

DOI: 10.17323/2587-814X.2024.3.70.86

Проектирование многоагентной системы сетевого предприятия

Ю.Ф. Тельнов 

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

В.А. Казаков 

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

А.В. Данилов 

E-mail: Danilov.AV@rea.ru

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

Аннотация

Необходимость повышения эффективности современных сетевых предприятий на основе технологий цифровых платформ, двойников и нитей обуславливает актуальность внедрения в производственную практику динамических многоагентных технологий. Архитектурная сложность существующих многоагентных систем (МАС) и недостаточность научных работ в области обоснования методов и средств их создания обуславливает цель исследования по разработке комплексной технологии проектирования МАС, которая затрагивала бы все уровни архитектуры и позволяла бы адаптировать типовые и наилучшие проектные решения. В статье проведен анализ возможностей применения цифровых двойников и нитей при создании сетевых предприятий и предложены методы их реализации с помощью МАС. Разработана технология проектирования МАС в соответствии с архитектурными фреймворками IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) и RAMI (Reference Architectural Model Industrie 4.0), которая позволяет осуществлять взаимосвязанное формирование и отображение результатов проектирования между различными уровнями архитектуры. На бизнес-уровне предлагается метод формирования бизнес-требований к МАС на основе выбора и адаптации бизнес-моделей и прикладных сценариев. На уровне построения производственных и бизнес-процессов представлен метод формирования функциональных требований к МАС, раскрывающий переход от сети ценностей к структурам производственных и бизнес-процессов. На уровне функционального проектирования многоагентной системы сетевого предприятия представляется метод формирования основных проектных решений с позиции реализации различных категорий сервисов с помощью административных оболочек активов и их специализации. На уровне проектирования технологической реализации МАС предлагается метод реализации программных агентов с помощью микросервисной организации программного обе-

спечения. Представленная методика адаптации типовых и наилучших моделей проектирования многоагентных систем позволяет осуществлять выбор из библиотек типовых моделей и баз знаний прецедентов адекватных проектных решений для последующей доработки, что дает возможность ускорить и повысить качество процесса проектирования. Внедрение разработанной технологии проектирования многоагентных систем позволит повысить адаптивность сетевых предприятий к динамически изменяемым потребностям бизнеса с учетом интересов и возможностей всех заинтересованных сторон.

Ключевые слова: многоагентные системы, цифровые нити, цифровые двойники, сетевое предприятие, административная оболочка активов, онтология проекта, микросервисная архитектура

Цитирование: Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В. Проектирование многоагентной системы сетевого предприятия // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 3. С. 70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.3.70.86

Введение

Для производства инновационных продуктов и услуг под конкретные потребности заказчиков могут создаваться динамически образуемые гибкие сетевые или распределенные в Интернет-среде предприятия, требующие внедрения новых систем управления на основе применения современных цифровых и интеллектуальных технологий. В результате создания таких предприятий должен сократиться жизненный цикл выпускаемой продукции и оказываемых услуг как на стадии выведения на рынок, так и на стадии производства, обеспечивая высокое качество и адаптивность конфигурации продуктов для различных категорий потребителей [1].

Создание сетевых или виртуальных предприятий на основе современных цифровых платформ, с одной стороны, приводит к повышению уровня интеграции и кооперации взаимодействующих в рамках общей сетевой структуры предприятий [2], а с другой стороны, порождает новые задачи формирования механизмов координации участников сетевых предприятий, отбора надежных партнеров, организации совместного владения и определения прав использования данных, нерешенность которых может привести к потере доверия потенциальных участников сетевого предприятия к возможности осуществления совместной деятельности в рамках общей сетевой структуры [3]. Решение задач создания сетевых предприятий в промышленности усложняется вследствие, как правило, большого числа кооперативных связей, высокой ресурсоемкости и больших инвестиционных циклов.

Внедрение технологий промышленного интернета вещей, цифровых двойников и нитей в практику цифровой трансформации предприятий на основе концепции индустрии четвертого поколения создает объективные предпосылки для повышения эффективности управления сетевыми взаимодействиями предприятий, осуществляющих совместную деятельность за счет создания современных цифровых систем [4–7]. При этом в основе цифровых двойников и нитей лежат цифровые модели, которые представляют системы математических и компьютерных моделей, позволяющих отображать информационное состояние, прогнозировать поведение моделируемых объектов в реальном масштабе времени, формировать принимаемые решения.

Одним из действенных подходов к реализации перечисленных технологий является создание цифровых систем управления производственными и бизнес-процессами сетевого предприятия на основе применения многоагентных технологий — многоагентных систем (МАС) сетевого предприятия. В работах [8, 9] разработаны компьютерные модели на основе применения методов агентного и дискретно-событийного моделирования, которые встраиваются в структуру цифровых двойников для оптимизации производственных процессов на различных этапах жизненного цикла. Для повышения эффективности применения компьютерных моделей производственных и бизнес-процессов необходимо обеспечивать их взаимодействие с системами оперативного сбора данных с помощью средств промышленного интернета вещей (IIoT), а также их интеграции с другими интеллектуальными тех-

нологиями, базирующимися на правилах принятия решений, анализе больших объемов данных и машинном обучении [10–13].

Архитектурная сложность МАС обуславливает цель исследования по разработке комплексной технологии проектирования программной реализации, которая затрагивала бы все уровни архитектуры сетевого предприятия в соответствии с архитектурными фреймворками IIRA и RAMI [14, 15] и применение многообразных инструментов поддержки принятия решений в компьютерных моделях агентов. В существующих работах по проектированию многоагентной реализации цифровых систем в основном рассматривается функциональный уровень проектирования [16–19] и практически не рассматривается проектирование МАС на других уровнях архитектуры.

В статье решаются задачи проведения анализа возможностей цифровых двойников и цифровых нитей для создания сетевых предприятий, их реализации с помощью многоагентной системы и разработки технологии проектирования МАС на уровнях формирования бизнес и пользовательских требований, функционального проектирования и реализации с взаимным отображением между уровнями получаемых результатов. Особенностью предлагаемой технологии является увязка этапов проектирования МАС путем последовательного отображения проектных сущностей (категорий) между уровнями архитектуры и адаптации проектных решений на основе библиотек типовых проектных решений и баз знаний наилучших прецедентов использования [20–22].

1. Анализ возможностей применения цифровых двойников и цифровых нитей для создания сетевых предприятий на основе многоагентной технологии

Технология цифровых двойников (ЦД) находит широкое применение в промышленности и позволяет управлять активами предприятия (продуктами, оборудованием, любыми ресурсами) на разных этапах их существования. При этом ЦД не только отражают текущее состояние активов, но и позволяют с помощью набора процедур моделировать, прогнозировать и формировать решения по оптимизации их поведения. С этой точки зрения ЦД представляют собой интегрированную систему данных, моделей и инструментов анализа и формирования решений, применяемых на протяжении

всего жизненного цикла различных активов [8, 23].

В связи с необходимостью отслеживания и управления поведением не только отдельных активов, но и динамических процессов, в которых они участвуют, объективно возникает потребность в реализации более сложных производственных технологий на основе цифровизации, которые нашли отражение в концепции цифровых нитей (ЦН). Концепция ЦН предполагает применение современных инструментов моделирования и управления, которые связывают процессы жизненного цикла взаимосвязанных активов и позволяют повысить технологичность, возможность контроля и устойчивость производственных систем [24]. ЦН в экономическом смысле реализует управление цепочкой создания стоимости. В архитектурном фреймворке RAMI [15] ЦН связывается с взаимодействующими активами: производственными цепочками и цепочками поставок.

Использование ЦД и ЦН обеспечивают гибкость и адаптируемость, необходимые для быстрой разработки и внедрения продукции при одновременном снижении рисков. Так, данные, полученные из существующих или проектируемых производственных систем могут лечь в основу усовершенствованных моделей, которые позволят выполнять прогнозирование как на уровне компонентов, так и на уровне актива в целом. Архивирование цифровых описаний активов позволяет значительно облегчить любое необходимое в будущем перепроектирование производственной системы. Совокупность ЦД и ЦН составляют цифровую систему для конкретной производственной системы или всего сетевого предприятия.

Единая информационная модель ЦД и ЦН может быть представлена с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом, которое позволяет внедрять цифровые технологии в сложные проекты [25]. Такой вариант обеспечивает внедрение ЦД и ЦН не только в проекты цифровизации отдельных предприятий, но и в создание сетевых предприятий за счет интеграции различных программных систем на основе единой цифровой платформы. С помощью технологий ЦД и ЦН обеспечивается передача информации от отдельных звеньев цепочки создания стоимости в производственную систему сетевого предприятия, что позволяет отслеживать соответствие требованиям и влияние полученных результатов на эффективность всего сетевого предприятия [26].

Динамическая природа технологий ЦД и ЦН делает естественным применение многоагентных систем для организации взаимодействия ЦД в рамках ЦН, при этом инструментом реализации ЦД являются программные агенты, а ЦН – МАС в целом. Вопросы реализации производственных систем с помощью технологий многоагентного взаимодействия достаточно хорошо теоретически проработаны [9, 10, 13, 16, 17, 27].

Современное развитие концепций цифровой индустрии четвертого поколения, которое привело к новым архитектурам организации ЦД в виде административных оболочек активов, функционирующих на общих цифровых платформах, предоставляет возможность развития МАС на новой технологической основе, прежде всего с использованием микросервисной реализации механизмов исполнения функций агентов [18, 19, 28].

В перечисленных работах основной упор делается на функциональной реализации МАС для создания цифровых и сетевых предприятий и в меньшей степени посвящены вопросам технологии их проектирования. Вместе с тем, построение многоагентных систем взаимодействия участников сетевого предприятия делает актуальными вопросы создания технологии проектирования МАС, учитывающей уровень сложности создаваемых сетевых предприятий. Ранее разработанные технологии проектирования МАС, например, такие, как ASEME [29], RTMIAS [30], X-Machine [31] и др., носят локальный характер применения, основаны на компонентной технологии объектно-ориентированного проектирования, в некоторых случаях используют онтологии для разработки взаимодействия агентов, но для таких сложных систем, как сетевые предприятия, являются малоприменимыми.

С точки зрения применения концепции индустрии четвертого поколения проектирование МАС сетевого предприятия сводится к проектированию административных оболочек активов (АО), которые соответствуют агентам, реализующим активный и проактивный режим функционирования [21, 28, 32], а также проектированию сценариев их взаимодействия в рамках единых ЦН посредством обмена сообщениями между АО в соответствии с протоколами, установленными FIPA [33]. Отличительной особенностью реализации АО на принципах многоагентной технологии является возможность применения баз знаний для выработки решений и механизмов имитационного моделирования и машинного обучения для анализа и интерпретации событий.

Для реализации программных агентов и их взаимодействия необходимо разработать набор функциональных сервисов АО, а для цифровой платформы, обслуживающей множество взаимодействующих АО, – набор инфраструктурных сервисов, которые обеспечивают создание и регистрацию АО и их пользователей, коммерческую и информационную безопасность использования и ряд других функций.

С учетом сложности процесса создания МАС сетевого предприятия в статье предлагается технология проектирования, которая базируется на последовательном уточнении проектных решений по уровням архитектуры сетевого предприятия в соответствии с фреймворками PIRA и RAMI [14, 15] с использованием методики адаптации типовых и наилучших моделей проектирования.

2. Этапы технологии проектирования МАС сетевого предприятия

Этапы проектирования МАС сетевого предприятия хорошо определяются точками зрения на архитектуру системы в соответствии с фреймворком PIRA [14]:

- ◆ бизнес-моделирование – точка зрения бизнеса (Business Viewpoint);
- ◆ построение производственных и бизнес-процессов – точка зрения использования (Usage Viewpoint);
- ◆ функциональное проектирование МАС – функциональная точка зрения (Functional Viewpoint);
- ◆ проектирование технологии реализации – точка зрения реализации (Implementation Viewpoint).

Перечисленные точки зрения на архитектуру или уровни архитектуры являются взаимосвязанными: каждый последующий уровень архитектуры конкретизирует предыдущий уровень архитектуры на своем специфическом языке и подтверждает возможность реализации сформулированных выше требований. Особенностью предлагаемой технологии проектирования МАС является последовательная декомпозиция и детализация проектных решений и итерационное повторение этапов в случае возникновения необходимости.

Набор используемых в предлагаемой технологии проектирования МАС сущностей цифровой системы на различных уровнях архитектуры PIRA, а также инструментов проектирования представлен в *таблице 1*.

Таблица 1.

**Сущности и инструменты проектирования МАС
на различных уровнях архитектурного фреймворка IIRA**

Сущность	Уровни архитектуры МАС сетевого предприятия			
	Бизнес-уровень	Уровень использования	Функциональный уровень	Уровень реализации
Субъект	Участник, Роль	Роль исполнителя	Интерфейс (Граничный класс)	Клиентское приложение
			Агент субъекта (АО)	Составной микросервис
Объект	Актив	Продукт, Ресурс	Агент объекта (АО)	Составной микросервис
			Класс сущностей	База данных
Функция	Активность/ Деятельность	Процесс	Операция (метод, сервис)	Микросервис
			Класс сущностей	Реестр микросервисов
Инструменты моделирования и проектирования				
Вид модели	Сеть ценности (Санкт-Галлен); Диаграмма прецедентов (UML)	Диаграмма деятельности (UML); BPMN диаграмма; Модель использования (IIRA)	UML диаграммы: последовательности; классов; состояний	UML диаграммы: компонентов; развёртывания

Под участником сети ценности (сетевого предприятия) будем понимать любые предприятия или организации, участвующие в цепочке создания ценности в качестве субъектов.

Под ролью будем понимать специфический сценарий поведения, который выполняет участник сети ценности в производственных или бизнес-процессах. Причем один и тот же участник может играть разные роли в одном и том же процессе, например, предприятие может быть поставщиком оборудования и провайдером сервисов, а предприятие-эксплуатант может быть также оператором частной облачной инфраструктуры. Роли на уровне использования могут быть уточнены до уровня конкретных исполнителей.

На функциональном уровне роль выполняется непосредственно либо актором (организационной единицей), либо программным агентом-субъектом. В первом случае для субъекта должен быть создан интерфейс, реализуемый в виде клиентского приложения, через которое он взаимодействует с МАС. Во втором случае для субъекта создается ЦД, который автоматизирует ряд функций актора, по сути, заменяя его. В этом отношении предлагается на функциональном уровне представлять ЦД субъекта так же, как и ЦД актива, — в виде АО, которая реализуется составным микросервисом в

том смысле, что составной программный компонент включает реестр сервисов, соответствующих отдельным функциям [34].

Под активом сетевого предприятия в соответствии с архитектурным фреймворком RAMI будем понимать любые физические или программные объекты (продукты — изделия, услуги или их компоненты, и ресурсы — отдельные устройства, оборудование, производственные линии, производственные системы) [15], которые представляются АО [33]. АО объектов (продуктов или ресурсов), предлагается реализовывать с помощью микросервисов [35, 36]. В случае если какая-либо часть информации об активах не требует активного управления, то она технологически реализуется в виде локальной для микросервиса пассивной базы данных или общей для нескольких микросервисов базы данных.

Под активностью сетевого предприятия с точки зрения бизнеса будем понимать некоторую функцию, которая производит потоки материальных ценностей, информации и стоимости (затрат). Каждая активность детализируется в виде процесса, выполняемого с помощью МАС, который состоит из отдельных операций. Выявленные операции задаются в качестве элементов структуры АО, которые ссылаются через API-интерфейс на реализацию в виде микросервиса. При этом метаописа-

ние операции как класс сущностей помещается в реестр сервисов [21, 34].

Для моделирования и проектирования MAC используется комбинация различных инструментов. В статье для представления сквозного примера процесса проектирования MAC в качестве комплексного инструмента используется объектно-ориентированный язык моделирования UML.

Рассмотрим этапы технологии проектирования MAC сетевого предприятия, соответствующие точкам зрения PRA, более детально.

Бизнес-моделирование. Точка зрения бизнеса (Business Viewpoint) определяет стратегию создания и функционирования сетевого предприятия. С этой позиции на этапе бизнес-моделирования определяются заинтересованные стороны и их видение функционирования предприятия в условиях применения общих цифровых платформ, а также ценности и цели цифровизации производственных и бизнес-процессов. На этом этапе формируются бизнес-требования к проектируемой многоагентной системе. Важнейшую роль на этом этапе играет построение бизнес-моделей функционирования сетевых предприятий, конкретизируемых в бизнес-сценариях [21, 37]. В качестве нотации описания бизнес-моделей широко используется фреймворк сетей ценности Санкт-Галлена [38]. С позиции многоагентной реализации важнейшее значение приобретает метод определения основных активностей и их акторов, поддерживаемых в дальнейшем программными агентами и их процессами. Основные активности сетей ценности можно отражать с помощью диаграмм вариантов использования UML.

Процесс бизнес-моделирования начинается со SWOT-анализа предлагаемой организации сетевого предприятия, который выявляет достоинства и недостатки цифровизации с позиции использования внутренних ресурсов, а также возможностей и угроз с позиции влияния внешней среды. В результате SWOT анализа определяется видение компании, основные формируемые ценности и строится дерево целей. Для целей формируются наборы мероприятий по их достижению, включающих в том числе создание новой или настройку существующей программно-технической платформы.

Выбор бизнес-моделей и соответствующих прикладных сценариев реализации осуществляется по методике, описанной в [22, 39]. В соответствии с этой методикой в зависимости от типа бизнес-модели (модель применения промышленного интерне-

та, модель предоставления услуг в цепочке создания стоимости, модели доверенного доступа к данным) и типа бизнес-процесса (процессы управления жизненным циклом создания продукции, управления жизненным циклом производственной системы, управления цепочками поставок, управления сервисным обслуживанием активов) выбираются прикладные сценарии реализации сетевого предприятия (Адаптивная фабрика, Сеть создания стоимости «Инновационная разработка продукта», Сеть создания стоимости «Производство, управляемое заказом», Сценарий, основанный на ценности и др.). Выбор прикладного сценария реализации сетевого предприятия осуществляется на основе базы знаний типовых шаблонов сценариев, упорядоченной с помощью онтологии цифровой трансформации, и последующего анализа сетевых эффектов.

Выбранный прикладной сценарий представляется в виде модели сети ценности и адаптируется к условиям функционирования конкретного предприятия. В модели сети ценностей в первую очередь определяется состав участников предприятия и их роли (головное предприятие, субподрядчики, провайдеры функциональных сервисов, операторы платформы, разработчики программного обеспечения, системные интеграторы и др.). Выполнение активностей участниками сетевого предприятия в соответствии с их ролями можно представить в виде диаграммы вариантов использования. Пример диаграммы вариантов использования для прикладного сценария, основанного на ценности [40], представлен на *рисунке 1*.

Построение производственных и бизнес-процессов в соответствии с точкой зрения на использование системы (Usage Viewpoint). На данном этапе определяются функциональные требования к организации производственных и бизнес-процессов в части конкретизации участников сетевых предприятий, их ролей в различных активностях (процессах). При этом активности определяются с позиции условий инициации, рабочего потока задач, получаемых эффектов и ограничений на исполнение процессов, причем для задач назначаются роли исполнителей [37, 40].

Переход от модели сети ценностей к моделям производственных и бизнес-процессов осуществляется в соответствии со следующим методом: каждому потоку ценностей и сопровождающим информационным и финансовым потокам соответствуют производственные или бизнес-процессы, которые

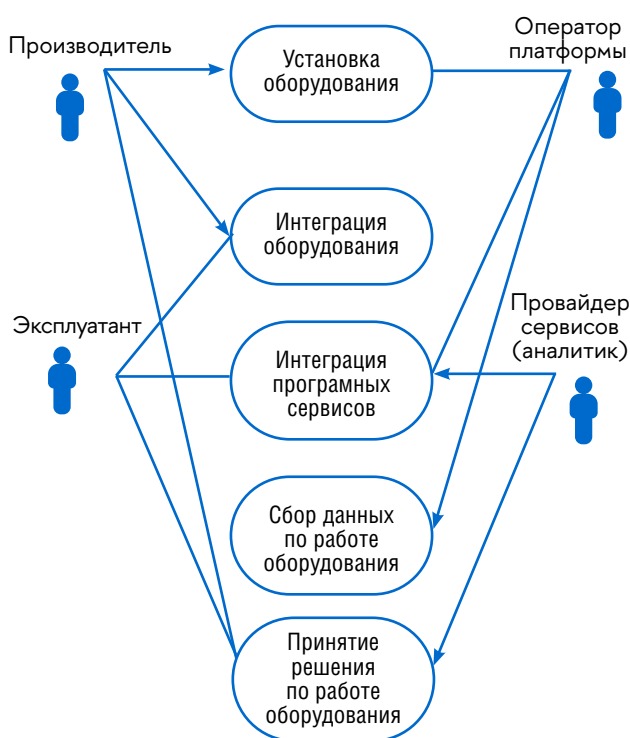


Рис. 1. Пример диаграммы вариантов использования для прикладного сценария, основанного на ценности (VBS).

могут быть промоделированы в виде диаграммы активностей или BPMN диаграммы, отражающей закрепление ролей участников процессов за выполнением конкретных операций (сервисов). В результате построения диаграмм активности формируются функциональные требования к будущему составу программных агентов, реализующих выделенные роли, и составу операций (сервисов) соответствующих АО.

Функциональное проектирование MAC, отражающее функциональную точку зрения на архитектуру системы (Functional Viewpoint). На этом этапе представляется метод формирования основных проектных решений по построению MAC сетевого предприятия с позиции реализации различных категорий сервисов с помощью АО и их специализации: взаимодействия с внешними бизнес-сервисами (ERP, MES, PLM и др.); приложений (Application) – функциональных сервисов цифровых систем; системных сервисов (System Management) – сервисов платформы; сервисов интеграции с активами – физическими устройствами, продуктами (Control); сервисов коммуникации компонентов цифровой системы (табл. 2) [14, 34].

Таблица 2.

Подуровни функционального уровня фреймворка ПРА

Подуровни функционального уровня	Описание
Уровень бизнеса (BUSINESS DOMAIN)	Сервисы по обмену информацией с внешними приложениями различных информационных систем: ERP, CRM, PLM, MES, HRM и др.
Уровень приложений (APPLICATION DOMAIN)	Функциональные сервисы, выполняющие функции по мониторингу, диагностике, прогнозированию, согласованию, оптимизации, обеспечению, управлению производственными и бизнес-процессами
Операционный уровень (SYSTEM MANAGEMENT DOMAIN)	Общие инфраструктурные сервисы управления программной системой (платформой): развертывания, настройки, мониторинга, диагностики и обновления ее компонентов, а также оркестрации по координации работы различных компонентов системы
Информационный уровень (INFORMATION DOMAIN)	Сервисы сбора, очистки, синтаксических и семантических преобразований, накопления и выдачи данных для функциональных компонентов. Вспомогательные сервисы управления данными: обеспечения безопасности данных, контроля доступа к данным и управления правами на данные, резервного копирования и восстановления и др. Сервисы, реализующие универсальные методы анализа данных, в т.ч. методы анализа больших данных, машинного обучения, имитационного моделирования, извлечений знаний
Уровень коммуникаций	Рассматривается между сервисами (компонентами) на всех подуровнях
Уровень управления (CONTROL DOMAIN)	Сервисы взаимодействие программных компонентов с физическими устройствами (активами): сбор данных с помощью датчиков от физических устройств, мониторинг работы и исполнение управляющих команд на физических устройствах.
Физические системы	Физические устройства: части оборудования, оборудование, производственные линии, производственные системы (фабрики), сетевые предприятия (Connection World) Программные средства: библиотеки программных средств, базы знаний, онтологии, репозитории

С функциональной точки зрения в соответствии с концепцией платформы индустрии четвертого поколения каждый компонент сетевого предприятия представляет актив и его АО [41, 42]. Структура АО включает набор свойств (property), операций (operation) и событий (event), которые могут быть также разнесены по подмоделям (submodel) [42]. При этом информационная часть (пассивная) АО в виде набора свойств позволяет отражать динамическую информационную модель актива, а операционная (активная) часть – осуществлять взаимодействие с активами, другими АО и внешними приложениями, исполнять функциональные сервисы. В соответствии с видами активов программные агенты, которые представляются АО, разделяются на агентов продуктов и агентов ресурсов (оборудования) [43]. Цифровая платформа может быть представлена АО с набором системных сервисов, актором для которой является оператор (администратор) платформы. ЦД субъектов управления производственной системой также представляются агентами – АО.

АО как программные агенты хорошо представляются классами в объектно-ориентированной парадигме. Взаимодействие программных агентов в процессе выполнения отдельных активностей с добавлением необходимых интерфейсных классов (Boundary) и классов-сущностей, связанных с базой

данных (Entity), отображается в виде диаграммы последовательностей (Sequence Diagram). На *рисунке 2* представлен фрагмент диаграммы последовательностей, отражающей процесс формирования рекомендаций по работе оборудования в соответствии с прикладным сценарием, основанным на ценности.

В данном случае в роли агента субъекта выступает агент аналитика, а в роли агента объекта – агент оборудования и как конечный продукт для производителя оборудования, и как ресурс – для предприятия-эксплуатанта. Запуск процесса осуществляется через граничный класс – клиентское приложение «Анализ данных» (Boundary), а запись полученной рекомендации в локальную базу данных через класс сущностей «Рекомендации» (Entity).

На сформированной диаграмме классов АО «Агент аналитика» реализует функции программного агента уровня функционального домена (Functional Domain). Сервис (операция) «Выполнить прогноз» с помощью одного из методов машинного обучения, например, нейронной сети, выполняет прогнозирование неисправностей, а сервис «Сформировать рекомендацию» с помощью набора правил и/или имитационной модели на основе методов агентного и дискретно-событийного моделирования, реализованной, например, в системе AnyLogic [9].

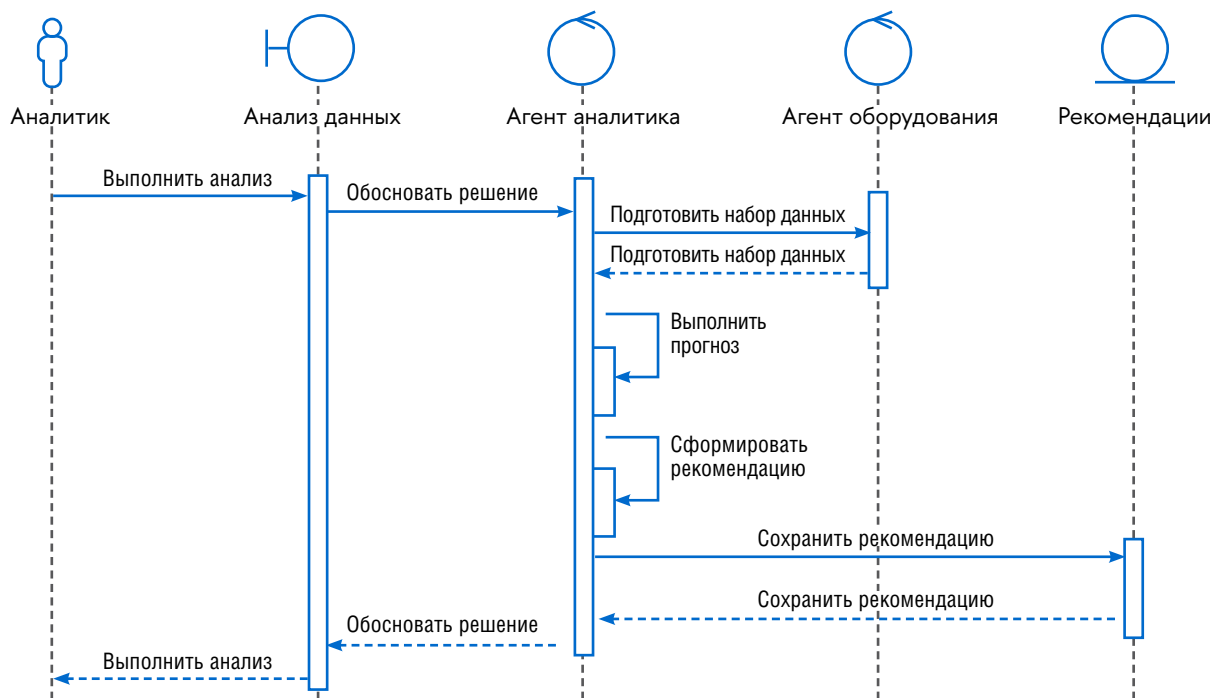


Рис. 2. Фрагмент диаграммы последовательностей для процесса формирования рекомендаций по работе оборудования.

АО «Агент оборудования» является программным агентом, который собирает данные в исторический набор данных для прогнозирования состояния и обновляет состояние актива. В этом смысле АО выполняет функции уровня управления (Control Domain). Информационные сервисы по преобразованиям форматов данных, проверке безопасности доступа и др., связанные с выполнением сервисов «Анализ данных» и «Сохранить рекомендации», вызываются внутри этих сервисов. Аналогично сервис коммуникации АО «Агент аналитика» и АО «Агент оборудования» вызывается внутри сервиса «Подготовить набор данных».

Проектирование технологической реализации (Implementation Viewpoint). Точка зрения на реализацию цифровой системы отражает физическое построение системы из создаваемых компонентов. Учитывая автономность основных компонентов — программных агентов, их распределенность в вычислительной сети, необходимость независимого обращения к инфраструктурным сервисам общей цифровой платформы, наличие локальных баз дан-

ных в составе компонентов, предлагается реализовывать МАС на основе технологии микросервисов в облачной среде контейнеризации. При этом могут использоваться архитектурные шаблоны, которые являются примерами и справочными материалами для концептуализации реальных архитектур IoT.

Применение микросервисов предлагается осуществлять на двух уровнях: на уровне АО в виде составных микросервисов и на уровне микросервисной реализации операций (сервисов, методов) АО. Во втором случае операция в информационной части АО связана через API интерфейс с микросервисом, который хранится в выделенной библиотеке АО, организованной с помощью реестра сервисов (Registry) [34].

Интеграция и развертывание микросервисов осуществляется на технологической платформе управления контейнерными микросервисами. Пример диаграммы развертывания всего программного обеспечения цифровой многоагентной системы для процесса формирования рекомендаций по работе оборудования представлен на *рисунке 3*.

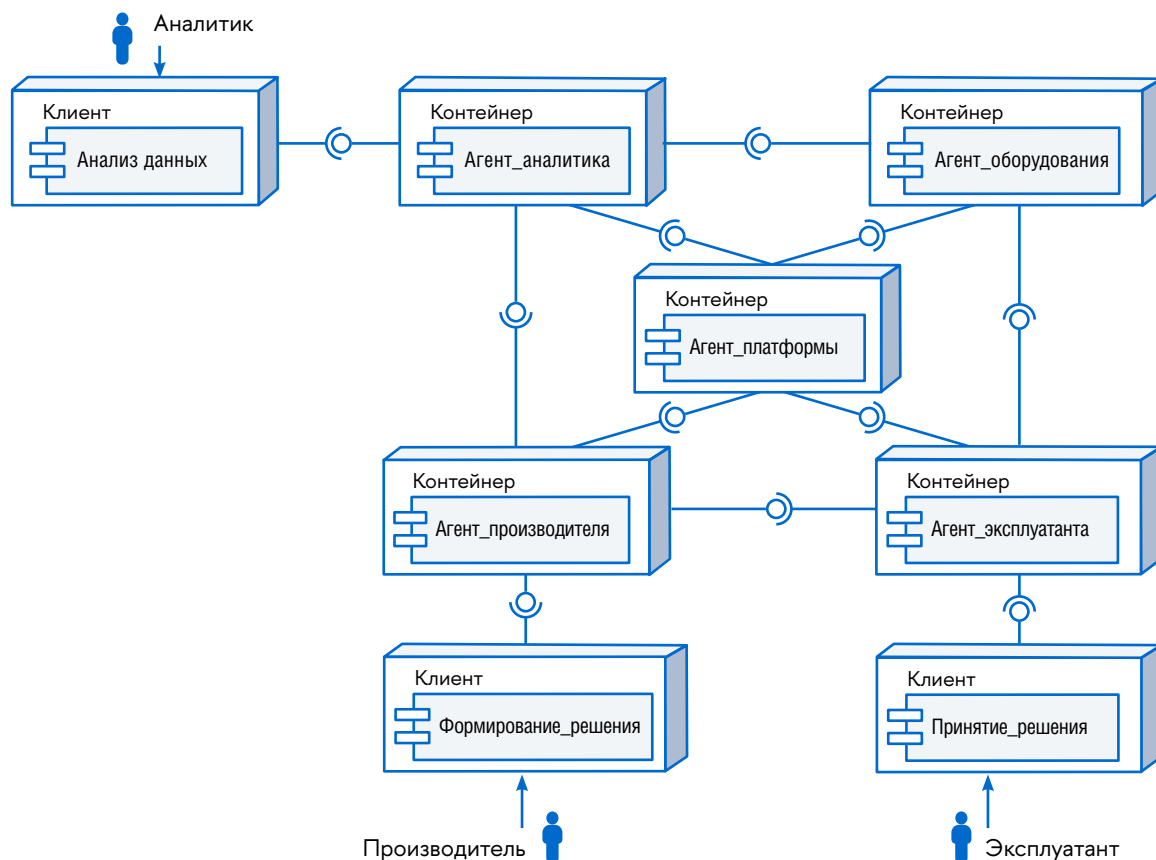


Рис. 3. Диаграмма развертывания МАС.

В качестве архитектурного шаблона реализации сетевого предприятия в концепции Промышленного Интернета (IIIA) предлагается использовать шаблон ЦД в качестве промежуточного программного слоя (между приложением и физическим миром) [14]. В этом шаблоне подразумевается построение промышленных приложений на основе ЦД, которые в свою очередь реализуются на основе типовых сервисов платформы IIoT.

3. Методика адаптации моделей проектирования многоагентной системы сетевого предприятия

В основе технологии проектирования МАС предлагается использовать методику адаптации моделей (шаблонов) проектирования. Для этого организуются базы знаний (библиотеки) моделей проектирования, которые систематизируются в соответствии с набором словарей (онтологий).

В Государственном стандарте «Структура цифровой фабрики» [20] шаблоны проектирования задаются в библиотеках классов активов цифровой фабрики, а также определяется набор словарей, в соответствии с которыми строятся классы активов. В материалах проекта «Платформа Индустрия 4.0» [21] модели (шаблоны) проектирования представляются в библиотеке функциональных блоков. В работе [22] было предложено использовать не только типовые модели прикладных сценариев из базы знаний, но также накапливать модели прецедентов, относящихся к выполненным проектам, и использовать иерархию онтологий для организации доступа к этим моделям.

В данной работе подход к использованию шаблонов проектирования МАС развивается с точки зрения их применения на всех этапах технологии проектирования. Методика адаптации моделей проектирования многоагентной системы сводится к выборке из библиотек типовых моделей и баз знаний прецедентов адекватных моделей и их последующей доработке (рис. 4).

Для отражения текущего состояния проекта создания МАС организуется репозиторий проекта, который фиксирует состояние проекта после каждого этапа. При этом также осуществляется уточнение и развитие онтологии проекта.

Организация проекта на стадии инициирования начинается с определения онтологии сетевого предприятия и выбора соответствующих словарей из набора онтологий, которые могут быть реализованы

различными органами стандартизации, консорциумами и исследовательскими проектами, и включающими онтологии верхнего уровня, проблемные онтологии и онтологии предметной области. Выбранные онтологии формируют прототип онтологии проекта (сетевого предприятия). Кроме того, по мере реализации проекта к существующей онтологии через ссылки подключаются и онтологии внешних участников сетевого предприятия. Необходимым условием их объединения является выравнивание внешних онтологий с онтологией проекта (сетевого предприятия).

Развитие репозитория и метаданных онтологии в последующем предполагает версионирование не только данных (реализуется «снимок» параметров моделей системы по состоянию на некоторый момент времени), но и онтологии сетевого предприятия. Такой вариант позволяет использовать все накопленные в исторической перспективе данные для развития проекта по созданию и функционированию сетевого предприятия. Механизмы, реализующие версионирование, выравнивание и развитие онтологий, их связывание друг с другом, должны быть реализованы как самостоятельные сервисы в рамках платформы, поддерживающей функционирование многоагентной системы.

Каждый последующий этап проектирования многоагентной системы формирует на выходе набор входных параметров для формирования следующего этапа, в рамках которого эти входные параметры служат основой для отбора новых моделей из библиотеки типовых моделей. По уровням типизации моделей, которые хранятся в библиотеке типовых моделей (шаблонов проектирования), модели могут быть как достаточно абстрактными, высокоуровневыми, так и специфичными для конкретной предметной области.

Отличительной особенностью предлагаемой методики адаптации моделей проектирования МАС сетевого предприятия является применение наряду с библиотекой типовых моделей (шаблонов проектирования) также и базы знаний, направленной на сохранение сформированных и апробированных структур и описаний реальных бизнес-моделей, бизнес-сценариев, производственных и бизнес-процессов, программных агентов (АО), наборов сервисов (моделей прецедентов).

Модели прецедентов представляются как описание кейсов, которые хранятся в системе с привязкой к описанию начальных условий (требований), а также результатов работы сетевого предприятия, каче-

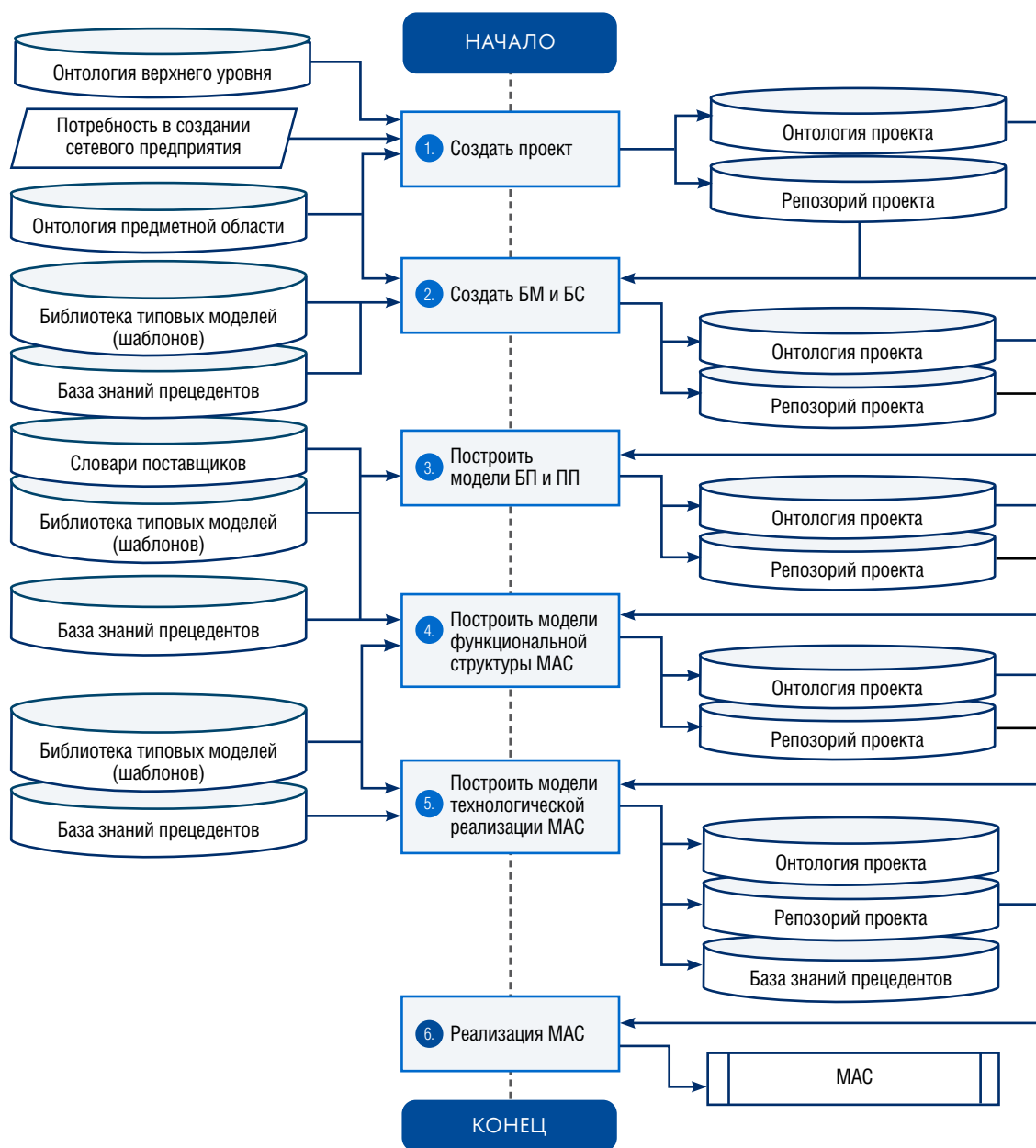


Рис. 4. Методика адаптации шаблонов проектирования MAC.

ственных характеристик выпущенных изделий (продуктов) и полученного экономического эффекта. Таким образом при поиске подходящих моделей отбираются не только типовые модели (шаблоны проектирования определенного типа), но и адаптированные, реальные модели с учётом степени близости (максимального значения подобия S) соответствующих характеристик моделей $M_i \in M$ и имеющихся входных и требуемых выходных параметров, определяющих проблемную ситуацию C^{Bx} [44]:

$$S(C^{Bx}, M) = \max_i \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot \text{sim}(f_j^{Bx}, f_{ij}^M)}{\sum_{j=1}^n w_j} \right), \text{ где}$$

$i = \overline{1, N}$, где N – общее число моделей, имеющихся в библиотеке и базе знаний прецедентов;

$j = \overline{1, CR}$, где CR – постоянное число сравниваемых элементов описания (свойств, отношений);

f_{ij}^M – j -е свойство (отношение), описывающее i -ю модель;

f_j^{Bx} – j -е свойство (отношение), описывающее набор требуемых входных или выходных параметров;
 w_j – вес j -го свойства (отношения);
sim – функция определения подобия f_j^{Bx}, f_{ij}^M .

После завершения процесса проектирования многоагентной системы результаты проектирования, отраженные в репозитории, используются для выполнения следующих этапов создания МАС: программной реализации, тестирования и внедрения. Результат процесса проектирования также заносится в базу знаний прецедентов для последующего использования в других проектах.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что применение МАС в полной мере обеспечивает создание эффективных сетевых предприятий на основе реализации принципов индустрии четвертого поколения и использования технологий ЦД и ЦН, обеспечивающих сбор информации, моделирование и планирование поведения активов, организацию и контроль исполнения производственных и бизнес-процессов.

Предлагаемые методы и технология проектирования МАС в соответствии с архитектурными фреймворками IIRA и RAMI обеспечивают на бизнес-уровне и уровне использования построение основных прикладных сценариев применения МАС и ролей акторов-агентов, формирование структур производственных и бизнес-процессов; на функциональном уровне – построение набор функциональных компонентов в виде АО и моделей их взаимодействия в общем информационном пространстве; на технологическом уровне реализации – адаптацию шаблонов микросервисной реализации к конкретным условиям построения сетевого предприятия.

Отличительной особенностью разработанной технологии проектирования является взаимосвя-

занное представление всех используемых категорий (сущностей) на различных уровнях архитектуры, что позволяет осуществлять согласованный переход между этапами проектирования МАС.

Комплексный характер предлагаемой технологии проектирования МАС взаимодействия участников сетевого предприятия обуславливает организацию эффективного участия всех заинтересованных сторон в создании сетевого предприятия, ориентированного на реализацию бизнес-стратегии с учетом адаптации типовых и наилучших моделей прикладных сценариев, функциональных компонентов и микросервисных структур с использованием библиотек шаблонов, баз знаний и онтологий. Последовательное отображение результатов проектирования между различными уровнями архитектуры в репозитории проекта позволяет в полной мере реализовывать функциональные и нефункциональные требования с учетом имеющихся информационно-вычислительных ресурсов.

Предложенная методика адаптации моделей проектирования многоагентной системы сетевого предприятия развивает подход к адаптации шаблонов МАС из библиотек типовых проектных решений и баз знаний наилучших прецедентов использования на всех этапах технологии проектирования.

Применение представленной в статье технологии проектирования МАС сетевого предприятия будет способствовать повышению уровня качества и надежности функционирования сетевого предприятия, адаптивности к динамически изменяемым потребностям бизнеса и возможностям всех заинтересованных сторон. ■

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00282¹).

Литература

1. Matthyssens P. Reconceptualizing value innovation for Industry 4.0 and the Industrial Internet of Things // Journal of Business & Industrial Marketing. 2019. Vol. 34. No. 6. P. 1203–1209. <https://doi.org/10.1108/JBIM-11-2018-0348>
2. Феофанов А.Н., Бондарчук Е.Ю., Тясто С.А. Организация виртуального предприятия – будущее производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 3 (46). С. 101–105.
3. Müller J.M. Antecedents to digital platform usage in Industry 4.0 by established manufacturers // Sustainability. 2019. Vol. 11. No. 4. Article 1121. <https://doi.org/10.3390/su11041121>

¹ <https://rscf.ru/project/22-11-00282/>

4. Головин С.А., Лоцманов А.Н., Позднеев Б.М. Программа «Промышленность РФ 4.0» – шанс не отстать навсегда в области промышленного производства // Мир информационных технологий. 2021. № 1–2. С. 38–40.
5. Боровков А.И., Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2020.
6. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Дата введения 2022-01-01.
7. Digital thread for smart manufacturing // National Institute of Standards and Technology, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-smart-manufacturing> (дата обращения 01.08.2024).
8. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 4. С. 7–16. <http://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.4.7.16>
9. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. <http://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
10. Городецкий В.И. Поведенческие модели киберфизических систем и групповое управление. Основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 144–162.
11. Corsini R.R., Costa A., Fichera S., Framinan J.M. Digital twin model with machine learning and optimization for resilient production–distribution systems under disruptions // Computers & Industrial Engineering. 2024. Vol. 191. Article 110145. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110145>
12. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 1. С. 45–55. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55>
13. Skobelev P., Mayorov I., Simonova E., Goryanin O., Zhilyaev A., Tabachinskiy A., Yalovenko V. Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1703. P. 12–22. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012022>
14. The industrial internet reference architecture // Industry IoT Consortium, 2022. [Электронный ресурс]: <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf> (дата обращения 01.08.2024).
15. Plattform Industrie 4.0. Reference architectural model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An introduction // Plattform Industrie 4.0, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> (дата обращения 01.08.2024).
16. Seitz M., Gehlhoff F., Cruz Salazar L.A., Fay A., Vogel-Heuser B. Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0 // Journal of Intelligent Manufacturing. 2021. Vol. 32. P. 2023–2041. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01759-2>
17. Karnouskos S., Leitao 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. P. 18–32. <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2962225>
18. Vogel-Heuser B., Ocker F., Scheuer T. An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems // at – Automatisierungstechnik. 2021. Vol. 69. No. 12. P. 1026–1039. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0081>
19. 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.
20. ГОСТ Р 70265.1–2022. Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения. Дата введения 30.11.2022.
21. Discussion Paper: Usage View of the Asset Administration Shell // Plattform Industrie 4.0, 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.html> (дата обращения 01.08.2024).
22. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Брызгалов А.А., Федоров И.Г. Методы и модели обоснования прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 73–93. <http://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.4.73.93>
23. Segovia M., Garcia-Alfaro J. Design, modeling and implementation of digital twins // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 14. Article 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>
24. Bajaj M., Hedberg T. System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing // INCOSE International Symposium. 2018. Vol. 28. No. 1. P. 1636–1650. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x>
25. Deep-Lynx // Idaho National Laboratory. [Электронный ресурс]: <https://github.com/idaholab/Deep-Lynx> (дата обращения 01.08.2024).
26. Bonham E., McMaster K., Thomson E., Panarotto M., Müller J.R., Isaksson O., Johansson E. Designing and integrating a digital thread system for customized additive manufacturing in multi-partner kayak production // Systems. 2020. Vol. 8. No. 4. Article 43. <https://doi.org/10.3390/systems8040043>
27. Tarassov V.B. Enterprise total agentification as a way to Industry 4.0: Forming artificial societies via goal-resource networks // Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’19). Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC). 2019. Vol. 1156. P. 26–40.
28. 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. P. 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.192>

29. Spanoudakis N.I., Moraitis P. The agent systems methodology (ASEME): A preliminary report // Computer Science. 2007.
30. Julian V., Botti V. Developing real-time multi-agent system // Integrated Computer-Aided Engineering. 2004. Vol. 11. No. 2. P. 135–149. <https://doi.org/10.3233/ICA-2004-11204>
31. Eleftherakis G., Kefalas P., Kehris E. A methodology for developing component-based agent systems focusing on component quality // Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2011), Szczecin, Poland, 18-21 September 2011. P. 561–568.
32. Digital twin and asset administration shell concepts and application in the industrial internet and Industrie 4.0 // Plattform Industrie 4.0, 2020. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts.pdf> (дата обращения 01.08.2024).
33. FIPA ACL message structure specification // Foundation for Intelligent Physical Agents, 2002. [Электронный ресурс]: <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/SC00061G.pdf> (дата обращения 01.08.2024).
34. Functional view of the asset administration shell in an Industrie 4.0 system environment // Plattform Industrie 4.0, 2021. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional-View.html> (дата обращения 01.08.2024).
35. Lewis J., Fowler M. Microservices. A definition of this new architectural term. 2014. [Электронный ресурс]: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (дата обращения 01.08.2024).
36. Ричардсон К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга: Пер. с англ. СПб.: Питер, 2019.
37. Exemplification of the Industrie 4.0 application scenario value-based service following IIRA structure // Plattform Industrie 4.0, 2017. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/exemplification-i40-value-based-service.pdf> (дата обращения 01.08.2024).
38. Gassmann O., Csik M., Frankenberg K. The business model navigator: 55 models that will revolutionise your business. FT Press, 2014.
39. Тельнов Ю.Ф., Брызгалов А.А., Козырев П.А., Королева Д.С. Выбор типа бизнес-модели для реализации стратегии цифровой трансформации сетевого предприятия // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. № 4. С. 50–67. <http://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.50.67>
40. Usage viewpoint of application scenario value-based service // Plattform Industrie 4.0, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-usage-viewpoint.html> (дата обращения 01.08.2024).
41. ГОСТ Р 59799–2021. Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0). Дата введения 30.04.2022.
42. Details of the asset administration shell – Part 1. The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 // Plattform Industrie 4.0, 2022. [Электронный ресурс]: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html (дата обращения 01.08.2024).
43. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.А., 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.
44. Kolodner J. Case-based reasoning. Morgan Kaufmann, 1993.

Об авторах

Тельнов Юрий Филиппович

д.э.н., проф.;

заведующий кафедрой прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

Казаков Василий Александрович

к.э.н.;

доцент, кафедра прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

ORCID: 0000-0001-8939-2087

Данилов Андрей Владимирович

старший преподаватель, кафедра прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Danilov.AV@rea.ru

ORCID: 0000-0002-0433-9701

Designing a multi-agent system for a network enterprise

Yury F. Telnov

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

Vasiliy A. Kazakov

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

Andrey V. Danilov

E-mail: Danilov.AV@rea.ru

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

Abstract

The necessity to enhance the efficiency of modern network enterprises based on digital platform technologies, Digital Twins, and Digital Threads determines the relevance of implementing dynamic multi-agent technologies in production practice. The architectural complexity of existing multi-agent systems (MAS) and the lack of scientific research in the field of justifying methods and tools for their creation motivate the goal of this study to develop a comprehensive MAS design technology. This technology should encompass all architectural levels and allow for the adaptation of reference and best design practices. This article analyzes the possibilities of applying Digital Twins and Digital Threads in the creation of network enterprises and proposes methods for their implementation using MAS. A design technology for MAS has been developed in accordance with the IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) and RAMI (Reference Architectural Model Industrie 4.0) architectural frameworks, which enables the interconnected formation and display of design results across various architectural levels. At the business level, a method is proposed for formulating business requirements for MAS based on the selection and adaptation of business models and application scenarios. At the level of constructing manufacturing and business processes, a method for formulating functional requirements for MAS is presented, revealing the transition from value networks to manufacturing and business process structures. At the level of functional design of the network enterprise's multi-agent system, a method is proposed for forming key design solutions from the perspective of implementing various service categories using AAS (Asset Administrative Shells) and their specialization. At the technological implementation design level of MAS, a method for implementing software agents using a microservice software organization is proposed. The method presented for adapting reference and best MAS design models allows for the selection of appropriate design solutions from libraries of reference models and knowledge bases for subsequent refinement. This accelerates and improves the quality of the design process. The implementation of the developed technology for designing multi-agent systems will increase the adaptability of network enterprises to dynamically changing business needs, taking into account the interests and capabilities of all stakeholders.

Keywords: multi-agent systems, digital threads, digital twins, network enterprise, asset administrative shell, project ontology, microservice architecture

Citation: Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V. (2024) Designing a multi-agent system for a network enterprise. *Business Informatics*, vol. 18, no. 3, pp.70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.3.70.86

References

1. Matthyssens P. (2019) Reconceptualizing value innovation for Industry 4.0 and the Industrial Internet of Things. *Journal of Business & Industrial Marketing*, vol. 34, no. 6, pp. 1203–1209. <https://doi.org/10.1108/JBIM-11-2018-0348>
2. Feofanov A.N. Bondarchuk E.Yu., Tyasto S.A. (2018) Organization of a virtual enterprise – the future of production. *Bulletin of MSTU "Stankin"*, no. 3 (46), pp. 101–105 (in Russian).

3. Müller J.M. (2019) Antecedents to digital platform usage in Industry 4.0 by established manufacturers. *Sustainability*, vol. 11, no. 4, article 1121. <https://doi.org/10.3390/su11041121>
4. Golovin S.A., Lotsmanov A.N., Pozdneev B.M. (2021) The Russian Federation Industry 4.0 program is a chance not to fall behind forever in the field of industrial production. *World of Information Technologies*, no. 1–2, pp. 38–40 (in Russian).
5. Borovkov A.I., Prokhorov A., Lysachev M. (2020) *Digital twin. Analysis, trends, world experience*. Moscow: Alliance Print (in Russian).
6. Rosstandart (2021) *National Standard of the Russian Federation GOST R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions* (in Russian).
7. National Institute of Standards and Technology (2018) *Digital thread for smart manufacturing*. Available at: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-smart-manufacturing> (accessed 1 August 2024).
8. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. (2019) Developing digital twins for production enterprises. *Business Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 7–16. <http://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.4.7.16>
9. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2021) Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. *Business Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 7–20. <http://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
10. Gorodetsky V.I. (2019) Behavioral models of cyberphysical systems and group management. Basic concepts. *News of the Southern Federal University. Technical Sciences*, no. 1 (203), pp. 144–162.
11. Corsini R.R., Costa A., Fichera S., Framinan J.M. (2024) Digital twin model with machine learning and optimization for resilient production–distribution systems under disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 191, article 110145.
12. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuzmishina A.M. (2019) Development of digital twin of CNC unit based on machine learning methods. *Vestnik of Don State Technical University*, vol. 19, no. 1, pp. 45–55 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55>
13. Skobelev P., Mayorov I., Simonova E., Goryanin O., Zhilyaev A., Tabachinskiy A., Yalovenko V. (2020) Development of models and methods for creating a digital twin of plants within the cyber–physical system for precision farming management. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1703, pp. 12–22. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012022>
14. Industry IoT Consortium (2022) *The industrial internet reference architecture*. Available at: <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf> (accessed 1 August 2024).
15. Plattform Industrie 4.0 (2018) *Plattform Industrie 4.0. Reference architectural model Industry 4.0 (RAMI4.0) – An introduction*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> (accessed 1 August 2024).
16. Seitz M., Gehlhoff F., Cruz Salazar L.A., Fay A., Vogel-Heuser B. (2021) Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 32, pp. 2023–2041.
17. Karnouskos S., Leitao 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*, vol. 14, no. 3, pp. 18–32. <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2962225>
18. Vogel-Heuser B., Ocker F., Scheuer T. (2021) An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems. *at – Automatisierungstechnik*, vol. 69, no. 12, pp. 1026–1039. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0081>
19. 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*, vol. 35, no. 4, pp. 557–571 (in Russian).
20. Rosstandart (2022) *National Standard of the Russian Federation GOST R 70265.1–2022. Industrial-process measurement, control and automation. Digital factory framework. Part 1. Basic provisions* (in Russian).
21. Plattform Industrie 4.0 (2019) *Discussion Paper: Usage View of the Asset Administration Shell*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.html> (accessed 1 August 2024).
22. Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Bryzgalov A.A., Fiodorov I.G. (2023) Methods and models for substantiating application scenarios for the digitalization of manufacturing and business processes of network enterprises. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 73–93. <http://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.4.73.93>
23. Segovia M., Garcia-Alfaro J. (2022) Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, vol. 22, no. 14, article 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>
24. Bajaj M., Hedberg T. (2018) System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing. *INCOSE International Symposium*, vol. 28, no. 1, pp. 1636–1650. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x>
25. Idaho National Laboratory (2020) *Deep-Lynx*. Available at: <https://github.com/idaholab/Deep-Lynx> (accessed 1 August 2024).
26. Bonham E., McMaster K., Thomson E., Panarotto M., Müller J.R., Isaksson O., Johansson E. (2020) Designing and integrating a digital thread system for customized additive manufacturing in multi-partner kayak production. *Systems*, vol. 8, no. 4, article 43. <https://doi.org/10.3390/systems8040043>
27. Tarassov V.B. (2019) Enterprise total agentification as a way to Industry 4.0: Forming artificial societies via goal–resource networks. Proceedings of the *Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI 19). Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*, vol. 1156, pp. 26–40.
28. Sakurada L., Leitao P., de la Prieta F. (2022) Agent-based asset administration shell approach for digitizing industrial assets. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 2, pp. 193–198.

29. Spanoudakis N.I., Moraitis P. (2007) The agent systems methodology (ASEME): A preliminary report. *Computer Science*.
30. Julian V., Botti V. (2004) Developing real-time multi-agent system. *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 135–149. <https://doi.org/10.3233/ICA-2004-11204>
31. Eleftherakis G., Kefalas P., Kehris E. (2011) A methodology for developing component-based agent focusing systems on component quality. Proceedings of the *Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2011)*, Szczecin, Poland, 18–21 September 2011, pp. 561–568.
32. Plattform Industrie 4.0 (2020) *Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts.pdf> (accessed 1 August 2024).
33. Foundation for Intelligent Physical Agents (2002) *FIPA ACL message structure specification*. Available at: <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/SC00061G.pdf> (accessed 1 August 2024).
34. Plattform Industrie 4.0 (2021) *Functional view of the asset administration shell in an Industrie 4.0 system environment*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional-View.html> (accessed 1 August 2024).
35. Lewis J., Fowler M. (2014) *Microservices. A definition of this new architectural term*. Available at: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (accessed 1 August 2024).
36. Richardson C. (2018) *Microservices Patterns: With examples in Java*. Manning Publications.
37. Plattform Industrie 4.0 (2017) *Exemplification of the Industrie 4.0 application scenario value-based service following IIRA structure*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/exemplification-i40-value-based-service.pdf> (accessed 1 August 2024).
38. Gassmann O., Csik M., Frankenberg K. (2014) *The business model navigator: 55 models that will revolutionise your business*. FT Press.
39. Telnov Yu.F., Bryzgalov A.A., Kozyrev P.A., Koroleva D.S. (2022) Choosing the type of business model to implement the digital transformation strategy of a network enterprise. *Business Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 50–67. <http://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.50.67>
40. Plattform Industrie 4.0 (2018) *Usage viewpoint of application scenario value-based service*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-usage-viewpoint.html> (accessed 1 August 2024).
41. Rosstandart (2021) *National Standard of the Russian Federation GOST R 59799–2021. Smart manufacturing. Reference architecture model industry 4.0 (RAMI 4.0)* (in Russian).
42. Plattform Industrie 4.0 (2022) *Details of the asset administration shell – Part 1. The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0*. Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html (accessed 1 August 2024).
43. 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*, vol. 36, no. 4, pp. 632–643.
44. Kolodner J. (1993) *Case-based reasoning*. Morgan Kaufmann.

About the authors

Yury F. Telnov

Dr. Sci. (Econ.), Prof.;

Head of the Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

Vasily A. Kazakov

Cand. Sci. (Econ.);

Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

ORCID: 0000-0001-8939-2087

Andrey V. Danilov

Senior Lecturer, Department of Applied Information Technologies and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Danilov.AV@rea.ru

ORCID: 0000-0002-0433-9701