CC BY 4.0

УДК 37.032
DOI: http://dx.doi.org/10.21686/1818-4243-2025-2-34-45

В.А. Казаков, Ю.Ф. Тельнов
Российский экономический университет им. Г.В.Плеханова, Москва, Россия

Многоагентная система сетевого предприятия на основе цифровой платформы индустрии четвертого поколения*

Целью исследования *является разработка методов реализации многоагентной системы сетевого предприятия в рамках микросервисной архитектуры цифровой платформы. В этой связи предлагаются методы реализации агентов с помощью сервисов, автоматизирующих функции производственных и бизнес-процессов, и сервисов, исполняющих функции цифровой платформы. В основе построения программных агентов положена структура административных оболочек активов, используемых в активном и проактивном режимах.*
Материалы и методы исследования. *В качестве метода исследования предлагается использовать усовершенствованный метод функционального проектирования на основе архитектурных фреймворков консорциума промышленного интернета (IIRA) и платформы индустрии четвертого поколения (RAMI), российских государственных стандартов («Цифровые двойники», «Цифровая фабрика», «Умное производство»), а также метода анализа возможностей предприятия.*
Результаты. *Основными результатами исследования являются построение схемы компонентного состава концептуальной модели цифровой платформы, алгоритмы формирования запроса на производство компонентов продукта и его оценки программными агентами цифровой платформы в форме диаграмм последовательности,*
Заключение. *Полученные результаты позволяют повысить интероперабельность и гибкость конфигурации цепочек создания стоимости на основе сервисной реализации многоагентной системы.*

Ключевые слова: *сетевое предприятие, многоагентная система, микросервисная архитектура, цифровая платформа, административная оболочка актива, сервисы административных оболочек активов, инфраструктурные сервисы платформы*

Vasily A. Kazakov, Yuriy F. Telnov
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

Multi-agent system of a network enterprise based on the Industrie 4.0 digital platform

The purpose of the study *is to develop methods for implementing a multi-agent system of a network enterprise within the framework of a microservice architecture of the Industrie 4.0 digital platform. In this regard, methods for implementing agents using services that automate the functions of manufacturing and business processes, and services that perform the functions of a digital platform are proposed. The development of software agents is based on the structure of Asset administrative shells used in active and proactive modes.*
Materials and methods. *As a research method, it is proposed to use an improved method of functional design based on the architectural frameworks of the Industrial Internet Consortium (IIRA) and the Platform Industrie 4.0 (RAMI), Russian state standards ("Digital twins", "Digital factory", "Smart production"), as well as a method for analyzing enterprise capabilities.*
The results of the study. *The main results of the article are the construction of the component composition diagram of the digital platform conceptual model, algorithms for generating a request to produce product components and its assessment by software agents of the digital platform in the form of UML sequence diagrams.*
Conclusion. *The results of the article allow to increase interoperability and flexibility in the configuration of value chains based on the service implementation of a multi-agent system.*

Keywords: *network enterprise, multi-agent system, microservice architecture, digital platform, asset administrative shell, asset administrative shell services, platform infrastructure services.*

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00282 https://rscf.ru/project/22-11-00282/

Введение

Высокая динамичность сетевых предприятий во многом определяет выбор многоагентных технологий, которые находят применение в автоматизации управления производственными и бизнес-процессами. Вместе с тем архитектурная сложность многоагентных систем (МАС), отмеченная в работах [1, 2], вызывают необходимость поиска новых средств их реализации, прежде всего на основе соединения преимуществ многоагентной технологии и построения цифровых платформ, обеспечивающих функционирование административных оболочек активов [3–6]. В качестве средств реализации предлагается применять современные микросервисные архитектуры на основе общности таких принципов, как автономность агентов и микросервисов, их способность к динамическому взаимодействию в синхронном и асинхронном режимах и как следствие способность динамического формирования цепочек операций в зависимости от конкретных запросов. В случае реализации программных агентов с помощью сервисов возрастают способности гибкой конфигурации производственных и бизнес-процессов. Вместе с тем, возможности реализации проактивного режима взаимодействия между агентами с помощью сервисов дают преимущества по интеллектуализации решения задач принятия решений в ходе выполнения производственных и бизнес-процессов.

Наряду с очевидными достоинствами микросервисной реализации МАС следует отметить проблемы и нерешенные задачи, связанные с выбором наилучшей структуры представления административной оболочки активов, эффективного механизма реализации интерфейсов административных оболочек, построения схем развертывания компонентов микросервисной реализации МАС. В этой связи целью исследования, представленного в настоящей статье, является разработка методов реализации агентов с помощью сервисов, автоматизирующих функции производственных и бизнес-процессов, и сервисов, исполняющих функции цифровой платформы.

Компонентный состав и концептуальная модель многоагентной цифровой платформы

В работах [7, 8] в качестве функционального представления программного агента в системах индустрии четвертого поколения было обосновано использование административной оболочки актива (Asset Administrative Shell, AAS) [4].

Термин «Сервис», используемый здесь в самом общем смысле, как он определен в глоссарии «Индустрия 4.0», означает «ограниченный объем функциональности, который предлагается предприятием или организацией через интерфейсы» [9].

В соответствии с [9] сервисы цифровой платформы предлагается классифицировать следующим образом:

- «Программные сервисы, соответствующие активу» (Asset Related Services) характеризуются тем, что они используют инфраструктурные сервисы и используют их для собственных функций в конкретном приложении (Компонентов Приложения). Будем такие сервисы называть прикладными.
- «Системно-релевантные программные сервисы» характеризуются тем, что они одинаково используются прикладными сервисами унифицированно. Это означает, что они должны иметь единый синтаксис и единую семантику для всех сервисов, связанных с приложением. Они называются «Инфраструктурные сервисы».

В части реализации прикладных сервисов (функций агентов участников сетевого предприятия) будем рассматривать сервисы сбора данных о функционировании активов, мониторинга и диагностики состояний, принятия решений и их исполнения. Данные сервисы используются для процессов конфигурирования цепочки создания стоимости и выбора участника сетевого предприятия, а также мониторинга выполнения и оценки эффективности цепочки создания стоимости.

В части реализации инфраструктурных сервисов цифровой платформы рассматриваются методы идентификации и регистрации участников цифровой платформы, предоставления им прав доступа, защиты данных от несанкционированного доступа [8]. Для проверки репутационных характеристик предполагаемых участников сетевого предприятия предлагаются методы реализации проверки добросовестности на основе статистики выполнения соглашений об уровне обслуживания и благонадежности, оценки угроз и рисков участия в совместной деятельности [10]. Также предполагается разработать метод реализации защиты виртуального периметра безопасности компонентов производственных цепочки сетевого предприятия от несанкционированного доступа [11]. Для организации взаимодействия агентов участников сетевых предприятий предполагается применять методы реализации информационного обеспечения агентов: нормативно-справочной информации, референсных онтологий предметной области и поддержки других информационных ресурсов.

Сервисы инфраструктуры административных оболочек предназначены для создания AAS, внесение в реестры AAS, а также поиска AAS. При соз-

дании AAS обеспечивается их уникальная идентификация в цифровой системе. Эти сервисы не входят в состав административных оболочек, а принадлежат цифровой платформе. В результате поиска AAS получается уникальный идентификатор, постоянный в течение всего жизненного цикла AAS, по которому можно обращаться непосредственно к AAS. Для доступа к сервисам инфраструктуры AAS из приложений используется специальный интерфейс, реализуемый платформой (агентом платформы).

Сервисы административной оболочки обеспечивают доступ к подмоделям AAS и сервисам, связанным с активами. Эти сервисы имеют отношение к экземпляру AAS и входят в профиль административной оболочки. К сервисам AAS относятся: сервисы регистрации подмоделей экземпляра AAS; сервисы работы с ограничениями, контекстом и классификациями экземпляра административной оболочки, её подмоделей и сервисов, связанных с активами; сервисы поиска подмоделей и сервисов, связанных с активами, которые относятся к подмодели.

Сервисы AAS позволяют управлять (добавлять, модифицировать и удалять) следующей метаинформацией:

- *Блок «Классификация»,* в котором устанавливается соответствие интерфейса компонента приложения (AAS, подмодель, сервис, относящийся к активу) задаваемым спецификациям, определяемым используемыми стандартами для технической совместимости компонентов. Обычно указывается документ, удостоверяющий проверку компонента на соответствие определенному стандарту;
- *Блок «Контекстуализация»*, в котором определяется совместимость совместно используемых компонентов, которая задает отношение контекстуализации между компонентами (административными оболочки) и описание требований к совместимости, например, совместимости деталей и узлов по отношению к изделию (вертикальная контекстуализация). В качестве семантических отношений контекста выступают: «Есть часть» – функциональный контекст, «Принадлежит» – иерархический контекст, «Подчиняется» – организационный контекст и т.д.;
- *Блок «Ограничения на использование»*, в котором определяются права доступа и использования компонента приложения (AAS, подмодели, сервиса, относящегося к активу).

С помощью цифровой платформы организуется активное и проактивное взаимодействие программных агентов – административных оболочек активов. С этой точки зрения цифровая платформа включает несколько важных компонентов (см. рис. 1), к которым могут обращаться как приложения пользователя, так и активные административные оболочки (программные агенты): реестры, содержащие метаданные (дескрипторы) AAS и подмоделей; репозитории, содержащие шаблоны AAS и подмоделей; сервис для быстрого обнаружения, содержащий БД с парами ключ-значение для ID активов и соответствующих им ID AAS.

В зависимости от типа актива и AAS могут быть выбраны различные варианты организации взаимодействия элементов внутри платформы:

- Оборудование может содержать свою административную оболочку и/или часть подмоделей в защищенной от записи области памяти (firmware), доступной извне через определенные интерфейсы, описанные, например, в AAS типа оборудования;
- AAS типа актива (продукта, оборудования, компонента) может представлять собой репозиторий проектной документации, оформленной в виде набора подмоделей и соответствующих файлов, поддерживаться компанией-разработчиком и содержать необходимые для всех участников цепочки создания ценности сведения, документы, схемы;
- Шаблоны AAS могут храниться в особом репозитории в виде образов контейнеров, выгружаться оттуда при создании нового экземпляра AAS с использованием API данного репозитория;
- AAS актива, реализующая проактивное поведение и взаимодействие с другими элементами, может быть развернуто как программный агент в отдельном контейнере и иметь собственные программные интерфейсы, самостоятельно обращаться к другим AAS и их подмоделям, компонентам платформы.

Организация доступа к данным AAS и запуск отдельных сервисов активов (сервисов, связанных с активами) может реализовываться различными способами, в том числе с использованием программных интерфейсов соответствующих компонентов, реализуемых платформой (агентом платформы). Для обеспечения распределенной разработки приложений и обеспечения взаимодействия разнородных компонентов стандартный набор интерфейсов [9] может быть регламентирован. Его, в частности, представила Ассоциация промышленных цифровых двойников (Industrial Digital Twin Association) [12]. Обзор интерфейсов представлен в таблицах 1–3.

В общем виде концептуальная модель цифровой платформы представлена на рис. 2.

Для обеспечения реализации основных функциональных требований к многоагентной системе сетевого

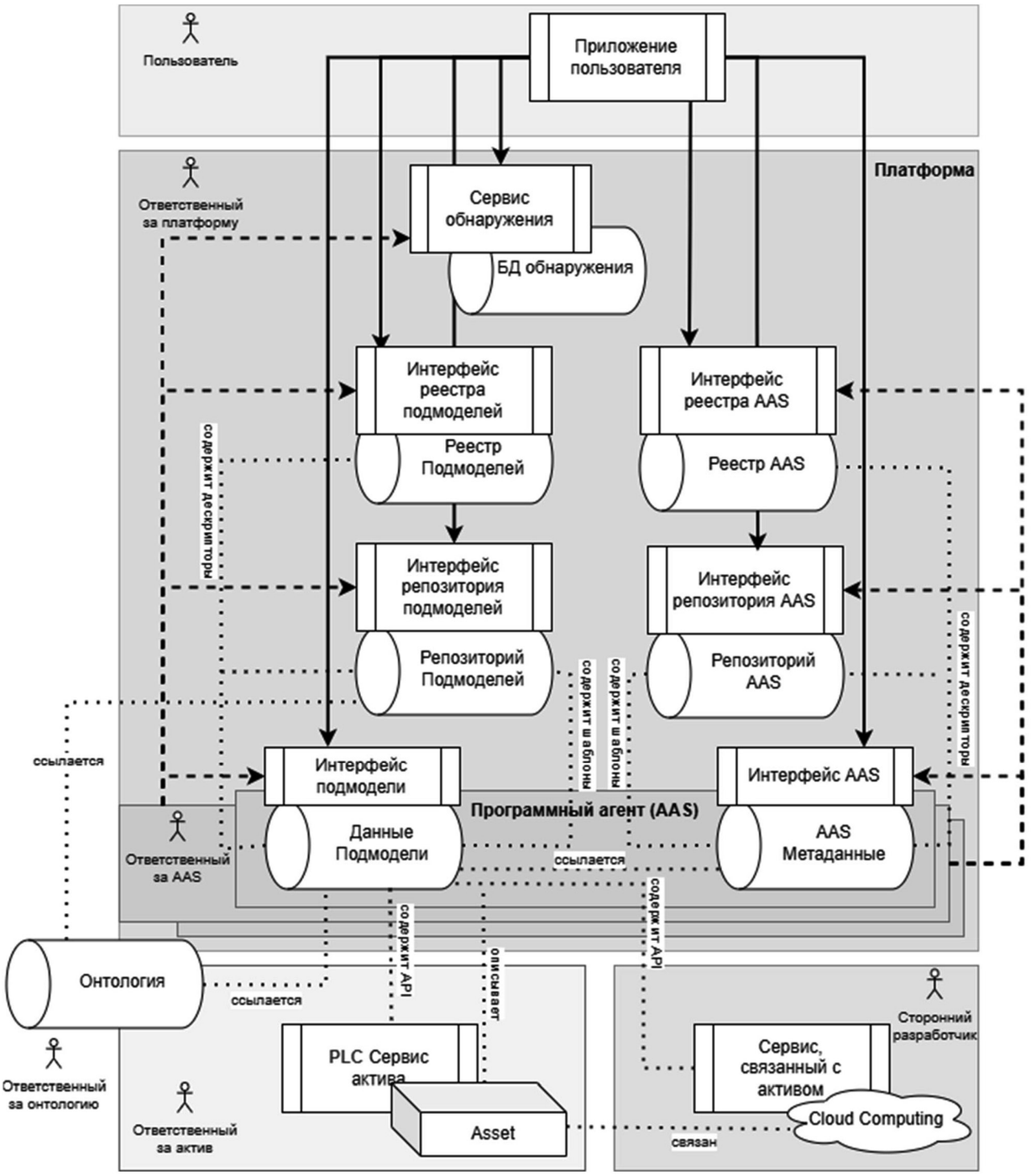

Рис. 1. Компонентный состав цифровой платформы
Fig. 1. Component composition of the digital platform

предприятия среди основных видов подмоделей выделены конструкторской спецификации изделия (BOM, Bill of Material) и производственного процесса (BOP, Bill of Process), описание цепочки добавленной ценности (Value Chain), описание способностей (Capability Description), спецификация параметров заказа (Purchase Order) и подмодель поступившего заказа (Placed Order), шаблоны соглашения об уровне обслуживания (SLA-T, Service-Level Agreement templates) и действующая модель SLA, описание интерфейсов актива (Asset Interface Description).

Алгоритмы использования прикладных и инфраструктурных сервисов

Рассмотрим алгоритмы использования прикладных и инфраструктурных сервисов на примере процесса формирования цепочки создания стоимости с выбором и подключени-

Таблица 1 / Table 1

Способы организации вызова прикладных сервисов AAS
Ways of organizing the call of asset administration shell application services

Имя сервиса	Назначение интерфейсов	Обмен данными	Операции, реализуемые интерфейсом
Сервис актива	Сервисы, к которым осуществляется обращение из AAS для выполнения операций (процедур) с активами, например, установить уровень энергопотребления (сервис актива) или собрать данные об уровне энергопотребления (сервис, связанный с активом)	ID операции Точка входа Описание входных и выходных параметров	*Набор операций определяется создателем актива и/или автором сервиса. Публикуются в подмодели Asset Interface Description, могут иметь отображение (mapping) на описание операций в других подмоделях.*
Сервисы, относящиеся к активу			
Сервисы интеграции AAS с сервисами актива	Сервисы, которые интегрируют сервисы подмодели и сервисы актива. Могут быть как за пределами AAS, так и принадлежать AAS. Необходимы для вызова из подмодели операций оборудования, например, конвейера, станка или останова.		

Таблица 2 / Table 2

Способы организации вызова инфраструктурных сервисов платформы
Ways of organizing the call of platform infrastructure services

Имя сервиса	Назначение интерфейсов	Обмен данными	Операции, реализуемые интерфейсом
Сервисы реестра AAS	Внесение, изменение и поиск метаданных в реестре AAS	ID AAS Дескриптор (метаданные AAS, актива, точки и параметры доступа, [дескрипторы подмоделей]) Статус выполнения	GetAllAASDescriptors[1] GetAASDescriptorById PostAASDescriptor PutAASDescriptorById DeleteAASDescriptorById
Сервисы репозитория AAS	Взаимодействие с репозиторием (размещение, замена, поиск, удаление) данных AAS	ID AAS ID актива Данные AAS Статус выполнения	GetAllAAS GetAASById GetAllAASByAssetId GetAllAASByIdShort PostAAS PutAASById DeleteAASById
Сервисы обнаружения AAS	Размещение, удаление и поиск информации для обнаружения AAS по ID актива (или актива по ID AAS)	Глобальные или локальные ID активов и AAS Статус выполнения	GetAllAASIdsByAssetLink GetAllAssetLinksById PostAllAssetLinksById DeleteAllAssetLinksById
Сервисы реестра подмоделей	Занесение, изменение и поиск по метаданным подмоделей AAS	ID подмодели Дескриптор (метаданные подмодели, актива, точки и параметров доступа, Семантический ID) Статус выполнения	GetAllSMDescriptors GetSMDescriptorById PostSMDescriptor PutSMDescriptorById DeleteSMDescriptorById
Сервисы репозитория подмоделей	Взаимодействие с репозиторием (размещение, замена, поиск, удаление) данных подмоделей AAS	ID подмодели Семантические ID Данные подмодели Статус выполнения	GetAllSM GetSMById GetAllSMBySID GetAllSMBySSID GetAllSMByIdShort PostSM PutSMById PatchSMById DeleteSMById
Сервисы репозитория описаний понятий	Взаимодействие с репозиторием (размещение, замена, поиск, удаление) описаний понятий	ID Описание понятия Статус выполнения	GetAllCDs GetCDById PostCD PutCDById DeleteCDById
Сервис поиска по онтологиям	Поиск фрагментов онтологии в виде набора RDF-триплетов	SPARQL-запрос Данные онтологии	*Возможности поиска обеспечиваются применением языка SPARQL*

[1] Здесь и далее в названия операций внесены сокращения (Asset Administration Shell заменено на AAS, Submodel заменено на SM, Concept Description – на CD, Supplementary Semantic ID заменено на SSID, Semantic ID – на SID). Операции типа Post связаны с размещением новых информационных объектов, Put и Patch – заменой и обновлением, Get – получением, Delete – удалением.

Таблица 3 / Table 3

Способы организации вызова инфраструктурных сервисов AAS (AAS infrastructure services)
Ways of organizing the call of asset administration shell infrastructure services

Имя сервиса	Назначение интерфейсов	Обмен данными	Операции, реализуемые интерфейсом
Сервисы управления оболочкой актива	Получение и замена данных AAS	ID AAS Данные оболочки актива Статус выполнения	GetAAS PutAAS
Сервисы управления ссылками на подмодели	Получение, замена и удаление ссылок на подмодели	ID AAS ID подмоделей Статус выполнения	GetAllSMReferences PostSMReference DeleteSMReference
Сервисы управления информацией об активе	Получение и замена информации об активе	ID AAS Информация об активе (вид и тип актива, ID актива) Статус выполнения	GetAssetInformation PutAssetInformation
Сервисы управления подмоделью	Получение, замена и обновление данных подмодели	ID подмодели Данные подмодели Статус выполнения	GetSM PutSM PatchSM
Сервисы управления файлами подмодели	Получение, загрузка и удаление файлов	ID элемента Файл Статус выполнения	GetFileByPath PutFileByPath DeleteFileByPath
Сервисы управления элементами подмодели	Получение, обновление, замена и удаление элементов подмодели	ID элемента Данные элемента подмодели Статус выполнения	GetAllSMElements GetSMElementByPath PostSMElement PostSMElementByPath PutSMElementByPath PatchSMElementByPath GetSMElementValueByPath DeleteSMElementByPath
Сервисы запуска операций	Синхронный и асинхронный вызов внешних сервисов, получение результатов и статусов работы	ID элемента Входные параметры Выходные параметры Величина таймаута Статус выполнения	InvokeOperationSync InvokeOperationAsync GetOperationAsyncStatus GetOperationAsyncResult

ем предприятий-партнеров на основе имеющейся конструкторской спецификации изделия (BOM).

Действия, связанные с формированием цепочки добавленной стоимости, включают следующий набор системных прецедентов использования (см. рис. 3).

Формирование запроса на поставку и/или производство организации-подрядчику головной организацией выполняется посредством программного агента ресурса головной организации и агента платформы. При этом осуществляется обращение к подмодели BOM (Bill of Materials, Спецификация изделия) и онтологии, содержащей формальное стандартизованное описание изделий и их параметров. Используя полученные данные, пользователь может определить поставку или производство какого из компонентов продукта следует выполнить с использованием привлеченных ресурсов. Последовательно обработав с помощью агента платформы имеющиеся метаданные, агент ресурса головной организации формирует запрос на выпуск релевантных компонентов. Важной частью процедуры является проверка семантического соответствия описания изделия и его компонент у головной организации и формы заказа (Purchase Order) потенциального поставщика. Особенности совместного использования онтологии на этапах формулирования заказа представлены в работе [7].

Алгоритм формирования запроса, описывающий взаимодействие агентов ресурса головной организации и агента платформы, обеспечивающего доступ к компонентам платформы (сервису обнаружения, реестрам AAS и подмоделей, онтологии), представлен в виде UML диаграммы последовательностей на рис. 4.

Набор действий, выполняемых при формировании запроса, имеет следующую детализацию:

На первом этапе приложение пользователя направляет агенту ресурса (головной организации сетевого предприятия) запрос на поиск BOM интересующего продукта – GetBOM(ID продукта);

Агент ресурса с помощью сервиса обнаружения получает и отбирает AAS ID интересующего продукта – GetAllAASIdsByAssetLink(ID продукта);

Затем агент ресурса головной организации обращается в реестр AAS для получения метаданных (дескрипторов), содержащих общую информацию об агенте продукта – GetAASDescriptorById(AAS ID);

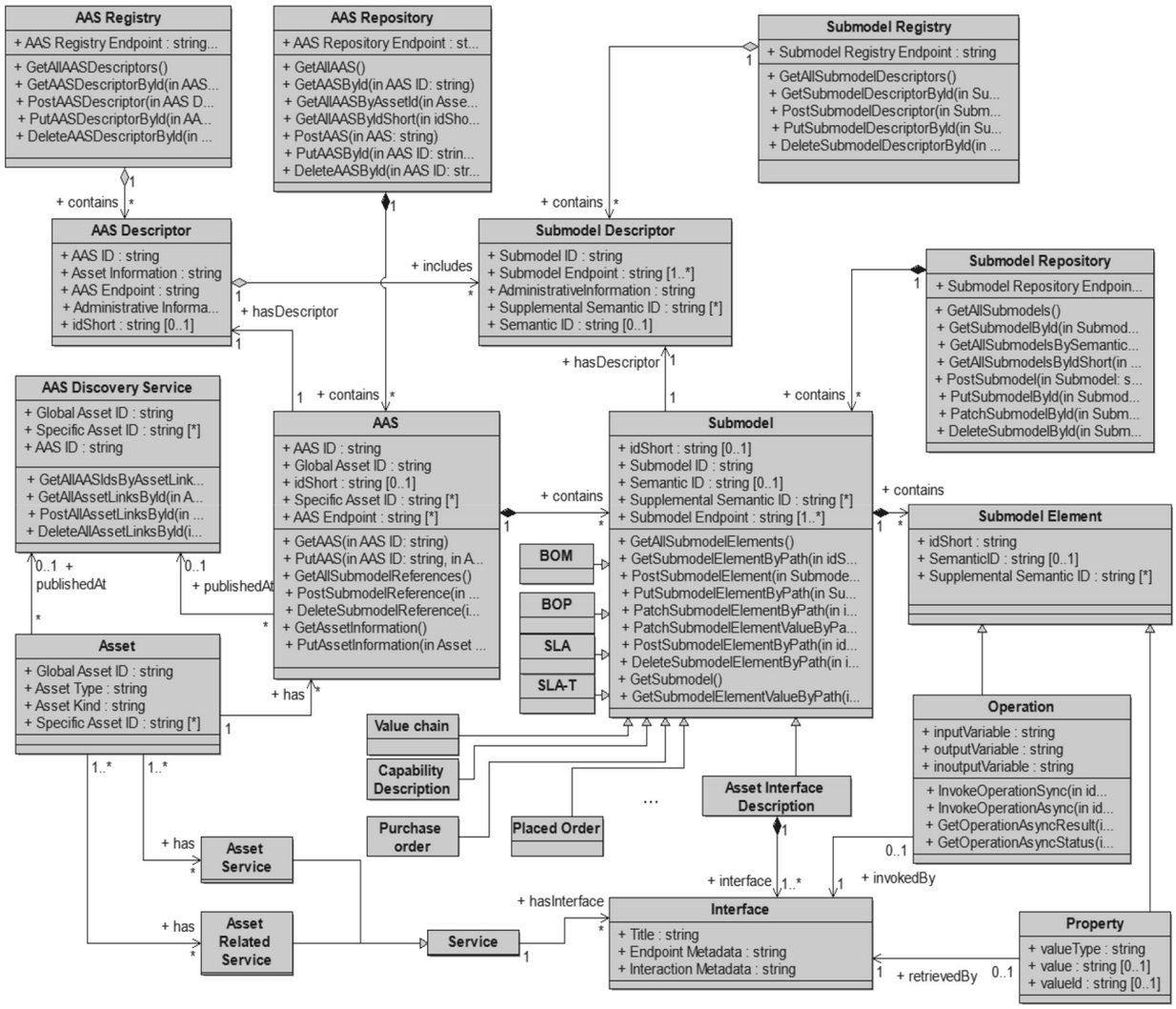

Рис. 2. Концептуальная модель

Fig. 2. Conceptual model

Ссылки на подмодели могут содержаться как в дескрипторе (например, публичные «Контактная информация», «Заказ товара»), так и быть доступны через агента продукта (например, приватные «Конструкторская спецификация», «Производственный план»). Агент ресурса может получить список подмоделей у агента продукта после обращения через соответствующий интерфейс – GetAllSMReferences( );

Агенту ресурса для доступа к элементам данных подмоделей необходимо получить метаданные (дескрипторы) соответствующих подмоделей из реестра – GetSMDescriptorById(ID подмодели);

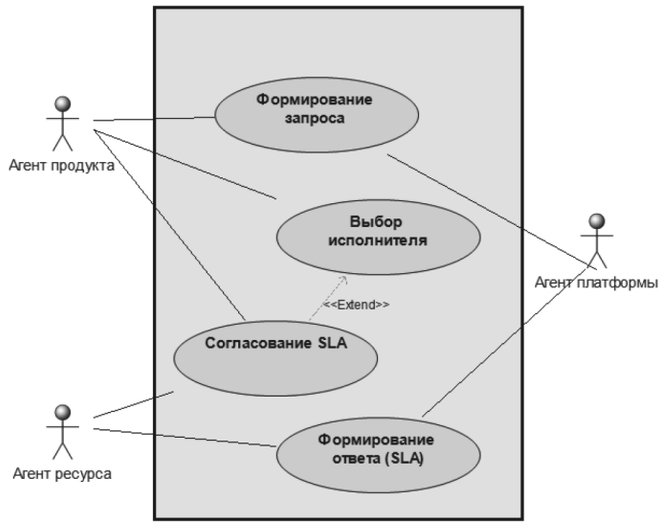

Рис. 3. Прецеденты использования для формирования цепочки добавленной стоимости

Fig. 3. Use cases for value chain formation

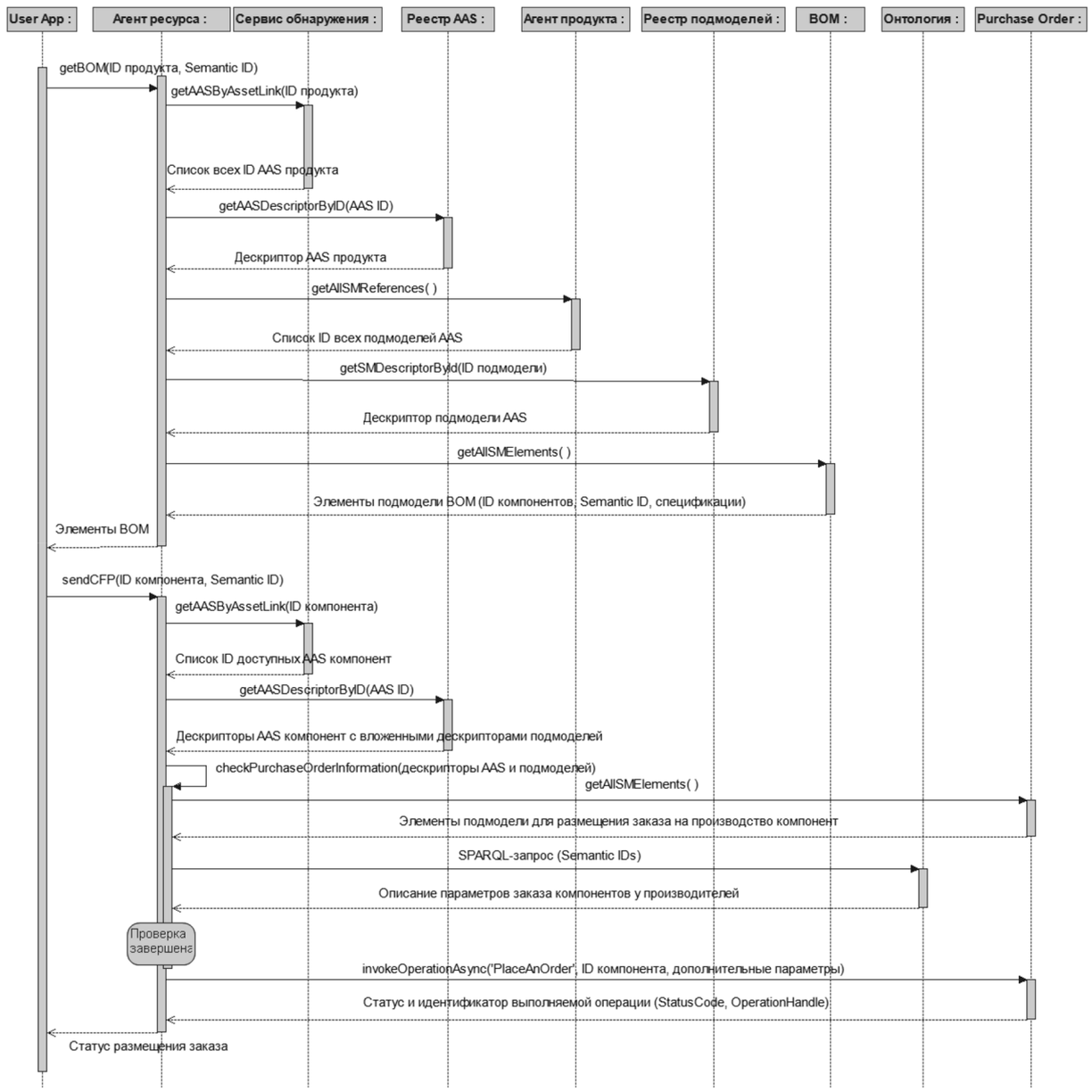

Рис. 4. Формирование запроса на производство компонентов продукта
Fig. 4. Formation of a request for production of product components

Для передачи пользователю информации о конструкторской спецификации изделия агенту ресурса головной организации необходимо запросить элементы подмодели BOM агента продукта – GetAllSMElements( );

Полученные данные передаются в пользовательское приложение для оценки необходимости и формирования запроса на приобретение (производство) компонента – SendCFP(ID компонента, Semantic ID);

Затем, аналогично предыдущим шагам, Агент ресурса головной организации отбирает AAS ID и метаданные (дескрипторы), содержащие общую информацию об Агентах компонентов изделия – GetAllAASIdsByAssetLink (ID компонента), GetAASDescriptor ById (AAS ID);

Для проверки возможности заказа и отбора поставщиков выполняется агентом ресурса головной организации выполняется операция CheckPurchaseOrderInformation (дескрипторы AAS и подмоделей). При этом отбираются элементы подмодели PurchaseOrder, включающие различные параметры размещения заказа (контактная информация поставщика, требования к оформлению заказа, объемы, условия поставки и т.д.), которые проверяются на релевантность контексту с использованием онтологии;

Затем агентом ресурса головной организации оформляется заказ на приобретение (производство) отобранных

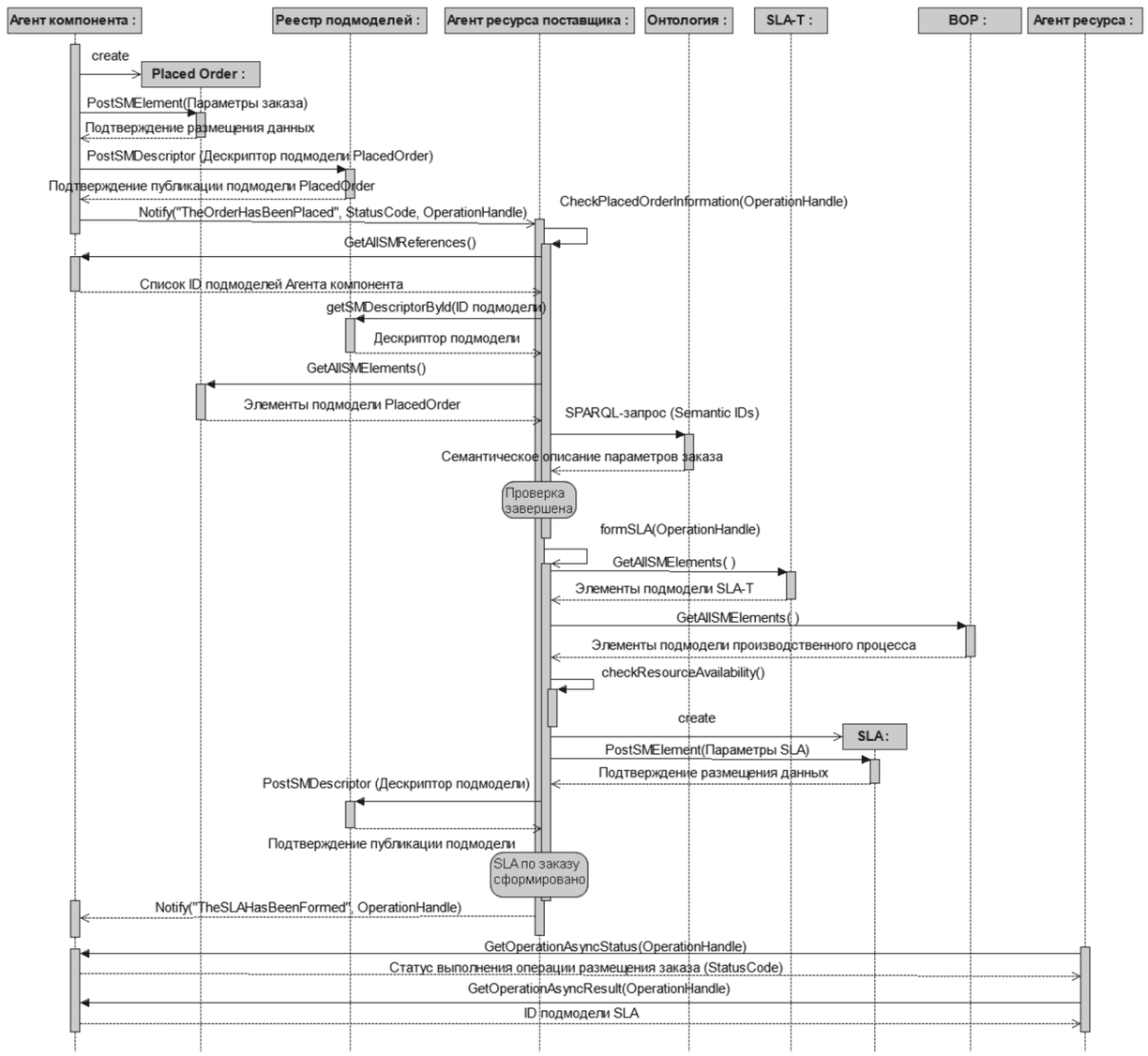

Рис. 5. Формирование и отправка предложения по производству компонента продукта
Fig. 5. Forming and sending a proposal for the production of a product component

компонентов изделия – Invoke OperationAsync('PlaceAnOrder', ID компонента, дополнительные параметры). В результате обращения к агенту компонента изделия инициируется выполнение операции, а агенту ресурса головной организации направляется текущий статус и идентификатор операции, с помощью которого можно будет отслеживать ход размещения заказа и идентифицировать связанные входящие уведомления.

После получения заказа агент компонента изделия и агент производителя компонента изделия осуществляют проверку запроса с помощью агента платформы, обеспечивающего доступ к соответствующим компонентам (реестру подмоделей и онтологии). Формой коммерческого предложения и представления плановых показателей производственного процесса (выполнения сервиса в рамках платформы) определено соглашение об уровне обслуживания, особенности формирования и использования которого представлены в работе [8]. После завершения процедуры определения плановых показателей на основе шаблона агент компонента изделия возвращает агенту ресурса головной организации подмодель, содержащую SLA для производства данного компонента.

Алгоритм формирования коммерческого предложения в виде SLA представлен в виде UML диаграммы последовательностей на рисунке 5.

Набор действий, выполняемых при формировании ответа на запрос, имеет следующую детализацию:

Агент компонента изделия в ответ на размещение заказа создает новую подмодель с описанием заказанной продукции и размещает там данные заказа, переданные в запросе Агентом

ресурса головной организации – PostSMElement(параметры заказа);

Затем данная подмодель вносится в реестр подмоделей для обеспечения доступа к ней другими Агентами – PostSMDescriptor(Дескриптор подмодели Placed Order);

Агент компонента изделия направляет уведомление о событии «Заказ размещен», включающее текущий статус и идентификатор операции, Агенту ресурса поставщика, который будет выполнять дальнейшее формирование ответа на запрос – Notify ("TheOrderHasBeenPlaced", StatusCode, OperationHandle);

Получив уведомление, Агент ресурса поставщика проверяет полученный заказ с точки зрения корректности используемой онтологии – CheckPlacedOrderInformation(OperationHandle). При этом отбираются элементы подмодели Placed Order, включающие различные параметры заказа (контактная информация, объемы, условия поставки и т.д.), которые проверяются на релевантность контексту Агентом ресурса поставщика с использованием онтологии. Взаимодействие в рамках согласования онтологии проекта изделия было описано [наша публикация];

После завершения проверки заказа Агент ресурса поставщика выполняет формирование соглашения об уровне обслуживания (SLA) для последующего согласования с Агентом ресурса головной организации – formSLA(OperationHandle). При этом собираются элементы подмодели шаблона соглашения об уровне обслуживания (SLA-T) и элементы описания производственного процесса (BOP), в соответствии с которыми проверяется доступность ресурсов – checkResourceAvailability();

Затем Агент ресурса поставщика адаптирует параметры шаблона SLA-T к поступившему заказу и создает подмодель SLA, в которой размещает значения этих параметров – PostSMElement(параметры SLA);

Затем данная подмодель вносится в реестр подмоделей для обеспечения доступа к ней другими Агентами – PostSMDescriptor(Дескриптор подмодели SLA);

После размещения подмодели SLA Агент ресурса поставщика уведомляет об этом Агента компонента изделия – Notify ("TheSLAHasBeenFormed", OperationHandle);

Агент ресурса головной организации с заданной периодичностью может опрашивать Агента компонента изделия на предмет обработки запроса на поставку (производство) продукции – GetOperationAsyncStatus(OperationHandle);

После получения от Агента компонента изделия нужного статуса Агент ресурса головной организации направляет запрос на получение результата – GetOperationAsyncResult(OperationHandle). В результате обращения к Агенту компонента изделия Агент ресурса получает текущий результат в виде идентификатора подмодели SLA, с помощью которого можно получить предлагаемые технические, временные и стоимостные параметры исполнения заказа.

Дальнейшие шаги, связанные с согласованием и выбором поставщика компонента изделия в большей степени удовлетворяющего требованиям покупателя (головной организации), осуществляются в рамках процедуры оценки и сравнения параметров SLA, описанной в работе [8].

Заключение

В статье представлено развитие компонентного состава концептуальной модели цифровой платформы, уточнены интерфейсы основных компонентов, а также представлены модели алгоритмов формирования запроса на производство (поставку) компонентов продукта и ответ на него со стороны поставщика, реализованных на основе набора стандартных интерфейсов и инфраструктурных сервисов.

Реализация цифровой платформы на основе синтеза многоагентных технологий и микросервисных архитектур позволит обеспечить создание AAS, реализующих свое поведение и взаимодействие с другими компонентами платформы в активном и проактивном режимах, а также повысит интероперабельность и обеспечит гибкость формирования цепочек добавленной ценности.

Литература

1. 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.

2. Чернышев С.А. Проблемы мультиагентных систем и возможные пути их решения // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2023. № 3. С. 231–241.

3. Vogel-Heuser B., Ocker F., Scheuer T. An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems // Automatisierungstechnik. 2021. Т. 69. № 12. С. 1026–1039. DOI: 10.1515/auto-2021-0081.

4. Sakurada L., Leitao P., De la Prieta F. Agent-based asset administration shell approach for digitizing industrial assets // IFAC PapersOnLine. 2022. Т. 55. № 2. С. 193–198. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.192.

5. 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. Т. 14. № 3. С. 18–32. DOI: 10.1109/MIE.2019.2962225.

6. Seitz Matthias, Gehlhoff Felix, Cruz Salazar, Luis Fay, Alexander Vogel-Heuser, Birgit. Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0. // Journal of Intelligent Manufacturing. 2021. № 32. С. 1–19.

7. 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.

8. 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.

9. Plattform Industrie 4.0. Functional View of the Asset Administration Shell in an Industrie 4.0 System Environment [Электрон. ресурс]. Discussion paper. April 2021.Режим доступа: https://www.plattformi40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional-View.pdf.

10. Королева Д.С., Денисов А.А. Методы сбора, анализа и мониторинга информации с целью выбора благонадежных участников сетевого предприятия в рамках контура конкурентной разведки // Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2023): сборник научных трудов XXVI Российской научной конференции (29–30 ноября 2023, Москва.). М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2023. Т.1. С. 166 – 177.

11. Козырев П.А. Методы обеспечения информационной безопасности производственных и бизнес-процессов сетевого предприятия // Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2023): сборник научных трудов XXVI Российской научной конференции (Москва, 29–30 ноября 2023 г.). М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2023. Т. 1. С. 150–155

12. Industrial Digital Twin Association. Specification of the Asset Administration Shell. Part 2: Application Programming Interfaces. V3.0.2. June 2024. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://industrialdigitaltwin.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/IDTA-01002-3-0-2_SpecificationAssetAdministrationShell_Part2_API.pdf.

References

1. Gorodetskiy V.I., Bukhvalov O.L., Skobelev P.O., Mayorov I.V. Current state and prospects for industrial applications of multi-agent systems. UBS. 2017; 66: 94–157. (In Russ.)

2. Chernyshev S.A. Problems of multi-agent systems and possible solutions. Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnyye sistemy: modeli, analiz i upravleniye = Bulletin of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and management. 2023; 3: 231–241. (In Russ.)

3. Vogel-Heuser B., Ocker F., Scheuer T. An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems. Automatisierungstechnik. 2021; 69; 12: 1026–1039. DOI: 10.1515/auto-2021-0081.

4. Sakurada L., Leitao P., De la Prieta F. Agent-based asset administration shell approach for digitizing industrial assets. IFAC PapersOnLine. 2022; 55; 2: 193–198. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.192.

5. 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; 14; 3: 18–32. DOI: 10.1109/MIE.2019.2962225.

6. Seitz Matthias, Gehlhoff Felix, Cruz Salazar, Luis Fay, Alexander Vogel-Heuser, Birgit. Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0. Journal of Intelligent Manufacturing. 2021; 32: 1–19.

7. Tel'nov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V., Denisov A.A. Trebovaniya k programmnoy realizatsii sistemy Industrii 4.0 dlya sozdaniya setevykh predpriyatiy = Requirements for the software implementation of the Industry 4.0 system for creating networked enterprises. Programmnyye produkty i sistemy = Software products and systems. 2022; 35; 4: 557–571. DOI: 10.15827/0236-235X.140.557-571. (In Russ.)

8. Tel'nov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V., Bryzgalov A.A. Development of models of production and business processes of network enterprises based on multi-agent systems. Programmnyye produkty i sistemy = Software products and systems. 2023; 36; 4: 632–643. DOI: 10.15827/0236-235X.142.632-643. (In Russ.)

9. Plattform Industrie 4.0. Functional View of the Asset Administration Shell in an Industrie 4.0 System Environment [Internet]. Discussion paper. April 2021. Available from: https://www.plattformi40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional-View.pdf.

10. Koroleva D.S., Denisov A.A. Metody sbora, analiza i monitoringa informatsii s tsel'yu vybora blagonadezhnykh uchastnikov setevogo predpriyatiya v ramkakh kontura konkurentnoy razvedki = Methods of collecting, analyzing and monitoring information in order to select reliable participants in a network enterprise within the framework of competitive intelligence. Inzhiniring predpriyatiy i upravleniye znaniyami (IP&UZ-2023) = Enterprise Engineering

and Knowledge Management (IP&KM-2023): collection of scientific papers of the XXVI Russian Scientific Conference (November 29-30; 2023, Moscow). Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2023; 1: 166–177. (In Russ.)

11. Kozyrev P.A. Metody obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti proizvodstvennykh i biznes-protsessov setevogo predpriyatiya = Methods of ensuring information security of production and business processes of a network enterprise. Inzhiniring predpriyatiy i upravleniye znaniyami (IP&UZ-2023) = Enterprise Engineering and Knowledge Management (IP&KM-2023): collection of scientific papers of the XXVI Russian Scientific Conference (Moscow, November 29–30; 2023). Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2023; 1: 150 – 155. (In Russ.)

12. Industrial Digital Twin Association. Specification of the Asset Administration Shell. Part 2: Application Programming Interfaces. V3.0.2. June 2024. [Internet]. Available from: https://industrialdigitaltwin.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/IDTA-01002-3-0-2_SpecificationAssetAdministrationShell_Part2_API.pdf

Сведения об авторах

Василий Александрович Казаков
К.э.н., доцент кафедры прикладной информатики и информационной безопасности,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
Москва, Россия
Эл. почта: Kazakov.IB@rea.ru

Юрий Филиппович Тельнов
Д.э.н., зав. кафедрой Прикладной информатики и информационной безопасности
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия
Эл. почта: Telnov.YUF@rea.ru

Information about the authors

Vasily A. Kazakov
Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Security,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia
E-mail: Kazakov.IB@rea.ru

Yuri F. Telnov
Dr. Sci. (Economics), Head of the Department of Applied Informatics and Information Security
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia
E-mail: Telnov.YUF@rea.ru