

Разработка моделей производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий на основе многоагентных систем

Ю.Ф. Тельнов
В.А. Казаков
А.В. Данилов
А.А. Брызгалов

Ссылка для цитирования

Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В., Брызгалов А.А. Разработка моделей производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий на основе многоагентных систем // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 4. С. 632–643. doi: 10.15827/0236-235X.142.632-643

Информация о статье

Поступила в редакцию: 31.08.2023

После доработки: 14.09.2023

Принята к публикации: 15.09.2023

Аннотация. В статье представлены концептуальная и поведенческие модели производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий на основе применения многоагентных технологий, реализующих холярхические и гетерархические принципы построения киберфизических производственных систем, которые обеспечивают построение и функционирование гибких и адаптивных систем управления производством. В качестве метода исследования предлагается использовать усовершенствованный метод декомпозиции многоагентных систем на автономные компоненты в соответствии с ролевым назначением агентов продуктов, агентов ресурсов и агентов платформы в производственных и бизнес-процессах. Метод разработки единой концептуальной модели позволяет интегрировать производственные и бизнес-процессы в системах управления производством сетевого предприятия на разных уровнях. Для обеспечения качества и надежности функционирования систем управления производством сетевых предприятий предлагается использовать метод формирования соглашений об уровне обслуживания. Основными результатами исследования являются построенная концептуальная модель архитектуры многоагентной системы управления производством сетевого предприятия, отражающая взаимодействие программных агентов – административных оболочек активов в соответствии с их ролями, и разработанные поведенческие модели процессов сетевых предприятий для организации бизнес-экосистемы, конфигурирования и контроля исполнения производственной цепочки с использованием языковых средств UML. В модели организации и контроля исполнения производственной цепочки введено использование соглашений об уровне обслуживания. Особенности построенных моделей производственных и бизнес-процессов являются усиление их интеграции на различных уровнях управления производством, а также введение механизма управления качеством через аппарат создания и использования соглашений об уровне обслуживания, что позволяет повысить качество и надежность гибкого конфигурирования и исполнения производственных цепочек сетевого предприятия.

Ключевые слова: модели производственных и бизнес-процессов, индустрия четвертого поколения, бизнес-экосистема, цифровая платформа, многоагентная система, киберфизическая производственная система, система управления производством, административная оболочка актива

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00282

Введение. Создание сетевых предприятий с помощью многоагентной технологии, реализующей принципы индустрии четвертого поколения, позволяет усилить интеграцию производственных и бизнес-процессов, их адаптивность и гибкость, а также надежность функционирования производственных систем [1–3]. Последние достижения в области развития микросервисных архитектур, применяемых в киберфизических производственных системах, способствуют повышению эффективности построения многоагентных цифровых платформ, поддерживающих функционирование распределенных бизнес-экосистем и формируемых на их основе сетевых предприятий [4, 5].

В работе [6] сформулированы требования к программной реализации цифровых платформ в соответствии с концепцией индустрии чет-

вертого поколения, обеспечивающих создание сетевых предприятий, в частности, определены требования к созданию общеплатформенных сервисов и функциональных сервисов цифровых двойников, реализуемых в виде административных оболочек активов (AS). Вместе с тем для эффективного построения многоагентных систем в рамках реализации концепции индустрии четвертого поколения требуется достаточно детальная разработка моделей производственных и бизнес-процессов на различных стадиях жизненного цикла выпуска продукции или оказания услуг. В настоящей работе предлагаются концептуальная и поведенческие модели процесса организации бизнес-экосистемы на цифровой платформе и процессов оперативного конфигурирования и контроля исполнения производственной цепочки создания про-

дукции, что позволит повысить функциональную пригодность многоагентных технологий для построения гибких децентрализованных систем управления производственными процессами.

В организации взаимодействия интеллектуальных агентов, соответствующих различным участникам производственной цепочки, большое значение придается организации надежности доступа ко всей системе и обеспечения необходимого уровня качества исполнения производственных и бизнес-процессов на уровне как типов продуктов, так и конкретных заказов производства продукции и услуг. С этой точки зрения известно развитие инструментария автоматизированного создания и использования соглашений об уровне обслуживания (SLA, Service Level Agreement) на основе динамически формируемой информации административных оболочек активов [7, 8]. В работе [7] предлагается система iNegotiate, которая является посредником в переговорах между участниками потенциального SLA.

По мнению авторов [8], использование цифровой платформы для потребителя услуг помогает обеспечить доверие к данным и сэкономить время за счет автоматизации контроля параметров и мониторинга SLA. В этом отношении цифровая платформа системы управления производственными процессами должна обеспечивать решение задач как организации производственных цепочек, так и диагностики отклонений от нормативного выполнения соглашений об уровне обслуживания. В статье предлагается отражение в модели производственных и бизнес-процессов инструментария создания и использования соглашений об уровне обслуживания на стадиях оперативного планирования и контроля исполнения.

В качестве методов концептуального и поведенческого моделирования в работе предлагаются построение производственных и бизнес-процессов в соответствии с ролевой специализацией программных агентов, а также обеспечение надежности оперативного конфигурирования и контроля исполнения производственной цепочки за счет заключения соглашений об уровне обслуживания и контроля его исполнения, что позволит повысить функциональную пригодность многоагентных технологий для построения гибких децентрализованных систем управления производственными процессами. В данной статье представляются модели процессов, связанных с позаказным производством единичной продукции на сетевом предприятии.

Метод моделирования производственных и бизнес-процессов в многоагентной системе управления производством

Моделирование производственных и бизнес-процессов для последующей реализации в многоагентной системе управления производством выполняется с помощью языковых средств UML, позволяющих строить статические и динамические модели ПО. Разработка моделей производственных и бизнес-процессов с помощью языковых средств UML предполагает, в первую очередь, структурирование процессов в виде множества взаимосвязанных компонентов производственной системы, отображаемых в административных оболочках, а во вторую, представление этого множества в виде концептуальной модели классов, соответствующих компонентам, а также поведенческих моделей в форме диаграмм последовательностей.

Для поддержания работы отдельных программных агентов, их создания, проверки надежности, поддержки реализации связей между агентами требуется общая цифровая платформа, организованная в соответствии с требованиями облачной технологии [6], в задачи которой входит поддержание как всей бизнес-экосистемы в виде множества агентов участвующих предприятий, так и конкретных динамически создаваемых сетевых предприятий. В терминологии FIPA многоагентная платформа должна поддерживать агента платформы (AMS, Agent Management System – систему управления агентами, регистрирующую агентов на платформе), реестр активных агентов продуктов и ресурсов (активных сервисов агентов), составляющих конкретное сетевое предприятие (DF, Directory Facilitator), а также сервис передачи сообщений между агентами (MTS, Message Transport Service). Агент платформы берет на себя также функции управления предложениями ресурсов (шаблонами соглашений об уровне обслуживания, SLA-T) и собственно соглашениями об уровне обслуживания (SLA) между участниками платформы.

Ключевой вопрос в обосновании метода моделирования кибернетической части производственной системы – определение ролевой специализации программных агентов. К основным типам относят прежде всего агентов продуктов и агентов ресурсов [1, 9, 10]. Данное разделение хорошо соотносится с классификацией активов по спецификациям архитектуры RAMI [11], обслуживаемых агентами, – административными оболочками активов. По этой классификации

с точки зрения уровня вложенности элементов производственной деятельности холархии [12] выделяют продукт и его компоненты, обслуживаемые AS-агентами продуктов, а также средства производства: контроллеры, оборудование, рабочие центры, предприятие, связанный мир (сетевое предприятие – авторский термин), обслуживаемые AS-агентами ресурсов. В работе [10] рассматривается бинарное взаимодействие между агентом продукта, который отражает требования к выполнению необходимых работ и их реализации, и агентом ресурса на уровне предприятия, которое эти работы выполняет.

AS-агенты ресурсов создаются в статике и на верхнем уровне предприятий заносятся в реестр агентов платформы в момент подключения к бизнес-экосистеме платформы. AS-агенты продуктов создаются в процессе реализации проекта и отражают динамические информационные модели продукта на всех стадиях жизненного цикла и уровнях управления.

Рассмотрим схему взаимодействия агентов продуктов, агентов ресурсов и агента платформы более детально (рис. 1).

Так, на уровне головного предприятия агент продукта осуществляет декомпозицию продукта на составные части и для каждой части подбирает агента ресурса, который будет осуществлять управление созданием этой составной части. Агент ресурса, получив управление от агента продукта, создает своего агента продукта (соответствующей составной части), который фиксирует требования и результаты создания. Если для получения результата – компонента требуется декомпозиция работ, новый агент продукта рекурсивно повторяет определенную выше процедуру.

Таким образом формируется фрактальная структура производственного процесса, в которой агент продукта для компонента организует и координирует производственную цепочку агентов ресурсов, управляющих производственными операциями. Такая фрактальная структура распространяется и на сетевые предприятия, когда головное предприятие и соответствующий агент продукта играют координирующую

роль, а входящие в гетерархию предприятия-участники, выпускающие составные узлы и детали, имеют соответствующих агентов ресурсов. Агенты продуктов получают состав узлов и деталей по онтологии.

Предлагаемый метод декомпозиции много-агентных систем в соответствии с ролевым назначением программных агентов усовершенствован расширением функций агента платформы за счет добавления функций администрирования предложений агентов ресурсов и исполнения соглашений об уровне обслуживания между участниками бизнес-экосистемы, а также добавлением соответствующих функций формирования и обработки соглашений агентами ресурсов и агентами продуктов, что позволяет повысить гибкость, качество и надежность выполнения производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий.

Основные результаты построения моделей производственных и бизнес-процессов сетевого предприятия

Концептуальная модель. Представленная на рисунке 2 модель основана на спецификации из [13] и отражает основные компоненты,

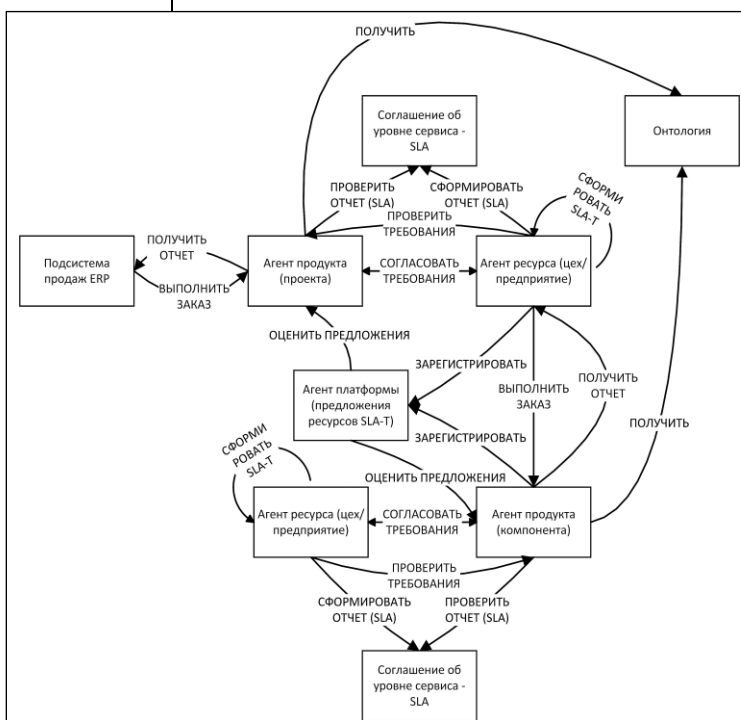


Рис. 1. Фрагмент фрактальной многоагентной системы выполнения заказов на изготовление продукции

Fig. 1. Fragment of a fractal multi-agent system for filling production orders

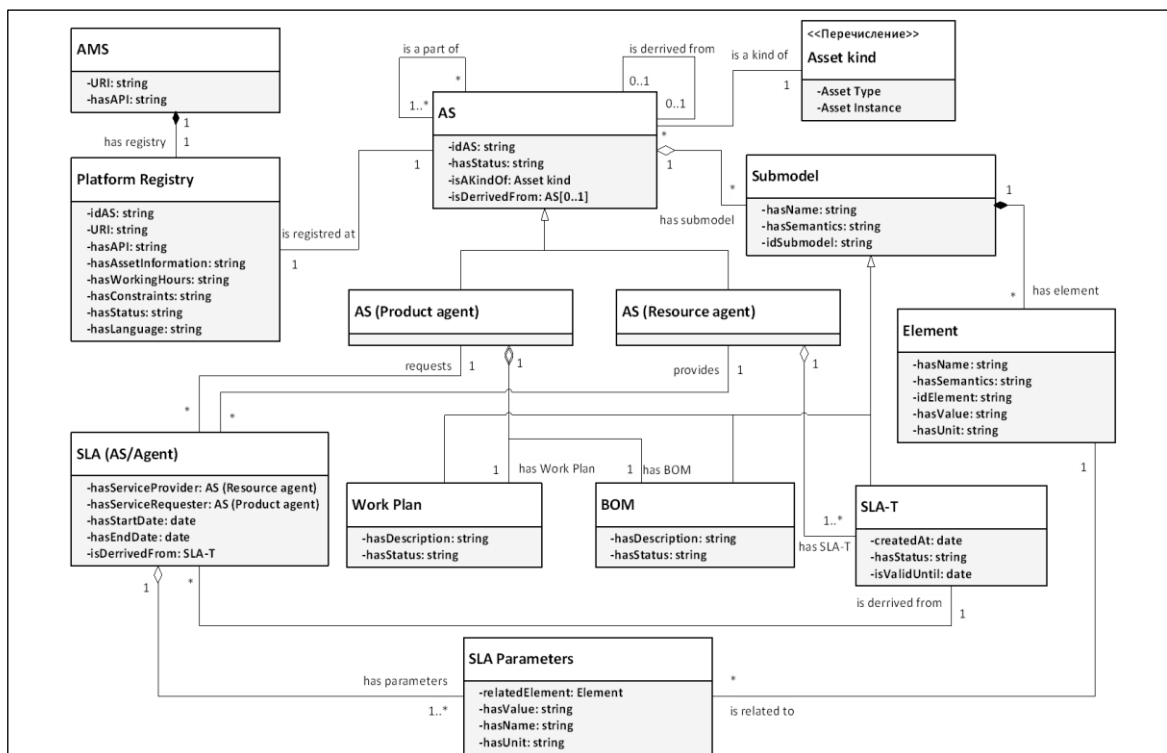


Рис. 2. Концептуальная модель архитектуры многоагентной системы управления производством сетевого предприятия

Fig. 2. Conceptual model of a multi-agent system architecture for network enterprise production management

которые расширяются за счет дополнения и уточнения части, связанной с организацией функционирования платформы как многоагентной системы, и части, описывающей характер договорных отношений о предоставлении сервиса между участниками, на основе соглашений об уровне обслуживания.

Отношение AS-агентов продуктов и ресурсов, представляющее собой соглашение об уровне обслуживания, может быть реализовано как пассивная административная оболочка, фиксирующая параметры SLA. Для формирования необходимого уровня доверия между участниками бизнес-экосистемы со стороны AS-агента продукта осуществляется контроль соблюдения SLA в рамках взаимодействия поставщиков и потребителей сервисов (видов работ) и составление рейтинга SLA на основе исторических данных.

База знаний агентов (продукта, ресурса) может структурироваться в виде подмоделей и содержать как целевые установки агентов, правила функционирования, так и статичные параметры [10].

Элементы подмоделей соответствуют как параметрам продукта, его структуре и способе

производства, так и параметрам предоставления сервиса ресурсом (активом), значениям (диапазоном значений) параметров и применяемым единицам измерения. Уровни доступа к элементам подмоделей AS настраиваются, исходя из текущих потребностей участников бизнес-экосистемы, стадии жизненного цикла или хода исполнения производственного и/или бизнес-процесса.

Состав подмоделей в целом зависит от типа AS, обусловленного стадией жизненного цикла продукта. При этом можно выделить AS типа продукта (стадии замысла, проектирования) и AS конкретного экземпляра продукта (стадии планирования выпуска, производства/оказания услуг, сопровождения, списания) или партии продуктов. При сопровождении продукции данные из AS экземпляров могут использоваться для пересмотра параметров AS типа продукта. К основным подмоделям AS типа (экземпляра) продукта относятся состав работ по производству продукции и компонентная структура (Bill of materials, BOM).

Характерная особенность подмоделей AS производственных ресурсов (цехов, предприятий) заключается в формировании SLA-T, ко-

торые имеют ограниченный срок действия, что обусловлено наличием производственных планов и изменением уровня загрузки мощностей поставщика услуг, отражаемых в соответствующей административной оболочке.

SLA-T содержат элементы, относящиеся к будущим параметрам SLA. Эти элементы описывают различные характеристики, связанные с уровнем предоставления сервиса, например:

- бизнес-характеристики (назначение, цена, условия оплаты, сроки выполнения, наличие документов, предоставление гарантий, обеспечение конфиденциальности, выполнение работ в рамках законодательства, основные потребители, способ распространения, внешний вид);

- технические характеристики (необходимые функции, надежность, доступность, скорость, безопасность, время отклика);

- качественные характеристики (качество обслуживания, гибкость, масштабируемость, удобство использования, внешний вид, возможность поддержки, соответствие стандартам безопасности).

Разработанная концептуальная модель архитектуры многоагентной системы управления производством сетевого предприятия является основой для построения поведенческих моделей производственных и бизнес-процессов сетевого предприятия на различных стадиях жизненного цикла создания продукта и уровнях системы управления сетевым предприятием.

В качестве моделей основных бизнес-процессов сетевого предприятия разработаны поведенческие модели в виде диаграмм последовательностей процессов подключения нового участника к бизнес-экосистеме, конфигурирования производственной цепочки для выполнения производственного заказа и контроля за ним. Перечисленные бизнес-процессы относятся к стадии жизненного цикла, характеризующей производство продукции, и рассматриваются на уровне участников сетевого предприятия. В дальнейшем по сконфигурированным производственным цепочкам выполняются производственные процессы, которые формируют данные отчетов для контроля исполнения производственных заказов.

Модель процесса подключения нового участника к бизнес-экосистеме. Производственные и бизнес-процессы сетевых предприятий осуществляются на общей цифровой платформе, которая, как правило, поддерживается в облачной среде. Вокруг общей цифровой платформы собирается бизнес-экосистема предприятий,

включающая возможных партнеров по совместному бизнесу. На основе бизнес-экосистемы, поддерживаемой цифровой платформой, создаются различные сетевые предприятия в соответствии с возникающими проектами по изготовлению новой продукции или оказанию услуг.

Провайдер цифровой платформы и соответствующий агент платформы осуществляют функции координатора бизнес-экосистемы, а также ведения репозитория соглашений об уровне обслуживания между участниками бизнес-экосистемы. Агент платформы устанавливает правила подключения к цифровой платформе, которые реализуются с помощью сервисов платформы (идентификация участников платформы, ведение профилей, проверка информационной безопасности и др.). Участники платформы вводят свои идентификационные и прочие данные профиля, предоставляют необходимые информационные ресурсы. В реестре участников бизнес-экосистемы регистрируются административные оболочки агентов ресурсов, соответствующих предприятиям, включающим предложения по выполнению различных видов деятельности в виде SLA-T.

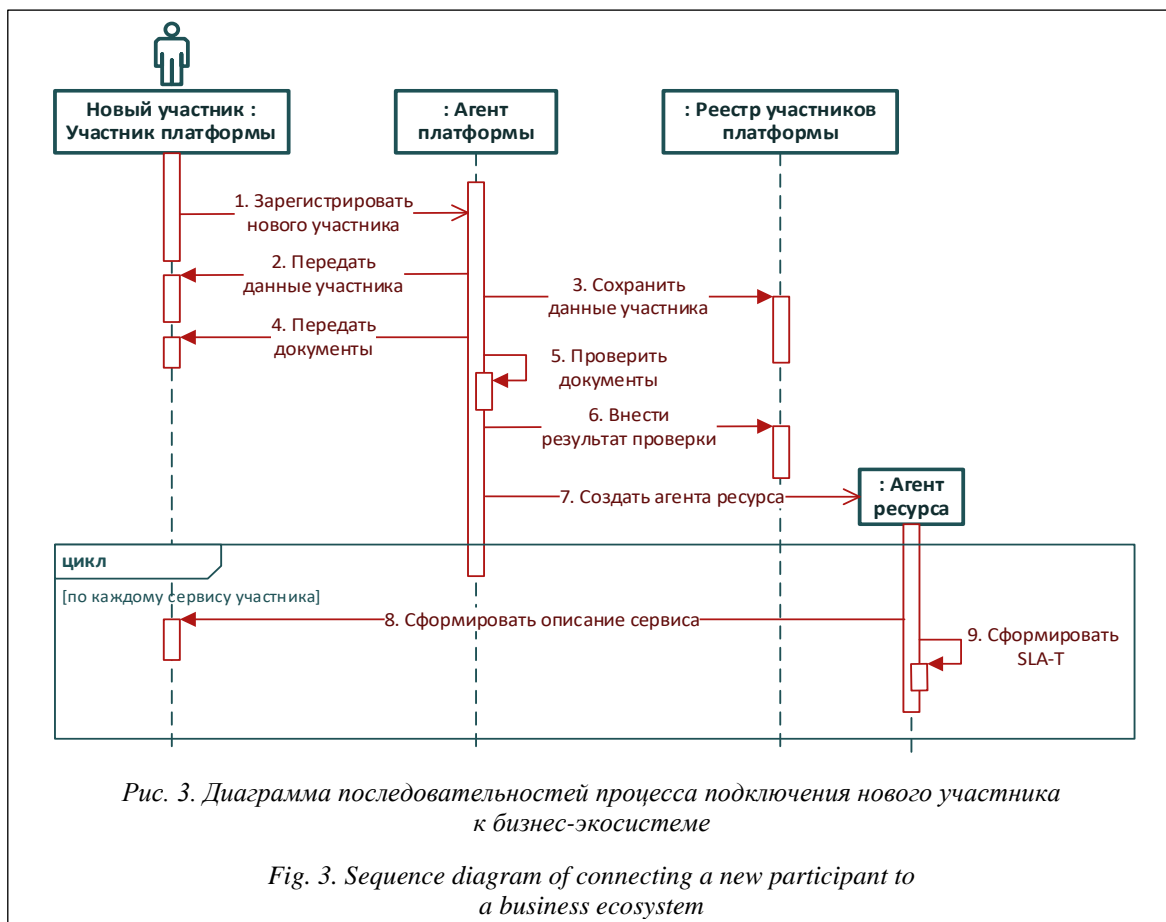
Диаграмма последовательностей процесса подключения нового участника к бизнес-экосистеме, представленная на рисунке 3, отражает следующие шаги процесса.

Шаги 1–3. Процесс начинается с того, что потенциальный участник отправляет запрос на регистрацию агенту платформы и вносит свои идентификационные данные, которые сохраняются в реестре участников на платформе.

Шаги 4–7. Участник по запросу агента платформы передает свои организационно-юридические документы для проверки их агентом платформы на предмет достоверности и безопасности. Агент платформы проводит необходимые процедуры проверки в соответствии с правилами безопасности внутренней базы знаний и формирует решение о безопасности нового участника. В рамках данного шага возможен запрос дополнительной информации как от участника платформы, так и из внешних источников. Если участник признается небезопасным, платформа отказывает в регистрации. Результат проверки сохраняется в реестре участников на платформе.

Шаг 8. Для участника, признанного безопасным, агент платформы создает агента ресурса и передает ему управление для формирования SLA-T нового участника.

Шаги 9–12. Агент ресурса циклически формирует шаблоны соглашения в диалоге с но-



вым участником на основе онтологии платформы. Результат сохраняется в подмоделях агента ресурса в соответствии с принципами построения AS.

По окончании процесса в системе сформирован новый агент ресурсов, который полностью готов к дальнейшему участию в сетевых предприятиях, формируемых на платформе.

Модель процесса конфигурирования производственной цепочки в соответствии с заказом. На платформе индустрии четвертого поколения различают процессы конструирования изделий на уровне типов продуктов и выпуска продукции на уровне экземпляров продуктов. Конструирование изделий на уровне типов означает, что разрабатывается первоначальная конструкция, которая непрерывно совершенствуется по мере производства конкретных изделий. Выпуск продукции (экземпляров продукта) предполагает организацию и планирование процесса под конкретный заказ или конфигурирование производственной цепочки, предполагающей адаптацию типовой конструкции изделия под требования конкретного заказа. В определенных случаях данный процесс в штатных ситуациях может выполняться

в автоматическом режиме без непосредственного участия менеджеров, которые вмешиваются в процесс только в случае возникновения нештатных ситуаций.

Диаграмма последовательностей процесса конфигурирования производственной цепочки, представленная на рисунке 4, отражает следующие шаги процесса.

Шаг 1. Процесс начинается с поступления агенту типового продукта производственного заказа из подсистемы управления продажами ERP-системы предприятия.

Шаг 2. Агент типового продукта адаптирует типовой план работ по созданию продукта на основе значений параметров продукции, заданных в индивидуальном заказе, для дальнейшего выполнения в производственной системе сетевого предприятия.

Шаг 3. Агент типового продукта создает агента продукта (экземпляра продукта) и передает ему адаптированный план работ для дальнейшего подбора ресурсов под этот план.

Далее в рамках процесса шаги выполняются циклически для каждого шага плана работ.

Шаги 4, 5. Агент продукта передает агенту платформы запрос на подбор ресурсов для вы-

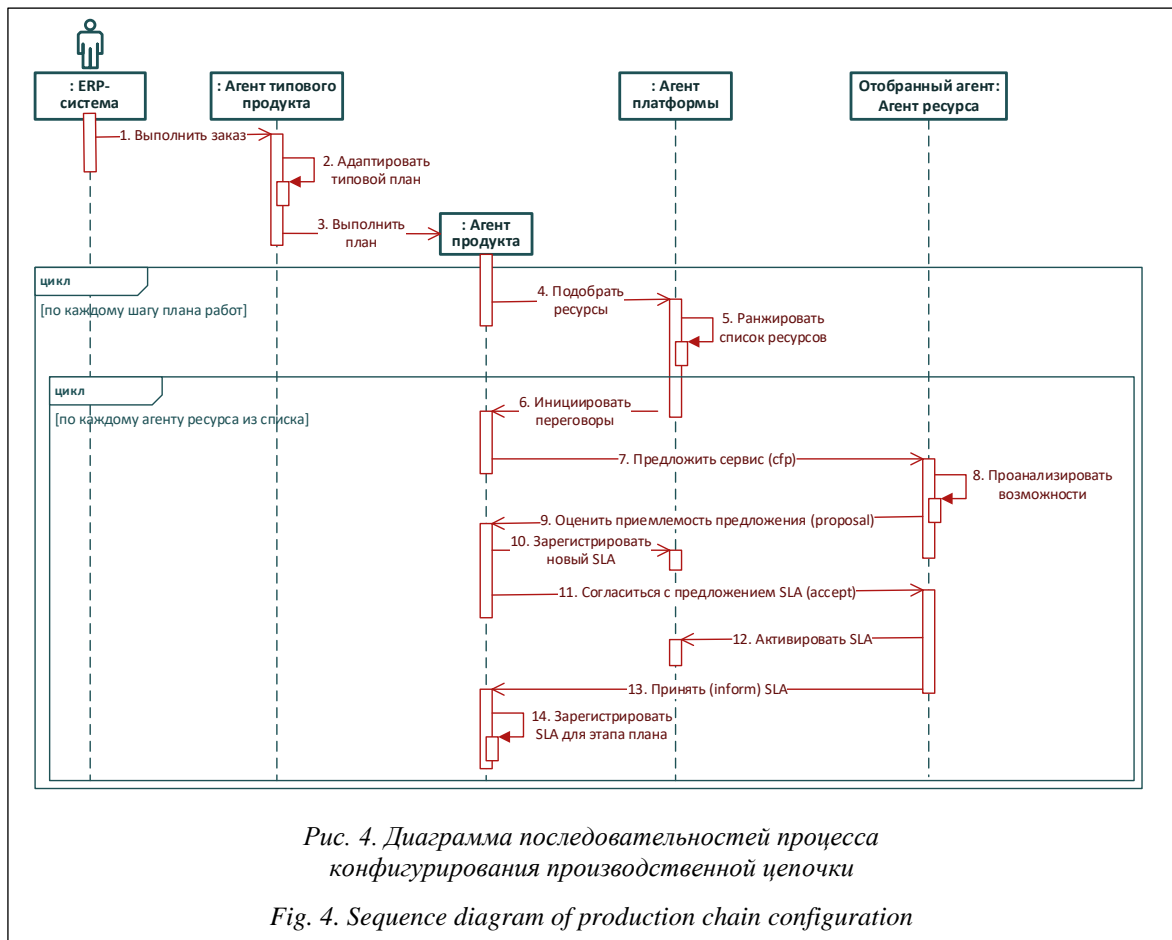


Рис. 4. Диаграмма последовательностей процесса конфигурирования производственной цепочки

Fig. 4. Sequence diagram of production chain configuration

полнения очередного шага плана. Запрос содержит описание сути работ и требования (параметры) к результату (продукту или услуге). В рамках этого агент платформы циклически анализирует и выбирает подходящих агентов ресурсов среди зарегистрированных на платформе и у каждого из них запрашивает список предлагаемых видов работ или сервисов (в виде набора SLA-T). Полученные шаблоны соглашений анализируются на предмет релевантности исходному запросу на ресурсы. Каждый релевантный SLA-T оценивается по уровню качества на основе ранее собранной статистики его выполнения в других заказах, в рамках чего агент платформы запрашивает оценки качества каждого реализованного соглашения об уровне обслуживания SLA, ранее созданного на основе данного SLA-T, и вычисляет интегральную оценку как среднее арифметическое всех оценок SLA [7].

Алгоритм оценки SLA-T выглядит следующим образом.

1. По каждому параметру SLA оценивается степень его фактического достижения:

$$I_{xy} = I_{xy}^{\text{факт}} / I_{xy}^{\text{план}}$$

где I_{xy} – степень достижения параметра y по SLA_x ; $I_{xy}^{\text{факт}}$ – фактическое значение параметра y по SLA_x ; $I_{xy}^{\text{план}}$ – плановое значение параметра y по SLA_x ; $x \in X$, $y \in Y$, где X – множество SLA по одному $SLA-T$, Y – множество параметров по одному SLA .

2. Общая оценка уровня качества SLA_x (I_x) рассчитывается как среднее арифметическое всех степеней достижения параметров:

$$I_{xy} = \frac{\sum I_{xy}}{N}$$

где N – количество параметров SLA_x , участвующих в оценке.

3. Общая оценка уровня качества $SLA-T$ (I_{SLA-T}) также по среднему арифметическому всех SLA , созданных на основе одного $SLA-T$:

$$I_{SLA-T} = \frac{\sum I_x}{M}$$

где M – количество SLA по одному $SLA-T$.

Управлением SLA занимается агент платформы, выступающий в роли посредника и гаранта уровня качества сервиса, который осу-

ществляется в рамках процесса контроля выполнения индивидуального заказа и, таким образом, на момент подбора предложений сервисов (SLA-T) от агентов ресурсов агент платформы уже имеет оценки качества ранее выполненных SLA.

На основе полученных интегральных оценок предложений сервисов (SLA-T) агент платформы строит ранжированный список соответствующих агентов ресурсов так, чтобы вверху списка оказались агенты с наивысшим уровнем сервиса (наивысшая оценка).

Далее процесс осуществляется последовательно циклически для каждого агента ресурсов в списке, то есть в порядке уменьшения оценки уровня сервиса. В рамках каждой итерации цикла агент продукта проводит переговоры с агентом ресурса на предмет заключения соглашения об уровне обслуживания (SLA) на основе стандартного протокола FIPA ACL.

Шаг 6. Агент платформы передает агенту продукта ссылку на очередного агента ресурса из ранее сформированного списка для переговоров на предмет заключения соглашения (SLA).

Шаг 7. Агент продукта отправляет запрос на выставление предложения сервиса (call-for-proposal, cfp) агенту ресурса.

Шаг 8. Агент ресурса анализирует параметры запроса на предмет возможности выполнения сервиса согласно внутренним правилам собственной базы знаний и имеющемуся плану загрузки производственных ресурсов и формирует предложение сервиса (SLA Offer), максимально близкое к исходному запросу.

Шаг 9. Агент ресурса высылает сформированное предложение (SLA Offer) сервиса агенту продукта на рассмотрение (proposal). Агент продукта анализирует приемлемость данного предложения по возможному отклонению значений параметров от исходных требований согласно правилам собственной базы знаний. Если предложение признается агентом продукта неприемлемым, агенту ресурса посылается сообщение с отказом и система переходит на следующую итерацию цикла, то есть к рассмотрению следующего по списку агента ресурса.

Шаг 10. Если предложение будет признано приемлемым, агент продукта формирует на его основе новый SLA и передает его на регистрацию агенту платформы. Регистрация на платформе означает согласие агента продукта с SLA.

Шаг 11. После регистрации агент продукта отправляет агенту ресурса сообщение со ссылкой на сформированный SLA в качестве согласия с условиями предложения (ассерт).

Шаги 12, 13. После получения согласия от агента продукта агент ресурса активирует SLA на платформе в качестве своего согласия с соглашением и информирует о заключении соглашения агента продукта.

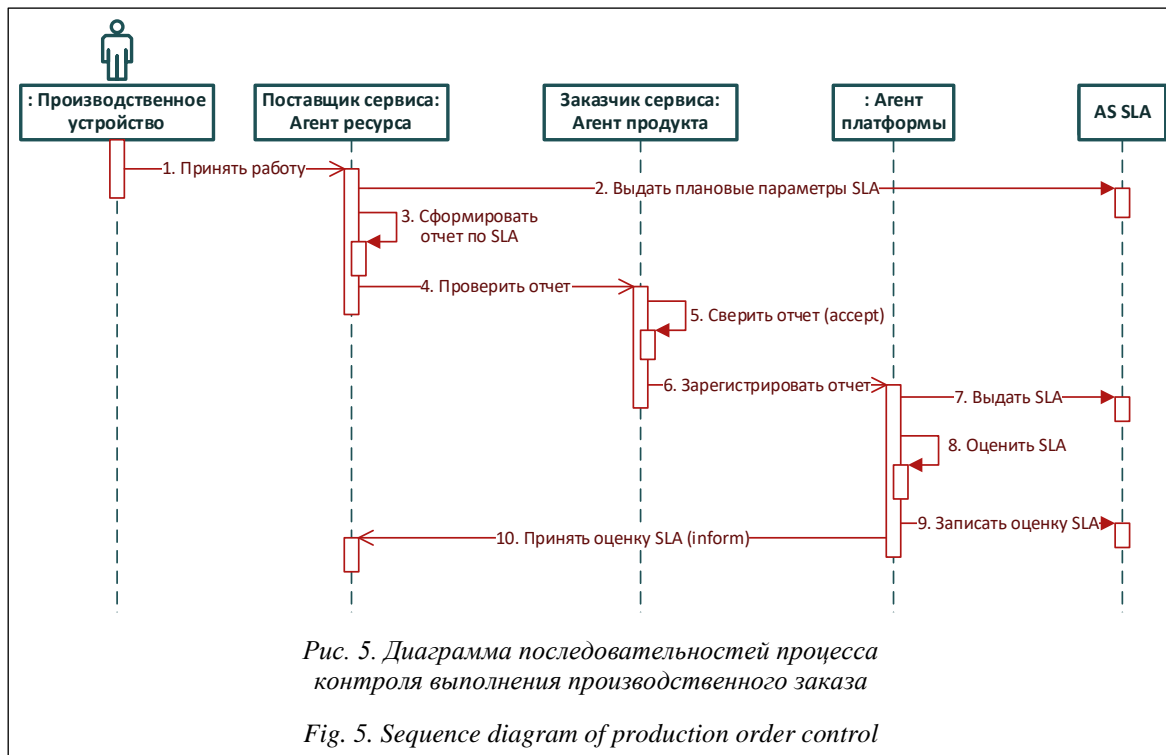
Шаг 14. На заключительном шаге агент продукта регистрирует SLA в рассматриваемом шаге плана работ в качестве отметки о назначении ресурса на выполнение шага. Далее процесс подбора ресурсов выполняется для следующего шага плана работ.

Результатом процесса является сконфигурированная производственная цепочка (план работ) по созданию продукта с закрепленными ресурсами по каждому пункту плана. В дальнейшем сформированный производственный процесс осуществляется в соответствии с плановыми сроками и иными параметрами, отраженными в SLA, по результату выполнения которого проводится контроль SLA.

Модель процесса контроля выполнения производственного заказа. Процесс контроля выполнения производственного заказа осуществляется по завершении изготовления продукта (компонента продукта) и при передаче отчета со сформированными техническими параметрами заказчику. В многоагентной системе формирование отчета о выполнении производственного заказа осуществляется агентом ресурса, а проверка на соответствие требованиям заключенного соглашения об уровне обслуживания – агентом продукта. Принятие отчета о выполнении заказа вместе с оценкой качества фиксируется в соглашении об уровне обслуживания и регистрируется агентом платформы в административной оболочке, отражающей соглашения об уровне обслуживания. Диаграмма последовательностей процесса контроля выполнения производственного заказа, представленная на рисунке 5, отражает следующие шаги процесса.

Шаги 1–3. На первом этапе агент ресурса получает фактические данные в виде технических параметров от производственных линий и параметры SLA с запланированными значениями от административной оболочки соответствующего SLA. На основе этих данных формирует отчет о выполнении SLA.

Шаги 4, 5. Полученный отчет агент ресурса отправляет на согласование агенту продукта, заказавшему соответствующую работу по SLA, который, в свою очередь, сверяет данные отчета с данными собственного входного контроля результатов выполнения сервиса. Если в рамках контроля будут выявлены несоответ-



ствия, согласование отчета будет проходить на основе обмена информацией между агентами продукта и ресурса и проверки их точности, пока не будет достигнут консенсус.

Шаги 6–9. Согласованный отчет агент продукта регистрирует у агента платформы, который проводит сверку данных отчета с исходным SLA и формирует оценку выполнения (1-й и 2-й шаги алгоритма оценки SLA-T) как степень фактического выполнения показателей по отношению к плановому значению. Результат записывается в SLA.

Шаг 10. Агент платформы информирует агента ресурса о полученной оценке уровня сервиса выполненного производственного заказа.

Результатом описанного процесса является сформированная в SLA оценка уровня сервиса, которая в дальнейшем используется для рейтингования ресурсов на платформе при заключении новых соглашений SLA о выполнении производственных заказов.

На основе разработанных моделей бизнес-процессов в виде диаграмм последовательностей, относящихся к конфигурированию производственных цепочек создания продукции и контролю их исполнения, можно сделать вывод о функциональной способности многоагентных технологий осуществлять построение гибких систем оперативного планирования и управления позаказным производством, а также обеспечивать контроль качества выпол-

нения производственных заказов за счет более точного согласования и оценки соглашений об уровне обслуживания между участниками сетевого предприятия.

Обсуждение

В отличие от известных работ по построению ролевой модели производственных и бизнес-процессов с использованием интеллектуальных агентов продуктов и ресурсов [10] в статье предложено развитие роли агента платформы, на которого возлагаются функции не только управления программными агентами и ведения их реестра, но и администрирования бизнес-экосистемы, подбора предложений, формируемых агентами ресурсов, для осуществления требований агента продукта, а также функций администрирования качества выполнения соглашений об уровне обслуживания, заключаемых совместно агентами продуктов и агентами ресурсов. В этом отношении предложенный в [7, 8] механизм управления соглашениями об уровне обслуживания (SLA) на стадии планирования и контроля исполнения заказов встраивается непосредственно в многоагентную систему управления производством сетевого предприятия, что позволяет повысить оперативность управления качеством и надежность построения производственных цепочек и их исполнения.

Более высокая степень гибкости конфигурирования производственных цепочек в отличие от работ [5, 10, 12] обеспечивается в результате реализации механизма адаптации типовых решений, поддерживаемых агентом типа продукта, к условиям реализации конкретного заказа, динамически формирующего административные оболочки агентов продукта (экземпляра продукта). При этом в полной мере реализуются рекурсивные процедуры разукладки конструкции изделия и динамического отбора агентов ресурсов и создания агентов продуктов (компонентов продуктов). С этой точки зрения используемые микросервисы могут базироваться как на правилах динамического реагирования на события, так и на статических правилах многокритериального принятия решений с использованием сочетания математического аппарата ресурсных вычислений и нечеткой логики на стадии оценки возможностей агентом ресурсов, а также полученного результата агентом продукта.

Заключение

В основу моделирования производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий положены холонические и гетерархические принципы организации активов сетевого предприятия и соответствующей организации программных агентов, которые обеспечивают гибкость конфигурирования производственных цепочек под производственные заказы и оперативность их адаптации под изменения конъюнктуры рынка во внешней среде с динамическим подключением к сетевым предприятиям различных участников единой бизнес-экосистемы.

В статье развивается метод построения ролевой модели производственных и бизнес-про-

цессов, предполагающей функциональное разделение ролей агентов продуктов, агентов ресурсов и агентов платформы, участвующих в построении производственных цепочек. Для повышения качества и надежности построения производственных цепочек предлагается метод, связанный с формированием и контролем исполнения соглашений об уровне обслуживания между предприятием, ответственным за создание продукта, и предприятием, осуществляющим производство или поставку необходимых компонентов. Эти компоненты оформляются в виде самостоятельных административных оболочек, отражающих взаимные обязательства предприятий, которые участвуют в сетевом предприятии, и накапливаемых в системе для последующего анализа эффективности работы участников бизнес-экосистемы и их выбора в новых заказах.

В статье формализованы в виде диаграммы классов концептуальная модель архитектуры многоагентной системы управления производством сетевого предприятия и в виде диаграмм последовательностей поведенческие модели процессов организации бизнес-экосистемы на основе общей цифровой платформы, конфигурирования производственной цепочки в соответствии с производственным заказом и контроля ее исполнения. В дальнейшем планируется реализация разработанных моделей в виде программного прототипа на платформе JADE в соответствии со стандартами FIPA. Реализация построенных моделей производственных и бизнес-процессов будет способствовать повышению уровня их интеграции в рамках корпоративной информационной системы, а также качества и надежности функционирования производственной системы на различных уровнях управления.

Список литературы

1. Salazar L.A.C., Ryashentseva D., Lüder A., Vogel-Heuser B. Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern – comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Tech.*, 2019, vol. 105, pp. 4005–4034. doi: 10.1007/s00170-019-03800-4.
2. Karnouskos S., Leitão P., Ribeiro L., Colombo A.W. Industrial agents as a key enabler for realizing industrial cyber-physical systems: Multiagent systems entering Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2020, vol. 14, no. 3, pp. 18–32. doi: 10.1109/MIE.2019.2962225.
3. Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О., Майоров И.В. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем // УБС. 2017. № 66. С. 94–157.
4. Belyaev A., Diedrich C. Specification "Demonstrator I4.0-Language" v3.0. Project: Industrie 4.0 Communication, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/334429449_Specification_Demonstrator_I40-Language_v30 (дата обращения: 20.08.2023).
5. Sakurada L., Leitao P., De la Prieta F. Agent-based asset administration shell approach for digitizing industrial assets. *IFAC PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no. 2, pp. 193–198. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.192.
6. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В., Денисов А.А. Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 557–571. doi: 10.15827/0236-235X.140.557-571.

7. Li F., Cabrera C., Clarke S. A WS-agreement based SLA ontology for IoT services. In: LNISA. Proc. ICIOT, 2019, vol. 11519, pp. 58–72. doi: 10.1007/978-3-030-23357-0_5.
8. Nouredine S., Meriem B. ML-SLA-IoT: An SLA Specification and Monitoring Framework for IoT applications. Proc. ICISAT, 2021, pp. 1–12. doi: 10.1109/ICISAT54145.2021.9678460.
9. Salazar L.A.C., Vogel-Heuser B. A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice. *Automatisierungstechnik*, 2022, vol. 70, no. 6, pp. 580–598. doi: 10.1515/auto-2022-0008.
10. Vogel-Heuser B., Ocker F., Scheuer T. An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems. *Automatisierungstechnik*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 1026–1039. doi: 10.1515/auto-2021-0081.
11. Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf> (дата обращения: 20.08.2023).
12. Komesker S., Motsch W., Popper J., Sidorenko A., Wagner A., Ruskowski M. Enabling a multi-agent system for resilient production flow in modular production systems. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 107, pp. 991–998. doi: 10.1016/j.procir.2022.05.097.
13. Industrie 4.0. Details of the Asset Administration Shell, Pt 1. URL: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf (дата обращения: 20.08.2023).

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.632-643

2023, vol. 36, no. 4, pp. 632–643

Network enterprises: Production and business process models based on multi-agent systems

Yury F. Telnov
Vasily A. Kazakov
Andrey V. Danilov
Alexey A. Bryzgalov

For citation

Telnov, Yu.F., Kazakov, V.A., Danilov, A.V., Bryzgalov, A.A. (2023) ‘Network enterprises: Production and business process models based on multi-agent systems’, *Software & Systems*, 36(4), pp. 632–643 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.632-643

Article info

Received: 31.08.2023

After revision: 14.09.2023

Accepted: 15.09.2023

Abstract. The paper presents conceptual and behavioral models of production and business processes of network enterprises. The models are based on multi-agent technologies that implement holarchic and heterarchic principles of building cyberphysical production systems, which ensure constructing and functioning of flexible and adaptive production management systems. A research method is an improved method of decomposing multi-agent systems into autonomous components according to a role assignment of product agents, resource agents and platform agents in production and business processes. The proposed method of developing a unified conceptual model allows integrating production and business processes in production management systems of a network enterprise at different levels. To ensure reliability of production management systems in network enterprises, it is proposed to use the method of forming service level agreements. The main result of the study is a constructed conceptual model of a multi-agent production management system architecture for a network enterprise. The model reflects the interaction of software agents – administrative asset shells in accordance with their roles. Behavioral models of network enterprise processes are also proposed for organizing a business ecosystem, configuring and controlling production chain execution using UML language tools. The model of organization and control of production chain execution uses service level agreements. A specific feature of the constructed production and business process models is their integration reinforcement at various levels of production management, as well as introducing a quality management mechanism through creating and using service level agreements, which improves the quality and reliability of flexible configuration and execution of network enterprise production chains.

Keywords: fourth generation industry, business ecosystem, digital platform, multi-agent system, cyberphysical production system, production management system, asset administrative shell, production and business process model

Acknowledgements. The research was supported by grant № 22-11-00282 from the Russian Science Foundation

References

1. Salazar, L.A.C., Ryashentseva, D., Lüder, A., Vogel-Heuser, B. (2019) 'Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern – comparison of selected approaches mapping four agent patterns', *The Int. J. of Advanced Manufacturing Tech.*, 105, pp. 4005–4034. doi: 10.1007/s00170-019-03800-4.
2. Karnouskos, S., Leitão, P., Ribeiro, L., Colombo, A.W. (2020) 'Industrial agents as a key enabler for realizing industrial cyber-physical systems: Multiagent systems entering Industry 4.0', *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(3), pp. 18–32. doi: 10.1109/MIE.2019.2962225.
3. Gorodetsky, V.I., Bukhvalov, O.L., Skobelev, P.O., Mayorov, I.V. (2017) 'Industrial applications of multi-agent systems: Current state and prospects', *UBS*, (66), pp. 94–157 (in Russ.).
4. Belyaev, A., Diedrich, C. (2019) *Specification "Demonstrator I4.0-Language" v3.0. Project: Industrie 4.0 Communication*, available at: https://www.researchgate.net/publication/334429449_Specification_Demonstrator_I40-Language_v30 (accessed August 20, 2023).
5. Sakurada, L., Leitao, P., De la Prieta, F. (2022) 'Agent-based asset administration shell approach for digitizing industrial assets', *IFAC PapersOnLine*, 55(2), pp. 193–198. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.192.
6. Telnov, Yu.F., Kazakov, V.A., Danilov, A.V., Denisov, A.A. (2022) 'Requirements for the software implementation of the Industrie 4.0 system for creating network enterprises', *Software & Systems*, 35(4), pp. 557–571 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.140.557-571.
7. Li, F., Cabrera, C., Clarke, S. (2019). 'A WS-agreement based SLA ontology for IoT services', in *LNISA. Proc. ICIOT*, 11519, pp. 58–72. doi: 10.1007/978-3-030-23357-0_5.
8. Nouredine, S., Meriem, B. (2021) 'ML-SLA-IoT: An SLA Specification and Monitoring Framework for IoT applications', *Proc. ICISAT*, pp. 1–12. doi: 10.1109/ICISAT54145.2021.9678460.
9. Salazar, L.A.C., Vogel-Heuser, B. (2022) 'A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice', *Automatisierungstechnik*, 70(6), pp. 580–598. doi: 10.1515/auto-2022-0008.
10. Vogel-Heuser, B., Ocker, F., Scheuer, T. (2021) 'An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems', *Automatisierungstechnik*, 69(12), pp. 1026–1039. doi: 10.1515/auto-2021-0081.
11. *Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction*, available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf> (accessed August 20, 2023).
12. Komesker, S., Motsch, W., Popper, J., Sidorenko, A., Wagner, A., Ruskowski, M. (2022) 'Enabling a multi-agent system for resilient production flow in modular production systems', *Procedia CIRP*, 107, pp. 991–998. doi: 10.1016/j.procir.2022.05.097.
13. *Industrie 4.0. Details of the Asset Administration Shell, Pt 1*, available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf (accessed August 20, 2023).

Авторы

Тельнов Юрий Филиппович¹, д.э.н.,
профессор, заведующий кафедрой,
Telnov.YUF@rea.ru

Казakov Василий Александрович¹, к.э.н.,
доцент, Kazakov.VA@rea.ru

Данилов Андрей Владимирович¹,
старший преподаватель, Danilov.AV@rea.ru

Брызгалов Алексей Алексеевич¹, ассистент,
Bryzgalov.AA@rea.ru

Authors

Yury F. Telnov¹, Dr.Sc. (Economics),
Professor, Head of Chair,
Telnov.YUF@rea.ru

Vasily A. Kazakov¹, Cand. of Sci. (Economics),
Associate Professor, Kazakov.VA@rea.ru

Andrey V. Danilov¹, Senior Lecturer,
Danilov.AV@rea.ru

Alexey A. Bryzgalov¹, Assistant,
Bryzgalov.AA@rea.ru

¹ Российский экономический
университет им. Г.В. Плеханова,
г. Москва, 117997, Россия

¹ Plekhanov Russian University
of Economics,
Moscow, 117997, Russian Federation