УДК 681.5:622.7

Косыгина Анастасия Анатольевна, студентка бакалавриата
(ДВФУ, г. Владивосток)
Коробейников Илья Алексеевич, магистрант
(ДВФУ, г. Владивосток)
Anastasia A. Kosygina, undergraduate student
(FEFU, Vladivostok)
Ilya A. Korobeinikov, Master's student
(FEFU, Vladivostok)

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

AUTOMATION OF COAL ENRICHMENT PROCESS CONTROL BASED ON A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

Аннотация. Рассмотрена система управления обогащением угля на базе ПЛК. Описаны измерительные каналы, контуры регулирования плотности суспензии и уровня, блокировки и подход к оценке эффективности. Приведены передаточные функции, критерии настройки и таблицы параметров.

Abstract. A PLC-based coal preparation control system is considered. Measurement channels, suspension density and level control loops, interlocks and an approach to assessing automation efficiency are described. Transfer functions, tuning criteria and parameter tables are given.

Введение

Обогащение угля включает тяжелосредную сепарацию, отсадку, флотацию и обезвоживание. Для тяжелосредного сепаратора существенны плотность суспензии, уровень пульпы и расходы магнетита и воды; опыт построения автоматизированных контуров описан в работах [1–3].

Цель статьи - представить архитектуру АСУ ТП на ПЛК для стабилизации плотности и уровня, технологических блокировок и визуализации процесса. Диапазоны измерений и результаты моделирования приведены как параметры расчётного примера.

1. Объект и управляемые параметры

Таблица 1 - Состав технологических параметров

Тип	**Параметр**	**Диапазон**	**Технологическое действие**
Регулируемый	Плотность суспензии ρ	1000–1600 кг/м³	Качество разделения фракций
Регулируемый	Уровень пульпы h	0–500 мм	Устойчивость процесса
Возмущение	Расход магнетита	Зависит от сырья	Изменение плотности
Возмущение	Гранулометрия угля	-	Изменение разделения
Возмущение	Расход суспензии	-	Изменение уровня

Таблица 2 - Средства измерения и воздействия

Устройство	**Тип**	**Измерительный диапазон / точность**	**Функция**
Плотномер	Радиоизотопный / вибрационный	1000–1600 кг/м³; ±5 кг/м³	ρ → ПЛК
Уровнемер	Гидростатический	0–500 мм; ±5 мм	h → ПЛК
Расходомер	Электромагнитный	-	Расход среды и магнетита
Концевой датчик	Датчик положения	-	Положение шибера
Клапан магнетита	Электропривод	-	Повышение плотности
Клапан воды	Электропривод	-	Понижение плотности
Шиберный затвор	Электропривод	-	Отвод пульпы

2. Архитектура и ПИД-регулирование

Таблица 3 - Уровни реализации АСУ ТП

Уровень	**Платформа**	**Обмен и алгоритмы**	**Функции**
Контроллерный	Siemens S7-1200/S7-1500	LD, FBD; ПИД; PROFINET	Сбор аналоговых сигналов и блокировки [4, 5]
Диспетчерский	SCADA WinCC или аналог	PROFINET / Modbus TCP	Мнемосхемы, тренды, архив, тревоги

Уровень	**Платформа**	**Обмен и алгоритмы**	**Функции**
Технологический	Датчики и приводы	0–10 В или 4–20 мА; дискретные сигналы	Измерение и управление

$$e_\rho(t) = \rho_{\text{set}} - \rho(t) \qquad (1)$$

где ρ_{set}- уставка плотности, кг/м³; $\rho(t)$- текущая плотность; e_ρ- ошибка.

$$u_\rho(t) = K_p e_\rho(t) + K_i \int_0^t e_\rho(\tau)\, d\tau + K_d \frac{de_\rho}{dt} \qquad (2)$$

где u_ρ- управляющее воздействие на узел подачи магнетита/воды; K_p, K_i, K_d- параметры ПИД-регулятора [4].

$$e_h(t) = h_{\text{set}} - h(t),\ u_h(t) = \text{PID}_h(e_h) \qquad (3)$$

где h_{set}и $h(t)$- заданный и фактический уровни, мм; u_h- команда исполнительному шиберу.

$$h(t) \geq h_{\max} \ \Rightarrow\ \text{Feed}_{\text{coal}} = 0 \qquad (4)$$

где $h_{\max}$- порог переполнения; условие - аварийное прекращение подачи угля.

Таблица 4 - Логика режимов и блокировок

Состояние / условие	**Действие ПЛК**	**Интерпретация**
Пуск	Насос → сепаратор → подача угля	Сохранение последовательности
Нормальная работа	ПИД-контуры ρ, h	Поддержание уставок [4]
Падение плотности	Приоткрыть подачу магнетита	Коррекция состава
Рост плотности	Увеличить подачу воды	Коррекция состава
Рост уровня	Открыть шибер	Снижение уровня
Останов насоса	Отключить подачу угля	Защита от нарушения режима
Переполнение	Аварийный останов	Блокировка по (4)
Отказ датчика	Сигнал тревоги; предусмотрено ручное управление	Переход выполняется по безопасной процедуре

Состояние / условие	**Действие ПЛК**	**Интерпретация**
Плановый останов	Подача угля → сепаратор → насос	Обратный порядок

Последовательность пуска и останова в таблице важна не меньше самих ПИД-контуров, ведь при неправильном порядке насос может работать вхолостую, а шибер - открыться до заполнения сепаратора.

3. Результаты расчетного примера

Таблица 5 - Настройки и показатели расчётного примера

Параметр	**Результат модели**	**Требования**
Отклонение плотности	±5 кг/м³	Не хуже ±10 кг/м³
Отклонение уровня	±10 мм	Не хуже ±15 мм
Время переходного процесса	≤3 мин	Требование технологического регламента
Система расчета	MATLAB/Simulink	Учитываются запаздывание и расходы воды/магнетита

$$| \rho - \rho_{\text{set}} | \leq 5 \text{ кг/м}^3, \ | h - h_{\text{set}} | \leq 10 \text{ мм} \qquad (5)$$

где (5) - достигнутые отклонения в имитационном моделировании.

$$\Delta Y = 1 - 2\ \%, \ \Delta M = 5 - 7\ \% \qquad (6)$$

где ΔY- заявленный прирост выхода концентрата; ΔM- ожидаемое относительное снижение расхода магнетита.

Таблица 6 - Доказательная база и дальнейшие испытания

Позиция	**Сохранённое положение**	**Что необходимо подтвердить**
Технологическая результативность	Стабилизация ρ и h	Натурные тренды, чувствительность к исходному углю
Экономика	Оценка ΔY и ΔM	Материальный баланс и учёт расходных материалов
Измерения	Погрешности датчиков как проектные характеристики	Поверка и фактические условия монтажа

Позиция	**Сохранённое положение**	**Что необходимо подтвердить**
Безопасность	Блокировки и ручной режим	Протоколы функциональных испытаний

Заключение

Структурирована система управления тяжелосредным сепаратором на ПЛК с двумя ПИД-контурами, SCADA-визуализацией и логикой защитного останова. Выражения (1)–(6) описывают зависимости и ограничения, которые обычно формулируются словами. Практическая апробация требует измерений на фабрике и подтверждения ожидаемого эффекта по концентрату и расходу магнетита.

Список литературы

1. Wang Z., Kuang Y., Deng J., Wang G., Ji L. Research on the intelligent control of the dense medium separation process in coal preparation plant // International Journal of Mineral Processing. 2015. Vol. 142. P. 46–50. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.05.001. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.05.001
2. Gao Y., Yang S., Zhao L., Zhang Q., Yin L. Analysis of the heavy-medium separation system’s medium density control scheme applied at the coal preparation plant of Dalong Mine // Coal Preparation Technology. 2018. No. 4. P. 182–185. DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2018.04.048. https://doi.org/10.16447/j.cnki.cpt.2018.04.048
3. Tong J. Design and application of intelligent control system for heavy medium separation in Handan Coal Preparation Plant // Coal Preparation Technology. 2025. DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2025.04.013. https://www.xuanmeijishu.com/en/article/doi/10.16447/j.cnki.cpt.2025.04.013
4. Siemens AG. Technology object PID_Compact (S7-1200, S7-1500, S7-1200 G2) // TIA Portal Documentation, V21. 2025. https://docs.tia.siemens.cloud/r/en-us/v21/pid-control-s7-1200-s7-1500-s7-1200-g2/pid_compact-s7-1200-s7-1500-s7-1200-g2
5. IEC 61131-3:2025. Programmable controllers - Part 3: Programming languages. 4th ed. International Electrotechnical Commission. https://webstore.iec.ch/en/publication/68533