

Функциональные структуры систем управления различными технологическими комплексами цветной металлургии (примеры реализации)

УДК 669.2:681.5



А. В. Кузяков,
старший научный сотрудник¹,
эл. почта: 31@scma.ru



В. Д. Жидовецкий,
главный специалист управления
автоматизации²,
канд. техн. наук



А. А. Кульчицкий,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств³,
доцент,
докт. техн. наук,
эл. почта: Kulchitskiy_AA@pers.spmi.ru



Л. А. Русинов,
заведующий кафедрой автоматизации
процессов химической промышленности⁴,
профессор,
докт. техн. наук,
эл. почта: lrusinov@yandex.ru

¹ АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.»,
Москва, Россия

² АО «Кольская горно-металлургическая компания»,
Мончегорск, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Введение

В современных условиях цифровизации производства все большее развитие получают автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) [1]. Как правило, АСУ ТП ограничиваются локальным регулированием отдельных технологических параметров, при этом задания регуляторам выдает технолог [2–4]. Для получения нового технического и экономического результатов в условиях действующего производства целесообразно использовать отдельные управляющие устройства, в которых реализуются алгоритмы оптимального управления, предназначенные для автоматического расчета заданий локальным контурам регулирования в действующей АСУТП. Такой подход позволяет без создания помех

Рассмотрены примеры решения задач по автоматическому контролю и оптимальному управлению технологическими процессами никелевого производства на базе разработанного АО «Союзцветметавтоматика» устройства управления ВАЗМ-2У. Отмечено, что не всегда возможно прямое измерение ключевых параметров. Оценку состояния объекта проводили по косвенным параметрам, которые имеют высокочастотные помехи и запаздывание. Для решения задач управления использовали специальные адаптивные поисковые алгоритмы, в которых задействованы трендовые оценки значений технологических параметров.

В качестве примера рассмотрена система автоматического управления соотношением вода/файнштейн на загрузке в мельницу. Показано, как, используя оценку тренда выхода готового класса –45 мкм, можно достигать максимально возможного значения этого параметра, что создает условия для получения наилучших показателей флотационного разделения файнштейна.

Другим примером является задача автоматического контроля крупности материала при обжиге никелевого концентрата в кипящем слое (КС). В условиях отсутствия технических средств для прямого измерения крупности материала в печи КС показано, как при использовании косвенной информации о взаимосвязи крупности частиц с амплитудой пульсаций давления в воздушных коробках под подиной печи, выраженной посредством регрессионного уравнения взаимосвязи среднего квадратического отклонения пульсаций давления с эквивалентным диаметром частиц, можно иметь непрерывную оценку крупности материала в печи. Это создает условия для построения системы автоматического управления процессом укрупнения материала в кипящем слое.

Ключевые слова: измельчение, фильтрация, усреднение, тренд, автоматическое управление, кипящий слой, пульсации давления, дисперсия, эквивалентный диаметр.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.05

основному производству реализовывать задачи по оптимальному управлению технологическими процессами.

Многие технологические процессы имеют сходную структуру управления [5–7]. Разница состоит в числе переменных и алгоритмах обработки состояний объекта управления [8–10]. При этом не всегда возможно прямое измерение ключевых технологических параметров [11–13]. Оценку состояния объекта приходится проводить по косвенным параметрам, которые имеют запаздывание и высокочастотные помехи, а некоторые вообще не измеряются [14–16], например, степень заполнения мельницы измельчаемым материалом [17], расход песков, проходящих через спиральный классификатор, дополнительная подача воды в разгрузочный

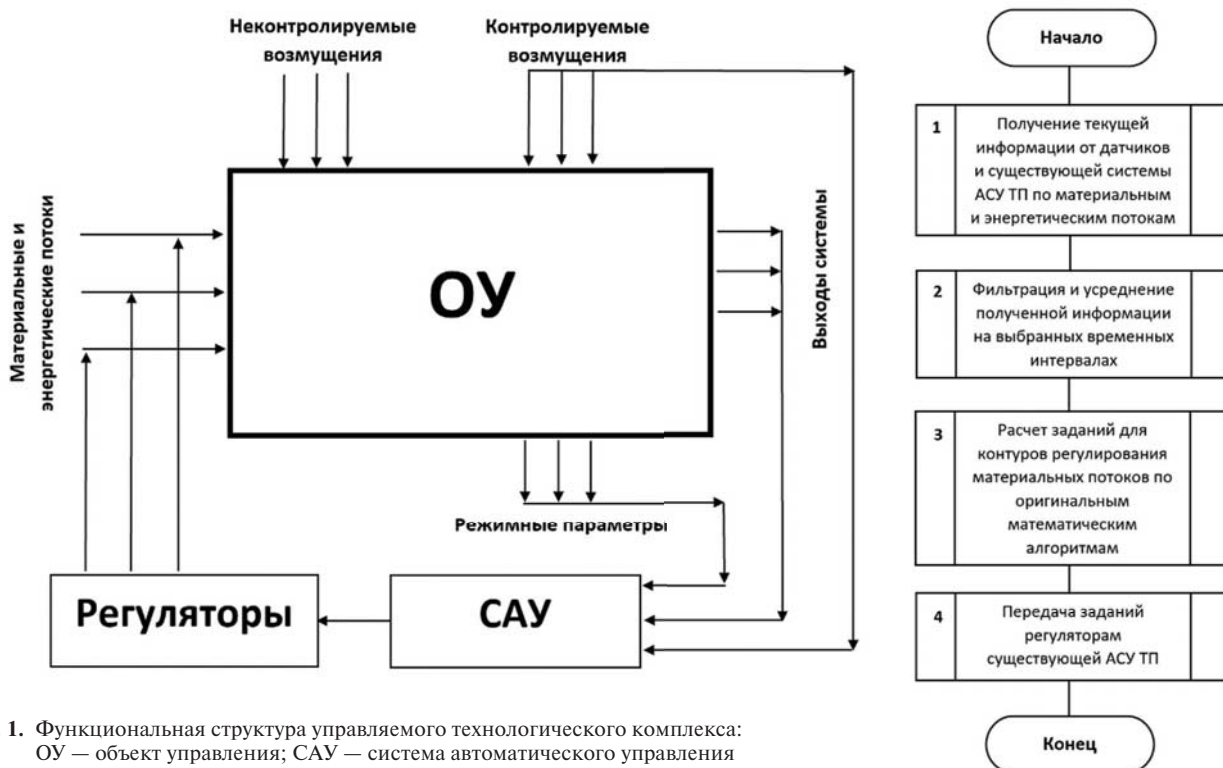


Рис. 1. Функциональная структура управляемого технологического комплекса: ОУ — объект управления; САУ — система автоматического управления

желоб мельницы для перемещения измельченного материала в классификатор [18], крупность материала в печи кипящего слоя (КС) и т. д. [19, 20].

Функционально и алгоритмически работу САУ ТП можно представить в виде структурной и блок-схемы, изображенных на рис. 1.

На первом этапе работы САУ получает текущую информацию от датчиков и из базовой АСУ ТП, в которой реализованы функции сбора, хранения, отображения информации и локального регулирования отдельными технологическими параметрами [21, 22].

Для последующего использования входной информации по материальным и энергетическим потокам необходимо провести ее предварительную математическую обработку: усреднение и фильтрацию на выбранных временных интервалах [23].

На практике в промышленных условиях для реализации САУ применяют устройство управления ВАЗМ-2У отечественного производства.

Описание устройства управления ВАЗМ-2У

В АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.» было разработано устройство управления ВАЗМ-2У, решающее основные задачи в области цветной металлургии [24].

С технической точки зрения ВАЗМ-2У реализован в виде шкафа управления, который построен на типовой платформе программируемых логических контроллеров (ПЛК), получившей широкое применение в промышленности (рис. 2).

В состав шкафа ВАЗМ-2У входят следующие основные электронные устройства:

- модули аналого-цифровых преобразователей (АЦП), выполняющие функции приема сигналов от датчиков и приборов существующей АСУ ТП и их передачи в ПЛК;
- ПЛК ОВЕН отечественного производства, его функции — прием цифровой информации от АЦП и ее



Рис. 2. Устройство управления ВАЗМ-2У

обработка по специальным алгоритмам, решение задач автоматического управления и расчет заданий для локальных контуров регулирования с дальнейшей их передачей в АСУ ТП по промышленным протоколам обмена данными, например RS-485, Ethernet и т. д.;

- модули цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) — они передают задания исполнительным механизмам (в случае реализации локальных контуров регулирования непосредственно от ВАЗМ-2У);
- сенсорная панель, выполняющая функции ввода и визуализации информации непосредственно на месте.

Примеры решения задач с использованием устройства управления ВАЗМ-2У

Основной функцией САУ является решение задачи оптимального управления технологическим процессом [25–27]. На практике наибольшее распространение получили две задачи [28]:

- максимальная производительность по продукту на выходе при заданных ограничениях на качество;
- максимальное качество получаемого продукта при заданной производительности.

Для решения этих задач применяют специальные адаптивные поисковые алгоритмы [29]. В качестве примера рассмотрим расчет задания соотношения вода/файнштейн в целях получения максимального выхода готового класса в сливе спирального классификатора после мельницы [30]. Эта зависимость выхода готового класса от соотношения вода/файнштейн имеет экстремальный характер [31]. Целью системы управления является нахождение этого экстремума в текущий момент времени путем изменения соотношения вода/файнштейн на загрузке в мельницу.

Вычислительная схема алгоритма реализована следующим образом:

1) На минутных интервалах рассчитывали средние значения расхода файнштейна в мельницу Q_{Φ} (т/ч), расхода воды в мельницу Q_B (м³/ч) и выход готового класса GS_i (%) по формулам:

$$Q_{\Phi_i}^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{\Phi_j}, \quad (1)$$

где Q_{Φ_j} — секундный расход файнштейна; $Q_{\Phi_i}^{cp}$ — среднее значение расхода файнштейна;

$$Q_{B_i}^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{B_j}, \quad (2)$$

где Q_{B_j} — секундный расход воды; $Q_{B_i}^{cp}$ — среднее значение расхода воды;

$$GS_i^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n GS_j, \quad (3)$$

где GS_j — секундный выход готового класса; GS_i^{cp} — среднее значение выхода готового класса; $n = 60$ (секундные измерения).

2) Проводили усреднение рассчитанных минутных значений Q_{Φ} (т/ч) и Q_B (м³/ч) методом скользящего среднего на выбранных индивидуальных временных интервалах n_1 и n_2 с минутной дискретностью:

$$Q_{\Phi_i}^{ck} = \frac{1}{n_1} \sum_{j=i-n_1+1}^i Q_{\Phi_j}^{cp}, \quad (4)$$

где $Q_{\Phi_i}^{ck}$ — скользящее среднее значение расхода файнштейна;

$$Q_{B_i}^{ck} = \frac{1}{n_2} \sum_{j=i-n_2+1}^i Q_{B_j}^{cp}, \quad (5)$$

где $Q_{B_i}^{ck}$ — скользящее среднее значение расхода воды.

3) Рассчитывали минутные значения соотношения вода/файнштейн:

$$M_i = \frac{Q_{B_i}^{ck}}{Q_{\Phi_i}^{ck}}, \quad (6)$$

где M_i — среднее за минуту значение соотношения вода/файнштейн.

4) Для оценки направления продвижения выхода готового класса GS (уменьшается или увеличивается) и количественного анализа скорости этого процесса выполняли оценку тренда выхода готового класса по следующему алгоритму:

4.1. Задавали временной интервал Δt между соседними измерениями и число интервалов k , значения которых выбирают из целочисленного ряда (1, 2, 3, ..., $n - 1$), где n — число измерений параметра GS в i -м интервале времени, состоящем из суммы интервалов Δt в количестве k .

4.2. Для оценки значения тренда выхода готового класса использовали уравнение:

$$\Delta GS_i = a_i k_i, \quad (7)$$

где ΔGS_i — приращения величины выхода готового класса в i -й интервал времени, длительность которого состоит из суммы интервалов Δt в количестве k ; a_i — оценка тренда.

Для идентификации коэффициента a_i использовали функцию потерь и применяли метод наименьших квадратов [32]:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta GS_i - \Delta GS_i)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Подставив уравнение (7) в выражение (8), получим:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta GS_i - a_i k_i)^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Рассчитав производную по a_i , и после алгебраических преобразований получили уравнение для расчета оценки тренда:

$$\hat{a}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta GS_i k_i)}{\sum_{i=1}^{n-1} k_i^2}. \quad (10)$$

Полученные по уравнению (6) расчетные значения M_i и по формуле (10) a_i использовали далее следующим образом.

Если $\hat{a}_i > 0$, $\hat{a}_{i-1} < 0$, т. е. выход готового класса увеличивается, то рассчитывается задание на соотношение вода/файнштейн:

$$M_i^{зд} = M_{i-1}^{зд} + \Delta \cdot \text{sgn}(1), \quad (11)$$

где $M_i^{зд}$ — текущее задание на соотношение вода/файнштейн; $M_{i-1}^{зд}$ — задание на соотношение вода/файнштейн в предыдущий промежуток времени; Δ — шаг по изменению задания.

И наоборот, если $\hat{a}_i < 0$, а $\hat{a}_{i-1} > 0$, т. е. выход готового класса уменьшается, то знак перед Δ в уравнении (11) изменяется на противоположный.

Таким образом САУ соотношением вода/файнштейн в поисковом режиме находит такие его значения, которые обеспечивают максимально возможный выход готового класса в сливе классификатора после мельницы [33–35].

На рис. 3 показана динамика изменения содержания готового класса –45 мкм в сливе спирального классификатора мельницы 1-й стадии измельчения при ручном и автоматическом регулировании соотношением вода/файнштейн. Согласно представленным данным, процесс измельчения при ручном регулировании идет

нестабильно, наблюдаются сильные снижения содержания класса –45 мкм. В недоизмельченном материале содержатся сростки соединений меди и никеля, которые невозможно разделить в последующей операции флотации, что ведет к увеличению содержания вторых металлов в никелевом и медном концентратах и дополнительным затратам на заключительных переделах производства никеля.

При автоматическом управлении соотношением вода/файнштейн (см. рис. 3, б) содержание класса –45 мкм поддерживается на стабильно высоком уровне, не происходит провалов содержания готового класса и, следовательно, достигается хорошее разделение соединений меди и никеля, что создает условия для повышения степени разделения файнштейна на медный и никелевый концентраты.

В качестве второго примера рассмотрим обжиг никелевого концентрата в печах КС. Одним из ключевых параметров обжига является крупность материала в кипящем слое, которая определяет и качество кипения слоя, и качество огарка для последующего процесса восстановления полученного оксида никеля в трубчатых печах.

Крупность материала характеризуют через средний размер частиц (эквивалентный диаметр d_3) [36], который рассчитывают по содержаниям классов +1,25 мм, –1,25+0,5 мм, –0,5+0,2 мм и –0,2 мм, полученным при рассеивании проб огарка, которые отбирают из печи один раз за два часа:

$$d_3 = (1/100) \cdot \sum_{i=1}^4 (\Delta G_i d_i); \quad (12)$$

$$d_i = 1/2(d_i' + d_i''),$$

где d_3 — эквивалентный диаметр материала, мм; ΔG_i — выход фракции, %; d_i — средний размер фракции, мм; d_i' — нижняя граница фракции, мм; d_i'' — верхняя граница фракции, мм; 4 — число фракций.

Из практики известно, что с увеличением крупности огарка амплитуда пульсаций давления дутья под подиной уменьшается и наоборот.

На рис. 4 показана структурная схема системы автоматического контроля (САК) крупности материала в кипящем слое. Дутье в печь КС подается через воздушные коробки и сопла в подине. Взаимодействие струй воздуха, выходящих из отверстий сопел, с материалом в печи КС вызывает пульсации давления в воздушных коробках под подиной, частота колебаний которых составляет порядка 5 Гц. Для достоверного отображения сигнала давления в дискретной области необходимо получать данные с датчика давления в воздушной коробке с циклом 50 мс. В основном контроллере действующей АСУТП нет быстрых каналов, способных работать с такой циклическостью.

Для этих целей оказалось возможным использовать устройство управления ВАЗМ-2У, которое при этом может обрабатывать сигналы пульсаций

Содержание класса –45 мкм, %

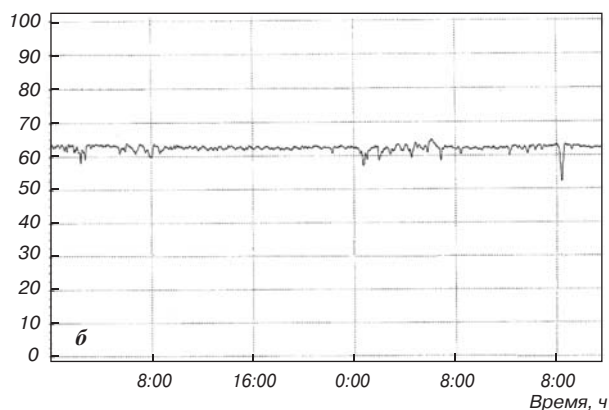
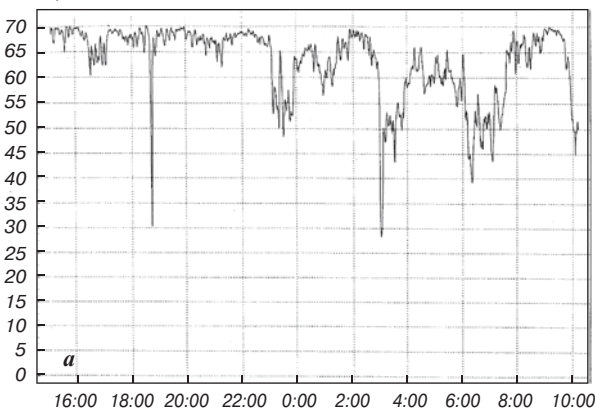


Рис. 3. Динамика изменения содержания класса –45 мкм в сливе классификатора мельницы при ручном (а) и автоматическом (б) управлении соотношением вода/файнштейн

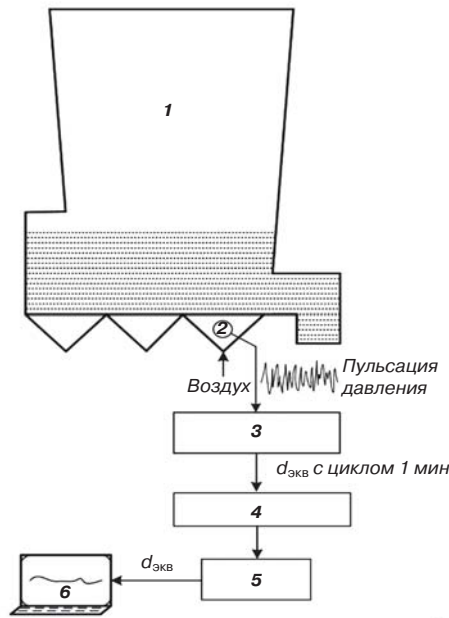


Рис. 4. Структурная схема САК крупности материала в кипящем слое: 1 — печь КС; 2 — датчик давления; 3 — ВАЗМ-2У; 4 — контроллер; 5 — сервер; 6 — автоматизированное рабочее место обжигальщика

давления и рассчитывать эквивалентный диаметр частиц материала.

Количественно амплитуду пульсаций давления, как случайную величину, можно оценить при помощи дисперсии пульсаций давления, а в качестве рабочего параметра использовать среднее квадратическое отклонение (СКО) пульсаций давления [37].

Сначала определим математическое ожидание или его оценку — среднее значение дискретной случайной величины:

$$M(x) = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i \tag{13}$$

Вычислим дисперсию пульсаций давления под подиной:

$$D(x) = (1/n) \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2, \tag{14}$$

где $M(x)$ — математическое ожидание давления под подиной, кг/см²; $D(x)$ — дисперсия пульсаций давления, кг²/см⁴; x_i — текущее значение давления под подиной, кг/см²; n — число измерений.

Рабочее значение пульсаций давления найдем через СКО:

$$\sigma_x = \sqrt{D(x)}, \tag{15}$$

где σ_x — СКО пульсаций давления под подиной, кг/см².

При дальнейших вычислениях σ_x будет участвовать как параметр, для которого необходимо определить математическое ожидание пульсаций давления $M(\sigma_x)$ и их дисперсию $D(\sigma_x)$.

Выполним оценку математического ожидания эквивалентного диаметра огарка по результатам отбора его проб:

$$M(y) = (1/m) \sum_{i=1}^m y_i \tag{16}$$

Дисперсию эквивалентного диаметра огарка вычислим по формуле

$$D(y) = (1/m) \sum_{i=1}^m (y_i - M(y))^2, \tag{17}$$

где $M(y)$ — оценка математического ожидания эквивалентного диаметра огарка, мм; $D(y)$ — дисперсия эквивалентного диаметра огарка, мм²; y_i — текущее значение эквивалентного диаметра огарка, мм; m — число измерений.

Выразим взаимосвязь между σ_{xi} и $d_{экр}$ в двухчасовом промежутке между отборами проб огарка линейной зависимостью. Регрессионное уравнение для определения эквивалентного диаметра материала имеет вид:

$$d_{экр} = b_0 + b_1 \sigma_{xi}, \tag{18}$$

где b_0 — свободный член, мм; b_1 — угловой коэффициент, мм·см²/кг.

Численные значения коэффициентов b_0 и b_1 определим с помощью метода наименьших квадратов. Результаты анализа контрольных проб огарка поступают в контроллер каждые два часа. Затем система автоматического контроля пересчитывает коэффициенты b_0 и b_1 в регрессионном уравнении (18) по двенадцати последним анализам эквивалентного диаметра контрольных проб. Оценка параметров b_0, b_1 выполняют по методу наименьших квадратов с учетом условия, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений $d_{экр}$ от расчетных $d_{экр}(\sigma_{xi}; b_0, b_1)$ была наименьшей. Таким образом, задача сводится к отысканию значений b_0, b_1 , минимизирующих функцию

$$\sum_{i=1}^{12} [d_{экр} - b_0 - b_1 \sigma_{xi}]^2 \tag{19}$$

как функцию переменных b_0, b_1 при известных контрольных значениях ($d_{экр}, \sigma_{xi}$). Далее нужно решить систему линейных уравнений, получаемых путем приравнивания к нулю частных производных от указанной суммы квадратов отклонений (19) по переменным b_0 и b_1 :

$$\frac{\partial [\sum_{i=1}^{12} [d_{экр} - b_0 - b_1 \sigma_{xi}]^2]}{\partial b_0} = 0, \tag{20}$$

$$\frac{\partial [\sum_{i=1}^{12} [d_{экр} - b_0 - b_1 \sigma_{xi}]^2]}{\partial b_1} = 0.$$

После выполнения вычислительных процедур получили численные значения коэффициентов b_0 и b_1 , которые затем подставили в уравнение (18). Это выражение реализовано в устройстве управления ВАЗМ-2У, которое каждую минуту с циклом 50 мс определяет

Эквивалентный диаметр, мм

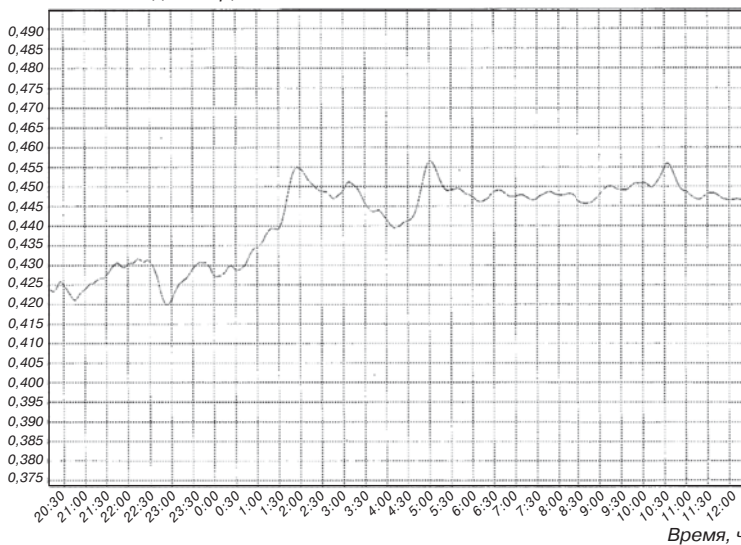


Рис. 5. Динамика изменения эквивалентного диаметра материала в печи КС

100 последних мгновенных значений давления в воздушной коробке под подиной печи КС и рассчитывает СКО пульсаций давления, а затем по уравнению (18) находит эквивалентный диаметр материала в кипящем слое и отображает его на экранах мониторов в реальном времени как в цифровом, так и в графическом виде.

На рис. 5 показана динамика изменения эквивалентного диаметра материала в печи КС.

Полученные таким путем значения эквивалентного диаметра позволяют в реальном времени оценивать ход процесса укрупнения материала в кипящем слое и своевременно предпринимать необходимые действия для предупреждения потери устойчивости кипения ванны. Одновременно создаются условия для построения системы автоматического управления процессом укрупнения материала в кипящем слое с поддержанием оптимальной крупности частиц материала, что также способствует получению никелевого порошка с наибольшей активностью и степенью металлизации.

Выводы

1. В условиях действующего производства для повышения эффективности автоматизированного управления технологическими процессами целесообразно использование дополнительных устройств управления, например ВАЗМ-2У, в которых размещается прикладное программное обеспечение для реализации специально разработанных алгоритмов управления, позволяющих рассчитывать наилучшие значения технологических параметров и передавать их в виде задания регуляторам действующей АСУТП. В этом случае процесс адаптации нового программного обеспечения для САУ не создает рисков для уже работающей АСУТП.

2. Разработанные и реализованные алгоритмы автоматического управления соотношением вода/файнштейн на загрузке в мельницу для измельчения файнштейна позволяют находить такие его значения, которые обеспечивают наиболее полное вскрытие зерен файнштейна и тем самым в последующей операции флотации уменьшение содержания суммы вторых металлов в медном и никелевом концентратах на 0,15 %.

3. Разработанная и реализованная при помощи устройства управления ВАЗМ-2У система автоматического контроля крупности материала в кипящем слое создает условия для автоматического управления процессом укрупнения материала в кипящем слое и поддержания крупности частиц на оптимальных значениях, которые обеспечивают устойчивость кипящего слоя и способствуют достижению наилучших показателей восстановления оксида никеля в трубчатых печах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 38–44
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.05

FUNCTIONAL DESIGN OF CONTROL SYSTEMS DESIGNED FOR DIFFERENT PROCESSING LINES OF NON-FERROUS METALLURGY (EXAMPLES OF IMPLEMENTATION)

Information about authors

A. V. Kuzyakov, Senior Researcher¹, e-mail: 31@scma.ru

V. D. Zhidovetskiy, Principal Specialist², Automation Department, Candidate of Technical Sciences

A. A. Kulchitskiy, Head of the Department of Process and Plant Automation³, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: Kulchitskiy_AA@pers.spmi.ru

L. A. Rusinov, Head of the Department of Chemical Process Automation⁴, Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: lrusinov@yandex.ru

¹ Soyuztsvetmetavtomatika JSC, Moscow, Russia.

² Kola Mining and Metallurgical Company, Monchegorsk, Russia.

³ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

⁴ Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper considers some examples of problem solving related to optimum automatic process control in nickel production implemented with the help of control unit VAZM-2U developed by Soyuztsvetmetavtomatika. It is noted that direct measurement of key parameters is not always possible. That's why indirect parameters were used for object status evaluation, which have high-frequency interference and a time lag. Thus, special adaptive search algorithms were used for solving control problems. Such algorithms analyze process parameter trends.

The paper considers the case study of an automatic control system that controls the water/converter matte ratio at the feed to the mill. The authors demonstrate how one can use the –45 μm output trend analysis to achieve the maximum possible output. This enables to achieve the best converter matte flotation performance. Another example would be the problem of automatic control over the size of nickel concentrate during fluidized bed roasting. Since there are no devices that could measure the size of material directly in the furnace, the paper demonstrates how using indirect data about the relationship between the particle size and the air pressure fluctuations in the air boxes underneath the furnace bottom, expressed as a regression equation of the relationship between the root-mean-square deviation of pressure fluctuations and the equivalent particle diameter, one can have a continuous analysis of the material size in the furnace. This enables

to develop an automatic control system to control the coarsening of the fluidized bed particles.

Key words: grinding, filtration, blending, trend, automatic control, fluidized bed, pressure fluctuation, dispersion, equivalent diameter.

References

- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V. et al. Analyzing the role of the state in the mineral resources management. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Cabascango V. E. Q., Bazhin V. Y., Martynov S. A., Pardo F. R. O. Automatic control system for thermal state of reverberatory furnaces in production of nickel alloys. *Metallurgist*. 2022. Vol. 66. pp. 104–116. DOI: 10.1007/S11015-022-01304-3.
- Martynov S. A., Masko O. N., Fedorov S. N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 4. pp. 87–94. DOI: 10.17580/TSM.2022.04.11.
- Nguen Kh. Kh., Bazhin V. Yu. Optimization of copper electrorefining control system with the help of a digital twin while dendritic sediment is being formed. *Metallurg*. 2023. No. 1. pp. 49–56. DOI: 10.52351/00260827_2023_01_49.
- Chadeev V. M., Aristova N. I. Control of industrial automation. *Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. 2017. DOI: 10.1109/MLSD.2017. 8109604.
- Buturuga A., Stoichescu D., Constantinescu R. Universal system for automation of small tasks. *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. Conference Paper. 2016. DOI: 10.1109/ISFEE.2016.7803157.
- Fang Yu, Weijin Zhuang, Mingyang Sun. Research and application of operating monitoring and evaluation for dispatching automation and control system. *IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. Conference Paper. 2016. DOI: 10.1109/IMCEC.2016.7867495.
- Hodouin D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. *Journal of Process Control*. 2011. Vol. 21, Iss. 2. DOI: 10.1016/j.jprocont.2010.10.016.
- Patrick D. R., Fardo S. W. Industrial process control systems. in industrial process control systems. New York, 2021. 476 p. DOI: 10.1201/9781003151531.
- Sărăcin C. G., Tunsoiu R. A. Industrial process monitoring and control system. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol. 84, Iss. 1.
- Boikov A., Payor V. The Present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/SYM14101968.
- Pshenin V., Liagova A., Razin A., Skorobogatov A. et al. Robot crawler for surveying pipelines and metal structures of complex spatial configuration. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7. DOI: 10.3390/INFRASTRUCTURES7060075.
- Shestakov A. K., Sadykov R. M., Petrov P. A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 266. DOI: 10.1051/e3sconf/202126609002.
- Feng L., Yang F., Zhang W., Tian H. Model predictive control of duplex inlet and outlet ball mill system based on parameter adaptive particle swarm optimization. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. DOI: 10.1155/2019/6812754.
- Vasilieva N. V., Boykov A. V., Erokhina O. O., Trifonov A. Yu. Automatic digitalization of pie charts. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.
- Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Y. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. pp. 1308–1319. DOI: 10.1007/s11015-023-01445-z.
- Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M. Yu. Modelling of the disintegration process in ball mills with the help of discrete element method. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 6–2. pp. 268–282. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.
- Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/SYM14112314.
- Rueda-Escobedo J. G., Fridman E., Schiffer J. Data-driven control for linear discrete-time delay systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2021, 14 July. pp. 3321–3336.
- Baldivieso P. R., Paul Anthony Trodden. Model predictive control of linear systems with preview information: feasibility, stability, and inherent robustness. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018, 09 December. pp. 3831–3838.
- Juneja P. K., Sunori S. K., Sharma A., Sharma A. et al. A review on control system applications in industrial processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1022. DOI: 10.1088/1757-899X/1022/1/012010.
- Vasilieva N. V., Fedorova E. R. Process control quality analysis. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 70–76. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.10.
- Kalashnikova T., Koshkaldal I., Trehub O. Mathematical methods of data processing in formation and evaluation of sectoral structure in agricultural enterprises. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2019. Vol. 5. DOI: 10.22034/gjesm.2019.SI.10.
- Kuzyakov A. V., Zhidovetskiy V. D. Application of control units VAZM-2U in ore grinding. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 3. pp. 27–31. DOI: 10.17580/tsm.2021.03.02.
- Aryskin A., Grigorev A., Khelemendik R., Petrakov M. et al. System for monitoring control in industrial technological processes. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 2020. Vol. 31, Iss. 1. pp. 644–649. DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.089.
- Asbjörnsson G., Tavares L. M., Mainza A., Yahyaei M. Different perspectives of dynamics in comminution processes. *Minerals Engineering*. 2022. Vol. 176. pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107326.
- le Roux J. D., Steinboeck A., Kugi A., Craig I. K. Steady-state and dynamic simulation of a grinding mill using grind curves. *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 152. pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106208.
- Sokolov I. V., Shapirovskiy M. R., Kuzyakov A. V. Experience of technological processes optimal control (milling complexes) automated systems creation. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 9. pp. 53–57. DOI: 10.17580/tsm.2015.09.08.
- Salikhov Z. G., Arunyants G. G., Rutkovskiy A. L. Optimum control systems for complex processing lines. Moscow: Teploenergetik, 2004. 496 p.
- Zhidovetskiy V. D., Kuzyakov A. V. Automatic control system for optimum control over converter matte grinding process: development and implementation. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 4. pp. 13–18. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.01.
- Joon-Young Choi, Krstic M., Ariyur K. B., Lee J. S. Extremum seeking control for discrete-time systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2022, February. pp. 318–323.
- Methods of classical and modern automatic control theories. Textbook in 5 volumes; 2nd revised edition. Vol. 2: Statistical dynamics and identification of automatic control systems. Ed. by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Bauman, 2004. 640 p.
- Methods of classical and modern automatic control theories. Textbook in 5 volumes; 2nd revised edition. Vol. 5: Methods of modern automatic control theory. Ed. by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Bauman, 2004. 784 p.
- Bo Pang, Zhong-Ping Jiang. Adaptive optimal control of linear periodic systems: an off-policy value iteration approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020, 16 April. pp. 888–894.
- Bingyun Liang, Shiqi Zheng, Choon Ki Ahn, Feng Liu. Adaptive fuzzy control for fractional-order interconnected systems with unknown control directions. *IEEE Transactions on Automatic Control Transactions on Fuzzy Systems*. 2020, 16 October. pp. 75–87.
- Astafiev A. F., Alekseev Yu. V. Fluidized bed processing of nickel middlings. 2nd revised edition. Moscow: Metallurgiya, 1991. 253 p.
- Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis. Translated from English and ed. by M. Vlasenko et al. 3rd edition. Moscow: Dialektika, 2007. 911 p.