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)

ИНТЕГРАЦИЯ ДАННЫХ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ И ФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

INTEGRATION OF DIGITAL MODEL DATA AND PHYSICAL EQUIPMENT FOR AUTOMATION SYSTEMS

Аннотация. Рассмотрена интеграция цифровой модели и физического оборудования в системах автоматизации. Описаны уровни обмена данными, применение OPC UA, AAS и FMI, синхронизация состояний и требования к проверке задержек.

Abstract. Integration of digital models and physical equipment in automation systems is considered. Data exchange layers, OPC UA, AAS and FMI, state synchronization and requirements for latency testing are described.

Введение

Оперативное использование цифровых моделей невозможно без согласованного потока данных от датчиков, контроллеров и технологических приложений. Физическая система и виртуальное представление могут развиваться несинхронно: без повторной идентификации и обмена модель становится менее пригодной для принятия решений. В горной и перерабатывающей промышленности эти трудности рассматриваются как существенные барьеры внедрения цифровых двойников [1].

Цель работы - формализовать трёхуровневую интеграцию на базе OPC UA, AAS и FMI применительно к тяжелосредному сепаратору. Отдельно представлены схема потоков данных, критерии синхронизации, пример оценки задержек и ограничения для виртуальной пусконаладки.

1. Интеграционные технологии

Таблица 1 - Сопоставление механизмов интеграции

Компонент	**Основная роль**	**Данные / интерфейс**	**Граница применения**
Classic OPC (DA/HDA)	Исторический промышленный обмен	Windows / DCOM	Ограничения платформенной независимости
OPC UA [2, 6]	Обмен текущими значениями и моделирование адресного пространства	Узлы, переменные, подписки, клиент/сервер	Нужны настройка доступа и доверия
AAS [3]	Семантическое представление актива	Идентификаторы, атрибуты, подмодели	Не заменяет промышленный канал
FMI / FMU [4]	Перенос динамической имитационной модели	API / описание модели и исполняемый блок	Не заменяет семантику оборудования
Точечные драйверы	Разовая интеграция конкретного оборудования	Индивидуальный адаптер	Рост стоимости сопровождения

2. Трёхуровневая структура

Таблица 2 - Слои и связи модели с оборудованием

Слой	**Состав**	**Операции**	**Результат**
Физический	Siemens S7-1200/1500; ρ, h, положения приводов; клапаны	Измерить, обработать, выставить доступные узлы OPC UA	Реальные x и u
Промежуточный	OPC UA шлюз; AAS-оболочка	Соотнести NodeId с именами и единицами параметров	Семантически однозначные данные [3]
Верхний	MATLAB/Simulink, цифровая модель, анализ	Идентификация, прогноз, расчет уставки; при необходимости подключение FMU	Оценка $\hat{x}$ и предложения u* [4, 5]

$$x_k = \begin{bmatrix} \rho_k \\ h_k \\ q_k \\ a_k \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \qquad (1)$$

где x_k- вектор наблюдаемого состояния в момент k: ρ- плотность, h- уровень, q- расход, a- положение исполнительного органа.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, \theta) \qquad (2)$$

где f- модель динамики сепаратора; u_k- управление; θ- параметры, определяемые по измерениям.

$$\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_k \qquad (3)$$

где ε_k- вектор ошибки синхронизации физического объекта и модели; знак показывает направление расхождения.

$$\tilde{u}_k = g(\hat{x}_k, x_k),\ u_k = \mathrm{Approve}(\tilde{u}_k) \qquad (4)$$

где g- функция расчёта предложенной уставки; Approve- проверка допустимости перед записью в ПЛК.

Таблица 3 - Последовательность подключения сепаратора

№	Операция	Средство	Результат
1	Опубликовать теги ρ, h и клапанов	OPC UA сервер ПЛК	Доступные переменные
2	Связать теги с сущностями модели	AAS + адресное пространство	Согласованные имена и единицы
3	Настроить чтение/запись и период обновления	OPC UA Read/Write в Simulink [5]	Двусторонний обмен
4	Обновить модель параметрами процесса	Текущие x, θ	Актуальные расчеты
5	Сверить прогноз и фактические переходные процессы	Виртуальная пусконаладка	Ошибка, решение об уточнении
6	Записать только допустимые уставки	Клиент → ПЛК; локальные блокировки	Корректирующее действие

3. Задержка и пропускная способность

$$\tau_{\mathrm{loop}} = \tau_{\mathrm{sense}} + \tau_{\mathrm{net,up}} + \tau_{\mathrm{calc}} + \tau_{\mathrm{net,down}} + \tau_{\mathrm{apply}} \qquad (5)$$

где τ_{loop}- задержка полного цикла; слагаемые соответствуют измерению, передаче, расчёту, обратному обмену и применению команды.

$$f_{\text{poll}} = 10\ \text{Гц} \ \Rightarrow\ T_{\text{poll}} = \frac{1}{f_{\text{poll}}} = 0.1\ \text{с} \qquad (6)$$

где f_{poll}- частота опроса; T_{poll}- номинальный интервал считывания; не равен полной задержке.

$$\tau_{\text{loop}}^{\text{obs}} \in [0.08,\ 0.12]\ \text{с} \qquad (7)$$

Таблица 4 - Характеристики лабораторного примера

Показатель	**Значение / условие**
Физическая часть	ПЛК Siemens S7-1200
Цифровая часть	MATLAB/Simulink + OPC UA over Ethernet
Частота опроса	10 Гц
Полная задержка	80–120 мс
Число переменных	Около 200 тегов
Постоянные времени контуров	Десятки секунд

Из таблицы видно, что задержка в десятки миллисекунд на порядок меньше постоянных времени контуров. Это и позволяет использовать OPC UA в контурах регулирования плотности и уровня, не опасаясь, что обмен станет узким местом.

4. Практические преимущества и ограничения

Таблица 5 - Эффекты стандартизации и тестовые критерии

Направление	**Потенциальный эффект**	**Критерий проверки**
Масштабирование	Меньше отдельных драйверов	Повторяемое подключение нового актива [2, 3]
Актуальность	Снижение расхождения между физическим состоянием и оценкой модели	Норма ошибки по (3)
Виртуальная пусконаладка	Сценарии до включения в реальную линию	Сходство переходных процессов [5]

Направление	**Потенциальный эффект**	**Критерий проверки**
Согласование времени	Надёжные временные метки	Измерение τ_{loop} и его разброса
Информационная безопасность	Аутентификация, разграничение прав, шифрование [6]	Политики OPC UA и журналирование
Неполнота данных	Риск ошибочной уставки	Переход в безопасный режим ПЛК

Заключение

Предложенная архитектура разделяет транспортные функции OPC UA, семантику AAS и интерфейс динамических моделей FMI. Пример тяжелосредного сепаратора демонстрирует последовательность обмена и контроля ошибок; диапазон задержки 80–120 мс получен в лабораторных условиях. Дальнейшая работа должна включать синхронизированные журналы обмена, измерение джиттера и проверку влияния задержек на качество регулирования.

Список литературы

1. 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
2. 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
3. OPC Foundation. OPC UA for Asset Administration Shell (AAS). Specification OPC-30270, section 4. https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-30270/4
4. Modelica Association. Functional Mock-up Interface (FMI) Specification. Version 3.0.2, 27 November 2024. https://fmi-standard.org/docs/3.0.2/
5. MathWorks. Get Started with OPC UA in Simulink // Industrial Communication Toolbox Documentation. https://www.mathworks.com/help/icomm/ug/get-started-opc-ua-simulink.html
6. OPC Foundation. OPC Unified Architecture - Part 2: Security Model. OPC-10000-2, v1.05.06. https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-10000-2/full