nagruzkoy pri tehnologicheskoy pomole klinkera: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Control of an Asynchronous Motor with Varying Load during the Clinker Grinding Process. Cand. Sci. Diss.]. Belgorod, 2010. 140 p.

9. Chohonelidze A.N., Lempogo F., Akvej V.B. Development of an Automated Control System for a Closed Grinding Circuit Using a Control Method with Predictive Models. *Internet-Journal "Science Studies"*, 2014, iss. 6 (25). Available at: <http://naukovedenie.ru>. DOI: 10.15862/131TVN614

10. Akvej V.B., Chohonelidze N., Lempogo F. Development of a Matrix Model of a Closed Grinding Scheme. *Internet-Journal "Science Studies"*, 2015, iss. 3 (22). Available at: <http://naukovedenie.ru>.

11. Klyuev A.S., Glazov B.V., Mindin M.B. *Tekhnika chteniya skhem avtomaticheskogo upravleniya i tekhnicheskoyu kontrolya* [Technique of Reading Automatic Control and Technical Control Circuits]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 420 p.

12. Kochetov V.S., Marchenko A.A., Nemirovskiy L.R. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov i ASUP promyshlennosti stroitel'nykh materialov* [Automation of Production Processes and ASUP of the Building Materials Industry]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1981. 417 p.

13. Pirotskiy V.Z., Bogdanov V.S. [Technological Grinding Systems (TSI) Clinker: Characteristics and Energy Efficiency]. *Cement and Its Application*, 1998, no. 6, pp. 12–16. (in Russ.)

14. Golikov V.M., Repin S.V., Sapozhnikov A.I. [Reducing Energy Consumption in the Production of Cement with the use of Vibrating Machines]. *Bulletin of the Tuva State University. Technical and Physical and Mathematical Sciences*, 2016, no. 3, pp. 105–113. (in Russ.)

15. Potapov F.P. [Increase Grinding Efficiency]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh: sb. nauch. tr., nauch.-prakt. konf.* [International Scientific and Technical Conference of Young Scientists: Collection of Scientific Papers of the Scientific-Practical Conference]. Belgorod, BGTU, 2009, pp. 97–109.

16. Andreev S.E., Zverevich V.V., Perov V.A. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, Grinding and Screening of Minerals]. Moscow, Gorgokhtekhzdat, 1961. 384 p.

17. Alsop P. *Cement Plant Operations Handbook for Dry Process Plants*. Tradeship Publications Ltd., Portsmouth, United Kingdom, 2001. 159 p.

*Received 1 March 2019*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Казаринов, Л.С. Выбор решений при оперативном нейроуправлении процессом помола шихты в цементном производстве / Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 128–138. DOI: 10.14529/ctcr190211

### FOR CITATION

Kazarinov L.S., Khasanov Dzh.R. Selection of Solutions for the Operational Neurocontrol of the Mixture Grinding Process in Cement Production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 128–138. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190211