УДК 681.5:622.2

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)

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ (DIGITAL TWIN) ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НАСТРОЙКИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

APPLICATION OF A DIGITAL TWIN FOR AUTOMATING THE CONFIGURATION OF MINING EQUIPMENT

Аннотация. Предложен подход к настройке горного оборудования с использованием цифровой модели. Рассмотрены идентификация параметров, подбор настроек регуляторов, обмен с ПЛК и требования к проверке результатов моделирования.

Abstract. An approach to mining equipment configuration using a digital model is proposed. Parameter identification, controller tuning, PLC communication and requirements for validating simulation results are considered.

Введение

Настройка горных машин осложняется нелинейностью приводов, изменяющейся нагрузкой и ограниченной доступностью измерений. При переходе на другой забой и после ремонта регулировка параметров на реальном объекте связана с простоем и повышенными рисками. Практика создания цифровых двойников оборудования и виртуальной пусконаладки описана в исследованиях [1–3].

Рассматривается концепция поиска параметров регуляторов в синхронизированной цифровой модели с последующей проверкой в эмулированном ПЛК. В формализованном виде представлены сбор данных, идентификация, многокритериальная настройка, передача уставок и результаты имитационного примера.

1. Ограничения объекта и структура решения

Таблица 1 - Факторы настройки горного оборудования

Фактор	**Проявление**	**Следствие для процедуры**
Нелинейная динамика	Гидравлические приводы, редукторы, канатные системы	Выбор области применимости модели
Изменчивые условия	Крепость пород, влажность, гранулометрия	Периодическая реидентификация
Труднодоступность датчиков	Неполные данные с работающей машины	Отбор информативных сигналов
Высокая цена ошибки	Простой, травматизм, повреждение узлов	Промежуточная проверка в виртуальной среде [2, 3]

Таблица 2 - Трёхуровневая архитектура

Уровень	**Средства**	**Функция / связи**
1. Физический	ПЛК S7-1200/1500 или аналог; датчики давления, расхода, вибрации и положения; приводы	Измерения и запись допустимых уставок через OPC UA [4]
2. Цифровая модель	MATLAB/Simulink или Modelica; модели приводов, нагрузки и внешней среды	Численный отклик на изменения уставки
3. Настройка	Численная оптимизация, ограничения переходных процессов	Подбор K_p, K_i, K_d, пределов и уставок

2. Идентификация параметров

$$y_k^{\text{model}} = F(u_{0:k}, \theta),\ \theta = [K, , T, \tau \dots] \qquad (1)$$

где y- отклик модели; $u_{0:k}$- история управляющих воздействий; θ- коэффициенты передачи, постоянные времени и запаздывания.

$$\min_{\theta} \sum_{k=1}^{N} \left(y_k^{\text{obs}} - y_k^{\text{model}}(\theta) \right)^2 \qquad (2)$$

где метод наименьших квадратов; N- число наблюдений; θ^*обозначает оценённые параметры.

$$L\left(\theta \mid y^{\text{obs}}\right) \qquad (3)$$

где альтернатива - метод максимального правдоподобия; L- функция правдоподобия наблюдений.

Таблица 3 - Входы и выходы процедуры идентификации

Этап	**Данные**	**Обработка**	**Результат**
Сбор	Тестовый шаг уставки; изменение нагрузки	Временная синхронизация; фильтрация	Переходные процессы
Оценивание	Измеренный отклик и модельный отклик	МНК (2) или ММП (3)	Параметры θ*
Проверка	Данные вне настройки	Сопоставление отклика	Оценка адекватности в рабочем диапазоне
Актуализация	Новые процессы и параметры нагрузки	Повторить идентификацию при расхождении	Обновлённая модель

3. Настройка и цикл переноса параметров

$$e(t) = r(t) - y(t),\ J(\phi) = \int_0^T e^2\,(t;\phi)\,dt \qquad (4)$$

где r- уставка; y- фактический отклик; ϕ- набор параметров регулятора; J- интегральная квадратическая ошибка.

$$J(\phi) \to \min_{\phi} \text{ при } \sigma(\phi) \le \sigma_{\lim},\ t_s(\phi) \le t_{\lim} \qquad (5)$$

где σ- перерегулирование; t_s- время установления; $\sigma_{\lim}$и $t_{\lim}$- допустимые значения; поиск может выполняться методом Нелдера–Мида или генетическим алгоритмом.

$$d = |m_{\text{PLC}} - m_{\text{model}}| \qquad (6)$$

где d- обобщённая проверка расхождения по выбранным показателям; для практического применения величины нормируют по их допускам.

Таблица 4 - Итерационный алгоритм цифровой настройки

Шаг	**Действие**	**Результат / контроль**
1	Получение переходных процессов через OPC UA	Набор измерений [4]
2	Идентификация θ	Откалиброванная модель; (1)–(3)

Шаг	Действие	Результат / контроль
3	Оптимизация параметров регуляторов	φ*; (4), (5)
4	Проверка ограничений и загрузка	Уставки в эмулированный ПЛК [3, 5]
5	Прогон и сверка переходных процессов	Измерение d; (6)
6	При превышении допуска - новая идентификация	Повтор цикла «модель → настройка → проверка»

4. Сопоставление результатов имитационного эксперимента

Таблица 5 - Контур подачи очистного комбайна

Показатель	Ручная настройка	После автоматической настройки
Перерегулирование σ	18 %	6 %
Время переходного процесса t_s	2,5 с	1,4 с
Реализация	MATLAB/Simulink	PLCSIM Advanced, интерфейс OPC UA
Перенос в эмулятор	-	Расхождение $t_s \leq 8$ %
Перенос в эмулятор	-	Разница σ ≤ 3 процентных пунктов

$$\Delta\sigma = 18\,\% - 6\,\% = 12 \text{ п.п.},\ \Delta t_s = 2.5 - 1.4 = 1.1 \text{ с} \qquad (7)$$

где снижение перерегулирования — 12 п.п., времени переходного процесса — 1,1 с.

$$\eta_t = \frac{2.5 - 1.4}{2.5} \cdot 100\,\% = 44\,\% \qquad (8)$$

где относительное сокращение времени переходного процесса

Таблица 6 - Преимущества и условия проверки

Потенциальный эффект	Ограничение	Как подтверждать
Сокращение времени пусконаладки на 30–50 %	-	Хронометраж настройки с контрольной группой

Потенциальный эффект	Ограничение	Как подтверждать
Снижение зависимости от опыта наладчика	Качество модели и датчиков	Серия повторных настроек
Безопасная предварительная проверка [3]	Модель не воспроизводит все аварии	HIL и безопасные пределы в ПЛК
История параметров настройки	Нужна дисциплина версионирования	Журнал θ, φ, времени и условий

Заключение

Формализован алгоритм цифровой настройки: оценка параметров, оптимизация регуляторов и проверка после передачи уставок в эмулируемый ПЛК. В имитационном примере перерегулирование уменьшилось с 18 до 6 %, время переходного процесса — с 2,5 до 1,4 с. Для подтверждения на реальной машине необходимы испытания на физическом стенде и расширение подхода на многоконтурные системы.

Список литературы

1. Tian Y., Yu J., Gu J. Overview of Digital Twins in Mining Equipment // Intelligent Equipment and Special Robots. 2024. DOI: 10.3233/ATDE240242. https://doi.org/10.3233/ATDE240242
2. Qu J., Kizil M. S., Yahyaei M., Knights P. F. et al. Digital twins in the minerals industry - a comprehensive review // Mining Technology. 2023. Vol. 132, No. 4. P. 267–289. DOI: 10.1080/25726668.2023.2257479. https://doi.org/10.1080/25726668.2023.2257479
3. Ruzarovsky R., Horak T., Zelník R. et al. Development and Validation of Digital Twin Behavioural Model for Virtual Commissioning of Cyber-Physical System // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 5. Art. 2859. DOI: 10.3390/app15052859. https://doi.org/10.3390/app15052859
4. OPC Foundation. OPC Unified Architecture - Part 1: Overview and Concepts. OPC-10000-1, v1.05.06. https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-10000-1/full
5. Siemens AG. Technology object PID_Compact // 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