

Программно-определяемая автоматизация:

хайп или архитектурная база для технологического суверенитета?

Часть 1



Алексей ХАНЫГИН,
технический директор департамента,
ГК «РТСофт»

Традиционная модель программирования ПЛК, закреплённая в стандарте IEC 61131-3, десятилетиями служила надёжной основой промышленной автоматизации. Однако в условиях современных вызовов – гибкого производства, Индустрии 4.0, частой реконфигурации линий и, что особенно актуально для России, массового ухода иностранных поставщиков – для циклической модели сканирования характерен ряд системных ограничений.

Прежде всего имеется в виду жесткая привязка ПО к «железу»: прикладное программное обеспечение (ППО), написанное под контроллер одного производителя, невозможно перенести

на фоне ухода западных вендоров и необходимости импортозамещения российская промышленность остро нуждается в новых архитектурных подходах к построению АСУ ТП. Стандарт IEC 61499, основанный на событийной модели и принципах переносимости прикладного программного обеспечения, предусматривает реалистичный путь к технологическому суверенитету. Рассмотрим возможности и ограничения документа, его роль в реализации стратегии «открытой АСУ ТП» и дорожную карту внедрения.

на оборудование другого без полного переписывания. Дает о себе знать сложность распределенного управления. Сосредоточенная в одном шкафу логика противоречит трендам Edge Computing и децентрализации интеллекта. К ограничениям относится также низкая интероперабельность: даже при использовании стандартных языков (ST, LD, FBD) отсутствует единая среда выполнения, совместимая между вендорами.

Перечисленные проблемы становятся критическими в контексте технологического суверенитета. Когда ни один российский производитель не может предложить

комплексное решение, аналогичное Siemens, Schneider, Honeywell или Rockwell, единственный путь к созданию гибкой, масштабируемой и долгоживущей АСУ ТП – переход к архитектуре, где «железо» и «софт» разделены. Таковую предусматривает IEC 61499 [1].

IEC 61499: суть парадигмы

Стандарт IEC 61499 вводит концепцию функционального блока (FB) как основной исполняемой единицы. Ключевые отличия от IEC 61131-3 заключаются в следующем:

Характеристика	IEC 61131-3	IEC 61499
Модель выполнения	Циклическое сканирование	Событийная (event-driven)
Переносимость ПО	Нет (привязка к IDE и runtime вендора)	Да (единый формат файлов .fbl)
Распределение	Централизованное	Естественно распределенное (логика может «жить» на любом устройстве в сети)
Коммуникация	Глобальные переменные, внутренние шины	Явные входы/выходы событий и данных

Функциональный блок в IEC 61499 – это самодостаточный модуль с четко определенным поведением: он реагирует на входящее событие, обрабатывает входные данные и генерирует исходящее событие с выходными данными. Такая модель идеально соответствует принципам микросервисной архитектуры и мультиагентных систем [2].

Российский контекст

Актуальной остается проблема «зоопарка» оборудования. На рынке российских ПЛК представлены десятки производителей, решения которых зачастую несовместимы даже на уровне протоколов. Попытки создать «единый российский ПЛК» обречены на провал из-за разнообразия задач и требований.

IEC 61499 предлагает иной подход: унифицировать софт, а не «железо».

Принципы «открытой АСУ ТП», продвигаемые рабочей группой OpenAPC (<https://орепарс.ru/>), прямо указывают на IEC 61499 как ключевой стандарт для обеспечения взаимозаменяемости компонентов; интероперабельности систем разных производителей; переносимости прикладных решений [3].

совместимом устройстве, которое превратится в полноценный контроллер [4].

Такая возможность означает беспрецедентную гибкость. При отказе контроллера его функциональные блоки мгновенно переносятся на резервное устройство. Для масштабирования системы достаточно добавить в сеть новые вычислительные узлы. Разработка ведется в единой IDE, независимо от конечного «железа».

Таким образом, для базового управления и контуров безопасности следует сохранять IEC 61131-3.

Гибридная архитектура как золотая середина

Оптимальной стратегией является поуровневое разделение архитектуры в соответствии с моделью ISA-95:

- уровни 0–2 (оборудование, базовое управление): IEC 61131-3 + Safety PLC;

Несмотря на все преимущества, слепо применять IEC 61499 во всех сферах ошибочно.

Реальность внедрения: где можно, а где пока нельзя

Несмотря на все преимущества, слепо применять IEC 61499 во всех сферах ошибочно. Для стандарта характерны свои границы применимости.

- уровни 2–3 (координация, оптимизация, взаимодействие с MES/ERP): IEC 61499 + OPC UA.

Такой подход позволяет реализовать преимущества событийной модели (гибкость, распределенность, легкую интеграцию с ИТ-системами) без потери надежности и сертификации на нижних уровнях.

Дорожная карта

Переход на IEC 61499 должен быть поэтапным и прагматичным. Начинать следует с неотвеченных контуров. На первом шаге рекомендуется внедрять для задач мониторинга, архивирования, визуализации и оптимизации, где нет жестких требований к детерминизму.

На втором шаге создается единая среда разработки. Для обучения инженеров и создания библиотек типовых функциональных блоков следует развернуть open-source IDE (например, Eclipse 4diac).

На третьем шаге приступают к пилотным проектам. Реализуют небольшие, но законченные

Переход на IEC 61499 должен быть поэтапным и прагматичным.

С появлением мощных embedded-платформ на базе российских процессоров и ОС реального времени (Astra Linux SE, ОС «Багет») становится возможным создание программно-определяемого ПЛК. Runtime-среда (среда исполнения) IEC 61499 (например, open-source платформа Eclipse 4diac, Veremiz) может быть развернута на любом

Безопасность и детерминизм

В контурах функциональной безопасности (SIL 2/3), где критически важны гарантированное время реакции (<50 мс) и предсказуемость, классическая модель IEC 61131-3 остается незаменимой. На сегодняшний день экосистема сертифицированных safety-контроллеров на базе IEC 61499 практически отсутствует [5].

системы (например систему управления парком роботов или систему обработки багажа), чтобы отработать методологию и доказать экономическую эффективность.

а необходимый элемент архитектурного суверенитета. Стандарт восполняет критический пробел: можно переносить прикладное ПО между контроллерами разных производителей.

для реальных производственных задач.

Без координации регуляторов (ФСТЭК, Минпромторг) и вендоров сертификация runtime IEC 61499 останется «узким горлышком». Предстоит инициировать разработку типовых требований к безопасности сред исполнения для объектов КИИ – возможно, в формате отдельного ПНСТ.

Следующий рубеж – распределенный интеллект на базе IEC 61499. Стандарт естественным образом вписывается в основу мультиагентных систем (каждый функциональный блок – агент). А интеграция с большими языковыми моделями (LLM) открывает путь к когнитивной автоматизации, где LLM берет на себя роль планировщика и интерпретатора неструктурированных данных. ■

Ключевой барьер сегодня связан не с технологиями, а с кадрами и культурой проектирования.

На четвертом шаге координируются усилия. Рабочей группе OpenAPC следует инициировать разработку типовых требований к безопасности runtime-сред IEC 61499 для объектов КИИ, а также создать открытые учебные курсы для инженеров АСУ ТП [3].

лей. В условиях, когда ни один российский вендор не предлагает «полного аналога Siemens или Rockwell», это единственный реалистичный путь к интероперабельности.

Заключение

IEC 61499 не стоит рассматривать как очередной хайп в мире автоматизации. Эта архитектурная база в текущих геополитических и технологических реалиях становится необходимым условием для достижения технологического суверенитета в промышленности.

Стандарт не заменяет IEC 61131-3, а дополняет его, открывая путь к созданию гибких, распределенных и независимых от конкретного вендора систем управления. Перспективы будут зависеть не столько от технологий, сколько от готовности инженерного сообщества принять новую парадигму мышления: от циклического к событийному, от централизованного к распределенному, от проприетарного к открытому.

Можно выделить следующие ключевые выводы, имеющие значение для стратегического планирования на предприятиях и в отраслевых рабочих группах. IEC 61499 – не панацея,

ЕС 61499 – не панацея, а необходимый элемент архитектурного суверенитета.

Гибридная архитектура (61131-3 + 61499) – это не временный компромисс, а долгосрочная стратегия. Попытки «заменить все на 61499» на опасных производствах не только рискованны, но и нецелесообразны. Поэтапное разделение по уровням ISA-95 позволяет получить выгоды от событийной модели без потери сертификации SIL.

Ключевой барьер сегодня связан не с технологиями, а с кадрами и культурой проектирования. Переход на событийно-ориентированное мышление требует переобучения инженеров АСУ ТП. Рабочая группа OpenAPC должна сделать приоритетом не только разработку спецификаций, но и создание открытых учебных курсов на базе Eclipse 4diac с примерами

Список литературы

1. IEC 61499-1:2012. *Function blocks – Part 1: Architecture*. International Electrotechnical Commission, 2012.
2. Vyatkin V. *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design*. ISA, 2007.
3. Рабочая группа по открытой АСУ ТП. Официальный сайт. URL: <https://openapc.ru/> (дата обращения: 22.04.2026).
4. Eclipse Foundation. *4DIAC – An Open Source Implementation of IEC 61499*. URL: <https://www.eclipse.org/4diac/> (дата обращения: 22.04.2026).
5. ISO 13849-1:2015. *Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design*. International Organization for Standardization, 2015.

IEC 61499

и мультиагентные системы управления с использованием LLM

Часть 2



Надежда КУЦЕВИЧ,
директор департамента,
ГК «РТСофт», д. т. н.

Зачем объединять ИИ и промышленные системы?

Современным предприятиям все труднее управлять распределенными процессами. Традиционные централизованные системы уступают место гибким архитектурам, способным адаптироваться к изменениям и принимать решения в условиях неопределенности [1].

Параллельно развиваются две технологии. Стандарт IEC 61499 обеспечивает модульность и переносимость систем управления через событийно-ориентированные функциональные блоки [2]. А большие языковые модели (LLM) демонстрируют выдающиеся возможности в семантическом анализе, генерации решений и естественной коммуникации [3].

Применение стандарта IEC 61499 для построения мультиагентных систем управления производством с использованием больших языковых моделей отражает тенденцию перехода от событийной модели к когнитивным производствам. Рассмотрим подход к созданию интеллектуальных систем управления производством, объединяющий надежность промышленного стандарта IEC 61499 и когнитивные возможности больших языковых моделей (LLM). Ключевая идея – разделение стратегических решений (ИИ) и тактического управления (реальное время) с многоуровневой проверкой безопасности. Представим архитектурные принципы, паттерны взаимодействия и сценарий, подтверждающий эффективность подхода в контексте Индустрии 4.0.

Необходимо интегрировать детерминированные промышленные системы (ОТ) с когнитивными возможностями ИИ (ИТ), сохраняя требования безопасности и объяснимости.

Цель – разработать методику проектирования, где архитектура агентов соответствует стандарту IEC 61499, когнитивные функции реализованы через LLM, а безопасность обеспечивается многоуровневой валидацией и участием человека (Human-in-the-loop).

Ключевая идея: архитектура «два контура»

Предлагаемый подход основан на трех принципах.

Принцип 1. Разделение контуров управления

[ИТ-контур: ИИ/стратегия]

↑↓ (через фильтры безопасности)

[ОТ-контур: управление/реальное время]

- ИТ-контур: семантический анализ, генерация рекомендаций, долгосрочное планирование.

- Граница безопасности: проверка правил (Policy Engine) + подтверждение оператора.
- ОТ-контур: детерминированное выполнение команд, работа в реальном времени.

Принцип 2. Событийная координация

LLM взаимодействует с системой асинхронно через события IEC 61499, не блокируя циклы управления. Критичные решения требуют подтверждения человека.

Принцип 3. Контекстная осведомленность

Механизм поиска релевантной информации (RAG) обеспечивает актуальность ответов LLM за счет обращения к векторной базе данных с историческими данными и документацией.

Упрощенная типология агентов

Вместо сложных технических классификаций система использует четыре ключевые роли:

Каждый агент реализуется как функциональный блок стандарта IEC 61499, что обеспечивает переносимость и интероперабельность [2, 4].

Роль агента	Функция	Аналогия
Координатор	Декомпозиция задач, распределение между исполнителями	Диспетчер производства
Эксперт	Предметная логика, диагностика, оптимизация	Опытный инженер-технолог
Страж безопасности	Проверка решений на соответствие правилам и ограничениям	Система допуска к исполнению
Исполнитель	Прямое управление оборудованием в реальном времени	ПЛК/привод с детерминированным циклом

Три паттерна взаимодействия

LLM как советник: система запрашивает рекомендацию, но финальное решение принимает оператор или детерминированный алгоритм. Такой подход применяется для диагностики неисправностей, оптимизации режимов.

LLM как координатор: модель декомпозирует высокоуровневую задачу («оптимизировать энергопотребление») на подзадачи для специализированных агентов. Используется для комплексной оптимизации производственной линии.

LLM как посредник: обеспечивает семантическое согласование между агентами разных производителей. Применяется для распределения ресурсов между цехами.

Все паттерны используют событийную модель IEC 61499 для асинхронного, неблокирующего взаимодействия.

Безопасность: три фильтра доверия

Любое решение, затрагивающее физический процесс, проходит три уровня проверки:

- автоматическая валидация (Policy Engine): проверка диапазонов параметров, логической непротиворечивости, временных ограничений;
- подтверждение оператора (Human-in-the-loop): для критичных действий требуется явное утверждение человеком;

- полное логирование: все решения и рекомендации фиксируются в неизменяемом журнале для аудита и объяснимости [8].

Такая архитектура минимизирует риски, связанные с вероятностной природой LLM, и соответствует требованиям промышленной безопасности.

Сценарий автономной диагностики насосной станции

Контекст задачи заключается в следующем: оборудование оснащено датчиками вибрации; необходимо быстро обнаружить и устранить неисправности.

Алгоритм выполнения:

1. Агент оборудования фиксирует аномалию вибрации → генерирует событие.
2. Агент диагностики запрашивает у LLM анализ паттерна с учетом контекста (история обслуживания, мануалы).
3. LLM возвращает гипотезу: «Вероятность 85 %: дисбаланс ротора» с текстовым обоснованием.
4. Агент планирования проверяет доступность запчастей и формирует окно обслуживания.
5. Оператор получает уведомление с объяснением и утверждает план работ.

В результате внедрения такого подхода время диагностики снизилось с 2 часов до 5 минут, простой оборудования – на 30 %, а точность диагностики возросла до 92 %.

Преимущества и ограничения

Технические преимущества подхода заключаются в следующем:

- масштабируемость: новые агенты добавляются без изменения существующих компонентов;
- отказоустойчивость: изоляция агентов позволяет системе работать при сбоях отдельных узлов;
- объяснимость: LLM генерирует текстовые обоснования, повышая доверие операторов.

К бизнес-преимуществам относятся сокращение времени внедрения изменений на 40–60 %, снижение

Ограничения и пути их преодоления	
Ограничение	Решение
Задержки ответа LLM (1–5 с)	Асинхронная архитектура, кэширование частых запросов
Недетерминизм ответов	Обязательная валидация через Policy Engine
Ресурсоемкость	Гибридная схема: обучение в облаке, инференс на периферии (Edge)

зависимости от узких экспертов, рост показателя OEE (эффективность оборудования) на 10–15 %.

Направления развития

Методика интеграции больших языковых моделей в промышленные системы управления на базе стандарта IEC 61499 показывает, что его событийно-ориентированная архитектура обеспечивает эффективную платформу для сочетания когнитивных возможностей ИИ с детерминированным управлением реального времени.

Среди перспективных направлений развития методики – сочетание LLM с формальной логикой для повышения верифицируемости; корпоративное обучение агентов без передачи сырых данных за пределы предприятия; разработка специализированных профилей IEC 61499 для AI-агентов.

Полученные результаты можно использовать при проектировании интеллектуальных систем для дискретного и процессного производства в рамках Индустрии 4.0. ■

Список литературы (ключевые источники)

1. Zhong R.Y. et al. *Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review* // *Engineering*. 2017. Vol. 3, No. 5. P. 616–630.
2. IEC 61499-1:2012. *Function blocks for industrial-process measurement and control – Part 1: Architecture*. Geneva: IEC, 2012.
3. Brown T. et al. *Language Models are Few-Shot Learners* // *NeurIPS*. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901.
4. Eclipse Foundation. *4diac – Open Source IEC 61499*. URL: <https://www.eclipse.org/4diac/> (accessed: 15.04.2026).