

**Москвин Артём Тимофеевич**, магистрант, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва

**МЕТА-АГЕНТ-ОРКЕСТРАТОР КАК АРХИТЕКТУРНЫЙ  
КОМПОНЕНТ КООРДИНАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ПРОЦЕССОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ АГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ**

**Аннотация**

В статье рассматривается архитектура мета-агента-оркестратора — управляющего компонента многоуровневой агентной системы промышленного предприятия. Проблематика состоит в фрагментации контуров управления: системы классов ERP, MES, EAM и LIMS функционируют автономно, а межфункциональная координация остаётся прерогативой человека. Предложена трёхуровневая иерархия агентов: мета-агент стратегического уровня, реализующий цикл принятия решений на основе детерминированной бизнес-логики. Информационным фундаментом выступает IoT-инфраструктура с единым пространством имён (Unified Namespace). Архитектура обеспечивает устранение информационных разрывов между передлами, автоматизацию арбитража межфункциональных конфликтов и сквозную прослеживаемость управляющих воздействий.

**Annotation**

The article discusses the architecture of a meta-agent orchestrator, a control component of a multi-level agent system of an industrial enterprise. The problem lies in the fragmentation of management circuits: ERP, MES, EAM, and LIMS class systems operate autonomously, while cross-functional coordination remains the prerogative of humans. A three-level hierarchy of agents is proposed: a strategic-level meta-agent that implements a decision-making cycle based on deterministic business logic. The information foundation is the IoT infrastructure with a Unified Namespace. Architecture ensures the elimination of information gaps between

redevelopments, automation of arbitration of cross-functional conflicts and end-to-end traceability of control actions.

**Ключевые слова:** мета-агент, оркестратор, мультиагентные системы, BDI-архитектура, Unified Namespace, IIoT, управление производством, FIPA ACL, промышленное предприятие

**Keywords:** meta-agent, orchestrator, multi-agent systems, BDI architecture, Unified Namespace, IIoT, production management, FIPA ACL, industrial enterprise

Управление производством на высокотехнологичном промышленном предприятии охватывает неоднородный парк оборудования и несколько горизонтов планирования — от месячной программы до минутного цикла прокатного агрегата. Традиционная архитектура информационного обеспечения складывается из специализированных систем: ERP отвечает за объёмно-календарное планирование, MES — за оперативное управление сменными заданиями, EAM ведёт учёт активов и регламентов обслуживания, LIMS замыкает контур лабораторного контроля качества. Сквозная координация между ними по-прежнему реализуется через совещания, телефонные звонки и личное экспертное суждение диспетчерского персонала [1].

Проблема не является новой: пятиуровневая иерархия управления, стандартизированная в ISA-95, определяет архитектурную рамку интеграции и разграничивает зоны ответственности систем разных уровней [2]. Но стандарт описывает модель данных и функциональные границы, а не механизм принятия согласованных решений в реальном времени. Именно этот механизм отсутствует. Когда агент технического обслуживания рекомендует плановую остановку, а производственная программа требует ускорения, конфликт разрешает человек — и разрешает его с задержкой в часы, а не секунды. При нарастающем дефиците квалифицированных инженерных кадров зависимость от ручного арбитража превращается в системное ограничение операционной эффективности [3].

Для решения проблемы предлагается архитектура мета-агента-оркестратора — управляющего агента верхнего уровня, координирующего специализированные доменные агенты на основе BDI-архитектуры и цикла ReAct. Агент интегрируется с ИТ-инфраструктурой. Структура включает три функциональных уровня, соотнесённых со стратегическим, тактическим и оперативным горизонтами управления в терминологии ISA-95 [2].

Стратегический уровень образован единственным компонентом — мета-агентом-оркестратором. Его задача состоит в координации агентов:

декомпозиции целей производственной программы на подзадачи, назначении агентов-исполнителей, агрегации результатов и арбитраже конфликтов. Поведение оркестратора описывается BDI-архитектурой. Убеждения (Beliefs) формируются из агрегированного потока данных IoT через единое пространство имён (Unified Namespace, UNS). Желания (Desires) задаются целевыми показателями производственной программы, поступающей от ERP-системы. Намерения (Intentions) представляют собой текущий план оркестровки — набор поручений доменным агентам с ожидаемыми результатами и сроками.

Цикл принятия решений реализован по схеме BDI-агента на основе системы правил: при поступлении возмущающего события оркестратор формирует цепочку рассуждений о причинно-следственной картине ситуации, выбирает действие, наблюдает его результат и при необходимости пересматривает цепочку. Принципиальное отличие от оригинальной парадигмы ReAct, разработанной для языковых моделей [5], состоит в том, что цепочка рассуждений строится на детерминированных правилах предметной области. Нейронные языковые модели не используются. Это обеспечивает предсказуемые временные характеристики управляющего сигнала — на уровне единиц секунд — и соответствие требованиям промышленной надёжности и верифицируемости [6].

Тактический уровень включает четыре специализированных агента, каждый из которых отвечает за отдельный функциональный домен. Агент планирования взаимодействует с APS/MES и формирует детальное посменное расписание. Расписание учитывает ограничения производительности агрегатов, плановые окна технического обслуживания, приоритеты портфеля заказов и доступность материалов. При появлении сбоя — отказ оборудования, задержка поставки, изменение приоритета заказа — агент пересчитывает расписание автономно, в горизонте от одной до нескольких смен, и передаёт результат оркестратору для согласования с другими доменами [7].

Агент диспетчеризации отслеживает текущий ход производства в

реальном времени. Знания формируются из потока событий оперативных агентов: факт начала и завершения операций, отклонения от расчётного времени цикла, простои и аварийные остановы. Обнаружив расхождение с планом, агент квалифицирует его по степени влияния на срок исполнения заказов и инициирует перераспределение ресурсов.

Агент контроля качества интегрирован с лабораторной информационной системой. Его функция — автоматическое формирование разрешения на переход партии к следующему переделу по завершении лабораторного анализа. В традиционной организации производства этот переход сопровождается информационной паузой: результаты анализа вносятся вручную, передаются диспетчеру, подтверждаются технологом. Агент устраняет эту паузу, замыкая контур LIMS–MES программно.

Агент технического обслуживания и ремонта (ТОиР) анализирует диагностические временные ряды — вибрацию, температуру, токовые нагрузки, — поступающие через IoT-инфраструктуру. На основе этих данных агент строит прогнозы деградации критичного оборудования и инициирует превентивные мероприятия, стремясь разместить их в периоды плановых простоев или низкой загрузки [7].

Оперативный уровень образован реактивными агентами, привязанными к конкретным производственным единицам: агрегатам, транспортным системам, складским позициям. Задача каждого агента — поддерживать актуальное цифровое представление о состоянии закреплённого объекта, выполнять команды вышестоящих агентов и возвращать подтверждение с обновлёнными статусными данными. Взаимодействие агентов всех уровней формализовано через протокол FIPA ACL [8]. Агенты обмениваются стандартизированными сообщениями: INFORM — для передачи статусной информации, REQUEST — для запроса выполнения действия, PROPOSE/ACCEPT/REJECT — для протокола переговоров при конфликте ресурсов. Стандартизация коммуникаций обеспечивает формальную верифицируемость каждого управляющего воздействия и упрощает аудит цепочки принятых решений.

Отдельный элемент архитектуры — контур супервизорного контроля. Мета-агент классифицирует каждое генерируемое воздействие по критерию критичности. Решения низкой и средней критичности исполняются автономно. Решения высокой критичности направляются на HMI-интерфейс диспетчера для явного утверждения. Реализуется концепция Human-in-the-Loop: автономность системы сохраняется в штатных режимах, а управленческая ответственность персонала — при отклонениях высокой критичности [9]. Корректное функционирование мета-агентной системы зависит от достоверности и своевременности входных данных.

Мета-агент-оркестратор, владеющий агрегированной картиной состояния всех доменов и приоритетами производственной программы, выполняет многокритериальную оценку. Она реализуется посредством расчета взвешенной суммы рисков штрафных функций для каждого сценария, где приоритет отдается минимизации срыва сроков поставки SLA. Цепочка рассуждений в цикле мета-агента включает: определение остаточного ресурса агрегата по данным агента ТОиР, оценку допустимого сдвига срока обслуживания, расчёт последствий срыва срока поставки, сопоставление рисков. На выходе — согласованное решение: выполнить заказ с промежуточным контролем и перенести обслуживание на ближайшее плановое окно, либо эскалировать решение в контур Human-in-the-Loop, если ни один из вариантов не укладывается в допустимые пороги риска.

Подобная схема выделяет три качественных преимущества, недостижимых при изолированном функционировании доменных систем.

Первое — устранение информационных разрывов. В традиционной организации результаты лабораторного анализа, статус обслуживания оборудования и оперативные данные о ходе производства существуют в разных системах с разной частотой обновления и разной семантикой. Мета-агент, получающий данные через UNS в единой семантической модели, формирует целостную картину, в которой задержка результата анализа в LIMS автоматически становится входным событием для пересчёта расписания.

Второе — автоматизация арбитража конфликтов. Решения, которые в ручном режиме требуют последовательного согласования диспетчера, технолога и инженера ТООР (цикл согласования измеряется часами), выполняются оркестратором за секунды. Скорость реакции меняет саму логику управления: переход от реактивного реагирования на уже произошедшее отклонение к превентивному перестроению производственного расписания до того, как отклонение повлияло на выпуск.

Третье — сквозная прослеживаемость. Каждое управляющее воздействие в архитектуре фиксируется: какой агент его инициировал, на основе каких данных, какую цепочку рассуждений реализовал оркестратор, какое решение принято, утверждено ли оно автоматически или через контур Human-in-the-Loop. Полный журнал решений создаёт условия для систематического анализа качества управления и непрерывного совершенствования правил оркестровки [12].

Перечисленные эффекты носят системный характер: они реализуются только при интегрированном развёртывании всех компонентов архитектуры. Изолированное внедрение предиктивного обслуживания или автоматического контроля качества даёт локальный выигрыш, но не устраняет фрагментацию контура управления как таковую.

#### **Список литературы**

1. Алмада-Лобо Ф. Революция индустрии 4.0 и будущее систем управления производством (MES) // Журнал инновационного менеджмента. — 2015. — Том 3, № 4. — С. 16-21.
2. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014. Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология. М. : Стандартинформ, 2015. 88 с.
3. Трачук А. В., Линдер Н. В. Влияние технологий индустрии 4.0 на повышение производительности и трансформацию инновационного поведения промышленных компаний // Стратегические решения и управление рисками. - 2020. — Том 11, № 2. — с. 132-149.
4. Лейтан П., Карнускос С., Рибейру Л., Ли Дж., Штрассер Т., Коломбо А. В. Интеллектуальные агенты в промышленных киберфизических системах //

- Труды IEEE. - 2016. — Том 104, № 5. — С. 1086-1101.
5. Яо С., Чжао Дж., Ю. Д. [и др.]. Реакция: синергетическое мышление и действие в языковых моделях // Материалы 11—й Международной конференции по обучению репрезентациям (ICLR 2023). - Кигали, 2023.
  6. Барпейма Ф., Райхельт Д. Обзор применения мультиагентного обучения с подкреплением на интеллектуальных фабриках // Рубежи в робототехнике и искусственном интеллекте. — 2022. — Том 9. — Статья 1027340.
  7. Морариу С., Морариу О., Рэйляну С., Боранджиу Т. Машинное обучение для прогнозирующего планирования и распределения ресурсов в крупномасштабных производственных системах // Компьютеры в промышленности. — 2020. — Том 120. — ст. 103244.
  8. Основа для интеллектуальных физических агентов. Спецификация структуры сообщений FIPA ACL. Документ SC00061G. — Женева : IEEE FIPA, 2002. — 23 с.
  9. Нахаванди С. Индустрия 5.0 — Решение, ориентированное на человека // Устойчивое развитие. - 2019. — Том 11, № 16. — ст. 4371.
  10. Сисинни Э., Сайфуллах А., Хан С., Дженнехаг У., Гидлунд М. Промышленный интернет вещей: вызовы, возможности и направления // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2018. — Том 14, № 11. — С. 4724-4734.
  11. OPC Foundation. OPC UA, часть 14: PubSub. Версия спецификации 1.05. — Скоттсдейл : OPC Foundation, 2022. — 212 с.
  12. Кузьмин Е. А., Гамидуллаева Л. А. Эмпирический анализ барьеров на пути перехода от стадии пилотного внедрения технологий четвертой промышленной революции к широкому внедрению // Стратегические решения и управление рисками. - 2021. — Том 12, № 4. — с. 338-353.

### References

1. Almada-Lobo F. The Industry 4.0 Revolution and the Future of Manufacturing Execution Systems (MES) // Journal of Innovation Management. — 2015. — Vol. 3, No. 4. — P. 16-21.

2. GOST R IEC 62264-1-2014. Integration of enterprise management systems. Part 1. Models and terminology. Moscow : Standartinform, 2015. 88 p.
3. Trachuk A.V., Linder N. V. The influence of Industry 4.0 technologies on productivity improvement and transformation of innovative behavior of industrial companies // Strategic decisions and risk management. - 2020. — Vol. 11, No. 2. — pp. 132-149.
4. Leitão P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A. W. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems // Proceedings of the IEEE. — 2016. — Vol. 104, № 5. — P. 1086–1101.
5. Yao S., Zhao J., Yu D. [et al.]. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models // Proceedings of the 11th International Conference on Learning Representations (ICLR 2023). — Kigali, 2023.
6. Bahrpeyma F., Reichelt D. A review of the applications of multi-agent reinforcement learning in smart factories // Frontiers in Robotics and AI. — 2022. — Vol. 9. — Art. 1027340.
7. Morariu C., Morariu O., Răileanu S., Borangiu T. Machine Learning for Predictive Scheduling and Resource Allocation in Large Scale Manufacturing Systems // Computers in Industry. — 2020. — Vol. 120. — Art. 103244.
8. Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA ACL Message Structure Specification. Document SC00061G. — Geneva : IEEE FIPA, 2002. — 23 p.
9. Nahavandi S. Industry 5.0 — A Human-Centric Solution // Sustainability. — 2019. — Vol. 11, № 16. — Art. 4371.
10. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2018. — Vol. 14, № 11. — P. 4724–4734.
11. OPC Foundation. OPC UA Part 14: PubSub. Specification Version 1.05. —

Scottsdale : OPC Foundation, 2022. — 212 p.

12. Kuzmin E. A., Gamidullayeva L. A. Empirical analysis of barriers to transition from the stage of pilot implementation of technologies of the fourth industrial revolution to widespread adoption // Strategic decisions and risk management. - 2021. — Vol. 12, No. 4. — pp. 338-353.