

УДК 004.89
DOI: 10.15827/0236-235X.140.557-571

Дата подачи статьи: 29.08.22, после доработки: 21.09.22
2022. Т. 35. № 4. С. 557–571

Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий

Ю.Ф. Тельнов¹, д.э.н., профессор, зав. кафедрой, *Telnov.YUF@rea.ru*

В.А. Казаков¹, к.э.н., доцент, *Kazakov.VA@rea.ru*

А.В. Данилов¹, ст. преподаватель, *Danilov.AV@rea.ru*

А.А. Денисов¹, ст. преподаватель, *Denisov.AA@rea.ru*

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

В статье определяются требования к программной реализации систем Индустрии 4.0 (i4.0-систем) для создания сетевых предприятий на основе цифровых платформ с использованием многоагентной технологии взаимодействия i4.0-компонентов и онтологического подхода к построению общей концептуальной модели предметной области.

В качестве метода исследования предлагается использовать метод декомпозиции i4.0-системы на платформенные программные сервисы и программные административные оболочки, связанные с управлением и функционированием ресурсов (активов) сетевого предприятия, – i4.0-компоненты. За основу построения архитектуры i4.0-системы выбрана эталонная архитектурная модель Индустрии 4.0 RAMI 4.0. Для реализации многоагентного взаимодействия i4.0-компонентов в рамках построения цепочки создания стоимости сетевого предприятия предлагается использовать онтологический подход.

Основными результатами исследования являются сформулированные требования к программной реализации i4.0-системы с позиции формирования программных сервисов i4.0-платформы и программных административных оболочек i4.0-компонентов по уровням архитектуры RAMI. В качестве программного механизма взаимодействия i4.0-компонентов предложен алгоритм взаимодействия i4.0-компонентов с использованием предметной онтологии.

В результате программной реализации сформулированных требований к построению архитектуры i4.0-системы повысится гибкость и эффективность создания и функционирования цепочек создания стоимости сетевых предприятий в динамично развивающейся бизнес-экосистеме промышленного производства продукции и услуг.

Ключевые слова: *бизнес-экосистема, цифровая платформа, система Индустрии 4.0 (i4.0-система), i4.0-платформа, i4.0-компонент, административная оболочка, архитектура RAMI, требования к программной реализации, онтология предметной области.*

Цифровая трансформация предприятий на основе внедрения цифровых технологий приводит к коренному изменению бизнес-моделей и формированию новых организационных и производственных структур, к которым относятся сетевые предприятия. Сетевые предприятия как динамически формируемые производственные структуры в бизнес-экосистеме, объединяющие множество предприятий-участников совместной экономической деятельности, в современных условиях создаются на основе цифровых платформ. В настоящее время активно развивается подход к построению цифровых платформ для использования в промышленности в рамках проекта Индустрии 4.0 [1, 2]. Аналогичные подходы развиваются в рамках проектов Индустриального интернета [3], развития цифровых фабрик [4], Революции роботов и Промышленной инициа-

тивы Интернета вещей [1] и в ряде других [5]. Подход к построению цифровых платформ на основе проекта Индустрии 4.0 выгодно отличается проработанностью архитектуры с точки зрения уровней, аспектов и жизненного цикла цифрового предприятия и его компонентов, поэтому он выбран в качестве основного для формирования требований к программной реализации систем управления предприятиями на основе цифровой платформы.

Цифровые платформы внедряются как на потребительских рынках, так и на двухсторонних и многосторонних рынках производителей продукции и услуг, формируя на принципах сотрудничества и возможных конкурентных отношений экономические сообщества субъектов экономической деятельности или бизнес-экосистемы. Цифровая трансформация промышленных предприятий направлена на

создание гибкого и высокоэффективного распределенного сетевого производства на основе цифровых платформ [6]. С этой точки зрения в бизнес-экосистемах на базе цифровых платформ могут выстраиваться динамически образующиеся гибкие сетевые или виртуальные предприятия, целью которых является создание инновационных продуктов и услуг под конкретные потребности заказчиков [7]. При этом организация и управление сетевыми предприятиями в рамках платформы являются важными компетенциями, обеспечивающими достижение поставленной цели [8]. В результате создания таких предприятий должны происходить ускорение производственных и бизнес-процессов, снижение издержек на их выполнение, повышение качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг, уровня удовлетворенности потребителей. Вместе с тем применение цифровых платформ порождает и вызовы, связанные с поиском соответствующих партнеров, организацией совместного владения и определения прав использования данных, размещенных на платформе, риск потери доверия к системе и утраты самостоятельности в принятии решений для участников платформы [9].

В соответствии с концепцией Ассоциации «Технет» [4] относительно полноты управления жизненным циклом создания продукции и услуг на основе моделирования цифровых потоков различают три вида цифровых предприятий.

Цифровая фабрика предполагает выстраивание всей деятельности вокруг производства продукции на основе создания цифровых двойников-моделей продукции, связанных производственных процессов и их непрерывного развития. В данном случае рассматривается жизненный цикл создания продукта, включающий цифровое проектирование и изготовление опытных образцов продукции. Управление в основном связано с уровнем рабочих мест.

Умная фабрика предусматривает реализацию полного жизненного цикла промышленного производства продукции на основе технологий роботизации, производственных технологий с использованием Промышленного интернета, интеллектуальных технологий. В данном случае используются в основном системы цехового оперативного управления производством.

Виртуальные фабрики, на которых осуществляется интеграция всех производственных и бизнес-процессов (формирование производственных заказов, планирование поставок,

производства, дистрибуции продукции и услуг, мониторинг и управление качеством), причем в отличие от применения классических систем автоматизации управления ресурсами предприятий (ERP-систем), цепочек поставок (SCM-систем), управления взаимоотношениями с клиентами (CRM-систем) в данном случае осуществляется формирование экосистем предприятий на основе общих программно-технических платформ и создания единого информационного пространства.

Создание виртуальных или сетевых предприятий способствует усилению интеграции и кооперации взаимодействующих производств [10]. Вместе с тем в отличие от потребительских рынков осуществление цифровой трансформации в промышленности на основе цифровых платформ наталкивается на проблемы координации сложных цепочек создания стоимости, вызывающие рост транзакционных издержек. Кроме того, промышленное производство обладает большей инерционностью вследствие высокой ресурсоемкости и очень часто больших инвестиционных циклов. Вследствие этих причин проведение цифровой трансформации сетевых предприятий в рамках бизнес-экосистем требует серьезной проработки требований к программной реализации архитектуры сетевых предприятий на основе цифровых платформ, создания интеллектуальных систем управления сетевыми предприятиями, в частности, на основе спецификаций систем Индустрии 4.0 (i4.0-систем) [11].

Создание гибкой архитектуры сетевого предприятия вызывает необходимость быстрой настройки его компонентов в соответствии с изменяющимися потребностями рынка и в настоящее время базируется на применении технологии управления цифровыми потоками [12] и цифровыми двойниками [13, 14]. Достоинством перечисленных технологий является отражение в реальном масштабе времени состояния производственных и бизнес-процессов, связывающих звенья цепочки создания стоимости, и обеспечение возможности их оперативного мониторинга. Вместе с тем в существующих технологиях цифровых потоков и цифровых двойников не реализованы возможности автоматизации процессов принятия решений по выбору наилучших траекторий осуществления процессов на различных уровнях управления. С этой точки зрения представляется возможным и необходимым применение интеллектуальных многоагентных технологий [15, 16], которые позволяют организовать

взаимодействие в рамках цепочек создания стоимости автономных программных агентов, представляющих участников сетевых предприятий, с динамическим принятием решений. В этом отношении административные оболочки компонентов систем Индустрии 4.0 [17] могут быть наделены программными сервисами, которые будут осуществлять принятие решений в процессе интеллектуального взаимодействия. Для повышения семантической интероперабельности i4.0-компонентов представляется целесообразным применение механизма концептуального моделирования предметной области, основанного на онтологиях. Развитие этого механизма наряду с механизмами обработки естественного языка [18] для обеспечения взаимодействия в рамках систем Индустрии 4.0 находится в начальной стадии и требует разработки новых подходов к моделированию реальных объектов и условий функционирования сложных систем [19].

Необходимость интеграции технологий, ресурсов, интеллектуального потенциала взаимодействующих участников сетевого предприятия на основе единой программно-технической платформы обуславливает актуальность исследования требований к программной реализации i4.0-систем на различных уровнях архитектуры с позиции построения набора платформенных и функционально-ориентированных компонентов и их взаимодействия на основе применения многоагентной технологии и общей концептуальной модели предметной области в форме онтологии.

Анализ подходов к трансформации бизнес-экосистем и бизнес-моделей сетевых предприятий на основе цифровых платформ

Под цифровой платформой с технологической точки зрения будем понимать набор программных сервисов, объединенных общей программной средой, для реализации различных функций создания и функционирования бизнес-экосистемы. Анализ опыта применения цифровых бизнес-платформ в России и в мире нашел отражение в целом ряде работ [20, 21]. Так, в докладе для общественных консультаций Банка России (http://www.cbr.ru/Content/Document/File/119960/Consultation_Paper_02042021.pdf) отмечаются успехи страны по многим параметрам цифровизации в части внедрения инноваций и онлайн-сервисов в обслуживание населения, создания технологических и

инфраструктурных условий для их ускоренного развития. В настоящее время происходит переход от простейших посреднических бизнес-моделей, использующих цифровые платформы (модель доски объявлений), к централизованной платформенной модели с регулирующими правилами, что повышает надежность и безопасность сервисов для потребителей. При этом различают закрытые платформы с ограниченным подключением поставщиков и производителей, так называемые бесконкурентные платформы, и открытые платформы с возможным конкурентным участием различных субъектов экономической деятельности, но в этом случае должны быть установлены правила взаимодействия участников платформы, удовлетворяющие требованиям всех заинтересованных субъектов экономической деятельности.

Существенной характеристикой применения цифровых платформ является массовость участия поставщиков и потребителей в создаваемой бизнес-экосистеме, что обеспечивает экономический эффект сетевого применения. Благодаря подключению множества поставщиков к цифровой платформе появляется возможность их выхода на новые рынки, получения дополнительных логистических, юридических, консультационных и прочих услуг на рынке. В некоторых случаях общая бизнес-экосистема работает с несколькими цифровыми платформами по функциональному принципу. Их технологическое единство позволяет потребителям легко переключаться с одной платформы на другую, осуществляя таким образом «бесшовную» интеграцию различных систем. Возможно применение и гибридных бизнес-моделей построения и функционирования цифровой платформы. Вместе с тем формирование новых экономических отношений в рамках создания бизнес-экосистем вокруг цифровых платформ обуславливает необходимость разработки новых механизмов регулирования экономической и информационной безопасности, поддерживаемых платформенными сервисами.

В обзорной статье [22] дается анализ ключевых базовых ценностей, которые предоставляются цифровыми платформами, выгодно отличающих их от традиционных бизнес-моделей, к которым относятся следующие:

– поиск партнеров в цепочках создания стоимости на динамической и взаимовыгодной основе путем организации доступа к интегрированным данным о производителях и потребителях продукции и услуг;

- агрегирование информации и доступ к данным с возможным открытием через API внутрикорпоративных хранилищ данных, позволяющим получать доступ к данным о продукции и услугах участникам платформы и выполнять анализ больших объемов данных и специализированные приложения;

- предоставление инструментов разработки, обеспечивающих создание специализированных функциональных приложений и сервисов, работающих на общей цифровой платформе;

- гибкое формирование цен на продукцию и услуги с учетом возможной конкуренции поставщиков в рамках открытой цифровой платформы;

- обеспечение доверия к участникам цифровой платформы благодаря проверке соблюдения устанавливаемых правил подключения субъектов к сети и мерам обеспечения экономической и информационной безопасности;

- устранение препятствий к участию в цифровой платформе дискриминационного характера; в качестве мер, обеспечивающих участие субъектов, используется механизм экономического рейтингования в бизнес-экосистеме;

- цифровая поставка товаров, услуг и ценностей, предоставление оцифрованных товаров вместо физических аналогов.

В статье [1] сделаны обзор внедрений цифровых платформ в промышленности, анализ получаемых сетевых эффектов и обобщение типов платформ, которые определяют основные требования к архитектуре программной реализации. Анализ проведен на основе обобщения опыта японских и немецких компаний в рамках проектов Industrie 4.0 (Германия) и Robot revolution and Industrial IoT Initiative (Япония) по внедрению цифровых платформ в промышленных компаниях.

В качестве основных сетевых эффектов рассматриваются эффекты, обусловленные ростом масштаба бизнеса производителей, потребителей и оператора цифровой платформы, включенных в единую бизнес-экосистему, поддерживаемую техническими возможностями единой цифровой платформы. Этот эффект достигается за счет следующих факторов:

- интеграция общих вычислительных и информационных ресурсов;

- использование общих протоколов взаимодействия;

- поддержка множества рыночных приложений и запросов;

- формирование доступной базы больших данных о функционировании системы;

- рост технической производительности используемых ресурсов;

- обеспечение социальных коммуникаций участников цифровой платформы.

Авторы статьи [1] отмечают сложности в реализации сетевых эффектов при использовании цифровых платформ в промышленности, связанные с многосторонностью взаимодействия партнеров по бизнесу в рамках цепочек создания стоимости, что обуславливает еще недостаточно широкое распространение сетевых предприятий в промышленности на основе общих цифровых платформ. Вместе с тем в статье обобщены проекты внедрения цифровых платформ в промышленности, определены типы используемых цифровых платформ и соответствующих бизнес-моделей.

- *Посредническая платформа* характерна для двухсторонних рынков. На таких платформах хорошо выстраиваются торговые площадки, простейшим технологическим аналогом которых является технология «доски объявлений». В этом случае оператор платформы является посредником, а отношения между участниками платформы сводятся к отношениям двухсторонней торговли. Посреднические платформы, как правило, имеют открытый характер подключения участников.

- *Облачная платформа* предполагает централизованный сбор и обработку данных о функционировании звеньев цепочки создания стоимости в облачной инфраструктуре, используя в том числе технологии промышленного Интернета вещей и распределенного выполнения функциональных приложений. Оператор платформы предоставляет возможности для разработки функциональных приложений и сервисов, в том числе с помощью платформенных сервисов и инструментальных средств. Облачные платформы могут быть как открытого, так и закрытого типа: в случае открытого типа на платформе могут функционировать множество сетевых предприятий разных типов, а в случае закрытого типа оператор платформы может отождествлять головное предприятие сетевого предприятия.

- *Периферийно-разворачиваемая платформа* является развитием облачной платформы и предоставляет вычислительную инфраструктуру, соответствующую программному обеспечению, которое устанавливается и развертывается на удаленных объектах,

например, оборудовании, производственных линиях, в цехах и даже на самостоятельных предприятиях, входящих в экосистему. В этом случае обеспечивается централизованно-децентрализованная система сбора и обработки информации, которая предполагает и автономную работу отдельных звеньев цепочки создания стоимости, и их интеграцию для координации совместной деятельности. Периферийно-разворачиваемая платформа обеспечивает наиболее гибкий формат создания и функционирования сетевых предприятий.

- Возможны и *гибридные бизнес-модели* создания сетевых предприятий на основе различных типов цифровых платформ.

Разнообразие различных типов цифровых платформ для создания сетевых предприятий обуславливает необходимость обоснования выбора механизма реализации цифровой платформы в зависимости от сложности цепочек создания стоимости и разработки детальных требований к программной реализации компонентов систем управления сетевыми предприятиями (системам Индустрии 4.0).

Метод исследования и средства реализации. Метод декомпозиции системы Индустрии 4.0

В соответствии с технологическими принципами построения цифровых платформ, изложенными в [23], структура цифровой платформы основана на принципе декомпозиции платформы на компоненты. Из компонентов формируются конкретные программно-технические конфигурации систем, поддерживающих деятельность конкретных цифровых, в том числе сетевых предприятий. При этом соблюдается принцип повторного или совместного использования компонентов, когда одни и те же компоненты могут использоваться для построения систем управления различными предприятиями либо без изменения, либо путем их адаптации. Причем платформы могут поддерживать продуктовые линейки внутри предприятия, а также между предприятиями в форме многосторонних взаимодействий.

В [23] определяется фундаментальная особенность архитектуры платформы – неизменность некоторых компонентов в течение всего срока службы платформы, в то время как другие компоненты динамически изменяются. Следовательно, платформа представляет собой набор устойчивых ограничений, или правил проектирования, которые управляют взаимосвязями между компонентами.

Для архитектуры цифровой платформы важным является не только описание общей структуры системы и распределенных по компонентам функций системы, но и представление ограничений, которые регулируют отношения между компонентами и позволяют им взаимодействовать друг с другом. При этом стандартизация интерфейсов между компонентами снижает как затраты на координацию, так и транзакционные издержки на формирование и обмен сообщениями между компонентами.

Рассмотрим реализацию перечисленных принципов и методов декомпозиции общей программно-технической платформы при формировании цепочки создания стоимости, в которой участвуют множество предприятий, входящих в бизнес-экосистему и образующих сетевое предприятие.

Цепочка создания стоимости в общем виде включает множество последовательно создаваемых и интегрируемых компонентов (узлов, деталей), производство которых может быть распределено между различными предприятиями, входящими в бизнес-экосистему на основе общей цифровой платформы. Цифровая платформа должна обеспечивать последовательность создания этих компонентов отдельными предприятиями и координацию их взаимодействия в процессе реализации цепочки. Очевидно, что каждому физическому компоненту (активу) в цепочке создания стоимости должен соответствовать программный компонент или программный агент, который будет реализовывать набор программных функций (сервисов), поддерживающих процесс создания физического компонента. Таких программных компонентов или программных агентов будет переменное число в зависимости от сложности изготавливаемого продукта и динамичности внесения изменений в конструкцию изделия. Вместе с тем, должно быть реализовано устойчивое небольшое число общеплатформенных сервисов, которые будут обеспечивать создание программных агентов, ведение общей информационной базы проекта, обмен сообщениями и координацию действий программных агентов.

В настоящее время представленная концепция организации цифровой платформы в наибольшей степени реализована в проекте Индустрии 4.0 в рамках поддержки i4.0-платформ и создаваемых на их основе i4.0-систем, определения которых стандартизированы в ГОСТ Р 59799-2021. В дальнейшем будем использовать метод i4.0-системы, которая вклю-

чает инфраструктурные компоненты платформы и функционально-ориентированные i4.0-компоненты и иные компоненты, связанные с отдельными звеньями цепочки создания стоимости. К таким системам относятся системы управления поставками, системы инновационного проектирования продукции и услуг, системы управления сложным производством, в общем случае системы управления сетевыми предприятиями. Определения i4.0-платформы, i4.0-компонентов, административных оболочек даны в глоссарии терминов в области Индустрии 4.0.

В качестве i4.0-компонентов обычно выступают продукты и их отдельные составные части, оборудование, производственные линии, фабрики (цехи), предприятия и связанные предприятия (сетевые предприятия), то есть i4.0-система может сама рассматриваться как i4.0-компонент в системах управления более высокого уровня.

В соответствии с определенными выше принципами построения цифровых платформ i4.0-платформа включает небольшое число универсальных программных компонентов или платформенных сервисов, которые обеспечивают функционирование инфраструктуры

i4.0-системы, и позволяет создавать и поддерживать переменное число функционально-ориентированных программно-технических компонентов (i4.0-компонентов), соответствующих отдельным компонентам цепочки создания стоимости. Структура i4.0-системы представлена на рисунке 1.

Административные оболочки выполняют функции цифровых двойников физических компонентов (активов) и по сути являются программными агентами этих физических компонентов [7]. В случае использования общей платформенной части для множества связанных в цепочку функционально-ориентированных компонентов получаем облачную архитектуру платформы. В случае тиражирования и/или конфигурирования платформенной части на отдельных предприятиях, участвующих в цепочке создания стоимости, получаем периферийно разворачиваемую платформу.

Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для построения сетевых предприятий

Для определения требований к типовому составу платформенных и функционально-

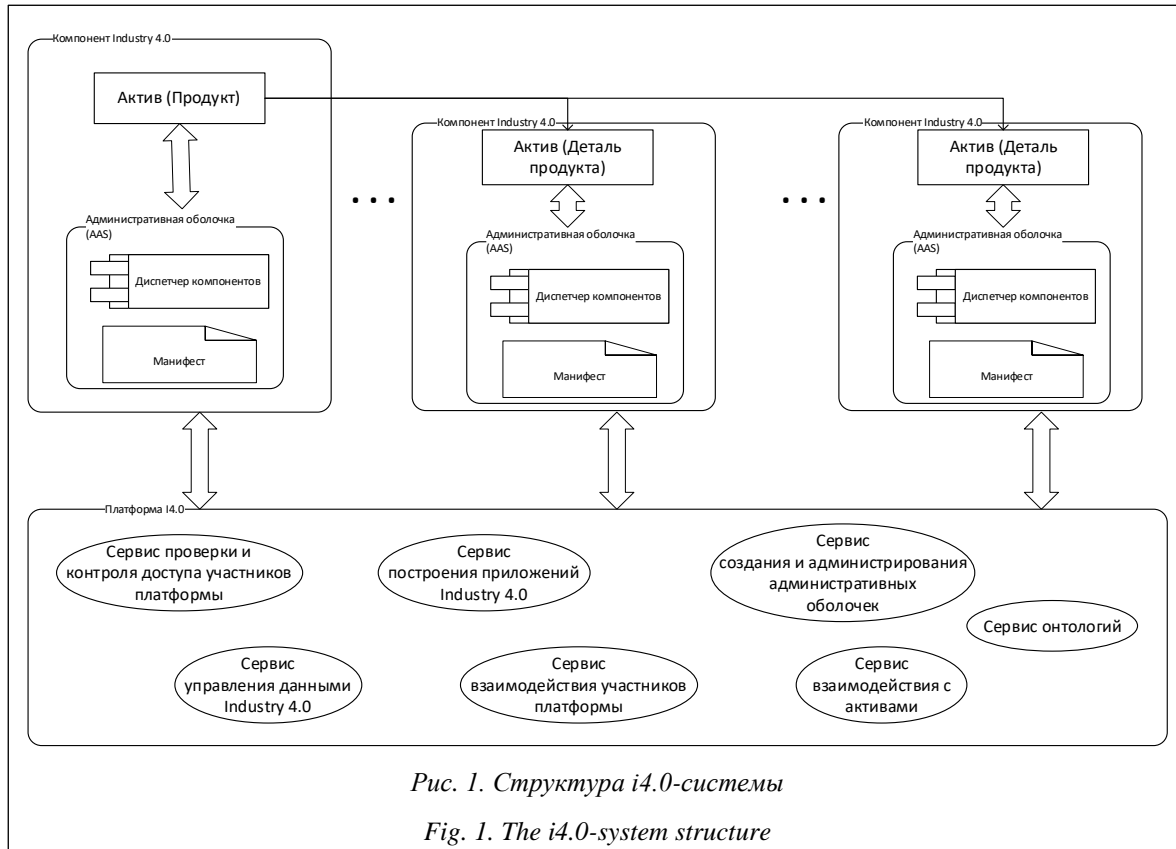


Рис. 1. Структура i4.0-системы

Fig. 1. The i4.0-system structure

ориентированных сервисов i4.0-системы необходимо рассмотреть ее архитектуру, которая хорошо представляется в эталонной модели (фреймворке) RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industrie 4.0) [11], как архитектуры, отражающей суть функционирования i4.0-системы с точки зрения представления трех измерений i4.0-компонентов: жизненного цикла компонентов, реализации различных аспектов функционирования системы и архитектурных уровней представления данных и функций. С позиции жизненного цикла продукции и услуг рассматриваются стадии создания и эксплуатации i4.0-компонентов, для продуктов – это стадии, связанные с проектированием типового продукта и с изготовлением единичных (штучных) продуктов. Аспекты функционирования i4.0-системы рассматриваются с точки зрения уровня вложенности элементов производственной деятельности: продукт (его компоненты), средство управления, оборудование, рабочие центры, предприятие, объединение предприятий (сетевое предприятие – авторский термин).

Архитектурные уровни i4.0-системы в соответствии с ГОСТ Р 59799-2021 определяют требования к их построению и реализации.

Бизнес-уровень определяет бизнес-требования к i4.0-компоненту (продукту или его составной части, другим компонентам) с точки зрения организационных, финансовых, правовых аспектов и ограничений на создание и эксплуатацию; определения правил моделирования связанных с i4.0-компонентом бизнес-процессов и требований к событийной цепочке создания стоимости – с точки зрения целостности всей цепочки.

Функциональный уровень отражает функции i4.0-компонентов относительно их роли в i4.0-системе. На этом уровне дается описание требований к платформе по горизонтальной интеграции функций, а также среды для реализации сервисов, процессов, приложений и технической функциональности i4.0-компонентов.

Информационный уровень представляет наборы данных, которые формируются и используются i4.0-компонентами для выполнения и координации ими функций по цепочке создания стоимости.

Уровень взаимодействия определяет организацию доступа к данным из взаимосвязанных i4.0-компонентов, методы обмена информацией между i4.0-компонентами с помощью протоколов обмена данными и форматов данных.

Уровень интеграции определяет способы взаимодействия в рамках отдельных i4.0-компонентов административных оболочек (AS) со связанными реальными физическими компонентами (активами), при этом определяются все необходимые человеко-машинные и машинные интерфейсы.

Физический уровень – уровень физических компонентов (активов) с включенными киберфизическими устройствами, позволяющими передавать и получать данные от AS.

Для представленных архитектурных уровней i4.0-системы необходимо провести детализацию требований к программной реализации с точки зрения ее разделения на платформенные и функционально-ориентированные компоненты.

Требования к программной реализации i4.0-платформы сетевого предприятия. Известно, что i4.0-платформа выполняет общесистемные функции по созданию, поддержанию и управлению i4.0-компонентами на всех стадиях жизненного цикла сетевого предприятия. Для общеплатформенных сервисов в соответствии с уровнями архитектуры i4.0-систем можно сформулировать следующие требования.

- На бизнес-уровне архитектуры i4.0-системы сервисы цифровой платформы должны выполнять правила идентификации и регистрации участников цифровой платформы, предоставления им прав доступа, защиты данных от несанкционированного доступа. Для проверки репутационных характеристик предполагаемых участников сетевого предприятия, связанной с оценкой финансовой устойчивости, добросовестности и рисков участия в совместной деятельности, i4.0-платформа может предоставлять специальные сервисы проверки экономической и информационной безопасности, основанные на анализе открытых информационных ресурсов в интернет-среде и реализации специализированных методов.

- На функциональном уровне i4.0-платформа должна предоставлять прежде всего инструментальные средства разработки приложений, которые становятся функциональными сервисами для i4.0-компонентов. На этом уровне поддерживаются библиотеки программной реализации различных методов и моделей, которые используются в создании функциональных приложений: структурного, математического, имитационного моделирования производственных и бизнес-процессов, планирования и управления ресурсами, аналитики данных.

Кроме того, на этом уровне необходимо иметь программные средства для создания административных оболочек и ведения их реестра.

- На информационном уровне i4.0-платформа должна предоставлять сервисы управления данными, обеспечивающие доступ как к общим структурированным и неструктурированным данным на внутреннем уровне, так и к открытым внешним информационным ресурсам. В качестве общих баз данных на этом уровне организуются базы данных и классификаторы продукции, предприятий, технологий, сервисов. Для организации взаимодействия участников сетевых предприятий для каждого проекта предоставляются средства создания и ведения проектного репозитория, позволяющие вести версии проектов и технологической документации. Также предполагается возможность создания и ведения референсных онтологий предметной области, определяющих концептуальную основу для совместной работы участников сетевых предприятий, в соответствии с особенностями и типами производства.

- На уровне взаимодействия i4.0-платформа должна обеспечить программную реализацию различных механизмов взаимодействия между i4.0-компонентами или программными агентами, формируя многоагентную интеллектуальную систему. Режимы взаимодействия i4.0-компонентов могут быть обмен файлами, инициируемый ответственным персоналом, и интерактивный доступ i4.0-компонентов друг к другу для организации обмена данными и вызова сервисов через API-интерфейсы (режимы «доска объявления», реализация сценариев взаимодействия и др.). В качестве механизмов защиты данных могут использоваться механизмы создания смарт-контрактов.

- На уровне интеграции с физическими компонентами i4.0-платформа должна поддерживать как человеко-машинный интерфейс с физическими объектами, так и возможность прямого обращения к ним i4.0-компонентов. На стадии проектирования продуктов в качестве физических объектов могут выступать имитационные модели этих компонентов. При наличии встроенных в физические объекты RFID-устройств должна быть организована обратная связь от активов к их административным оболочкам (цифровым двойникам). Соответственно, i4.0-платформа должна представлять набор стандартных протоколов обмена данными с физическими объектами.

Реализация представленных требований к набору платформенных сервисов обеспечивает эффективное выполнение функций поддержания инфраструктуры i4.0-системы в части управления участниками сетевого предприятия, функционально-ориентированными компонентами и их взаимодействием, информационными ресурсами и онтологиями, интеграцией с физическими объектами (активами).

Требования к программной реализации i4.0-компонентов сетевого предприятия. Данные требования во многом определяются спецификой производства или эксплуатации физических объектов (активов), которые управляются с помощью административной оболочки AS.

Типовая структура AS включает манифест, отражающий набор метаданных, предоставляющий информацию о функциональных и нефункциональных свойствах компонента Индустрии 4.0. и доступный извне, и диспетчер компонентов, предоставляющий средства автономного администрирования и доступа к ресурсам компонента Индустрии 4.0.

Декларируемые свойства в манифесте отражают состав объектов данных, формируемых и используемых в AS, и состав функций, которые должен выполнять i4.0-компонент. Обычно свойства i4.0-компонента группируются по частным подмоделям, отражающим, как правило, отдельные подсистемы компонента, например, для автомобиля это такие подмодели, как топливная, электрическая, двигательная и т.д. подсистемы.

Часть свойств могут быть обязательными для всех компонентов i4.0-системы, а часть – только для конкретных типов i4.0-компонентов. Для экземпляров i4.0-компонента могут добавляться необязательные свойства.

Свойства компонента могут ссылаться друг на друга внутри i4.0-компонента и на свойства других i4.0-компонентов, образуя семантические сети, как правило, реализуемые с помощью онтологий.

Диспетчер компонентов представляет по сути набор программных сервисов, с помощью которого выполняются функции:

- отслеживание состояния активов (физических объектов), запись данных о жизненном цикле;
- эксплуатационное управление собственным производственным процессом компании;
- проектирование и разработка физических компонентов;
- автоматизированный мониторинг процессов и обеспечение качества;

- поиск и сопоставление свойств физических компонентов;
- взаимодействие административных оболочек друг с другом и с физическими объектами.

С помощью обобщенной структуры административной оболочки i4.0-компонента можно реализовывать специфические требования с учетом особенностей прикладной области на различных уровнях.

На бизнес-уровне i4.0-компонента должны определяться бизнес-требования к исполнению компонента: по составу потребительских свойств на выходе, используемых компонентов на входе, срокам исполнения, особенностям правового регулирования. На этом этапе могут быть отражены особенности выполнения бизнес-требований на стадиях жизненного цикла: формирование и анализ требований, проектирование, производство, эксплуатация, сопровождение, утилизация. На этом уровне формируются идентификационные и технические характеристики i4.0-компонента.

На функциональном уровне i4.0-компонента отражается набор функциональных требований и методов их реализации, который должен выполнять компонент. Соответственно, здесь отражаются спецификации требований к выполнению функций на различных этапах жизненного цикла создания и использования компонента в виде функциональных данных и сервисов. На этом уровне задаются ссылки на внешние и внутренние информационные ресурсы. На этом же уровне определяются специализированные сервисы экономической и информационной безопасности.

На информационном, коммуникационном и интеграционном уровнях i4.0-компонента должны формироваться и использоваться операционные данные, составляющие содержание проектного и эксплуатационного репозитория, на основе которого определяются способы исполнения и улучшений производственных и бизнес-процессов.

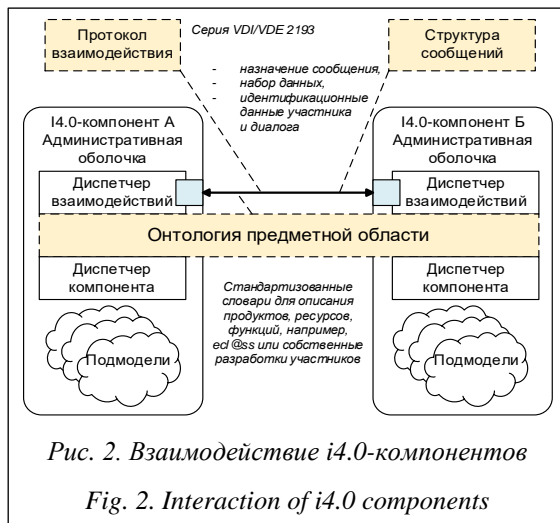
В результате выполнения перечисленного набора требований к программной реализации административных оболочек i4.0-компонентов достигается возможность построения достаточно сложных конфигураций цепочек взаимодействующих i4.0-компонентов, соответствующих динамично формируемым цепочкам создания стоимости. Для повышения семантической интероперабельности взаимодействия i4.0-компонентов необходимо использовать общую онтологию предметной области, поддерживаемую платформенными сервисами.

Требования к программной реализации взаимодействия i4.0-компонентов на основе онтологии сетевого предприятия.

Наиболее критичной задачей, решаемой в рамках i4.0-системы, является организация взаимодействия участников бизнес-экосистемы на основе цифровой платформы в процессе формирования и функционирования сетевого предприятия. Как правило, предприятия, устанавливающие взаимодействие друг с другом, обладают различными характеристиками выпускаемой продукции, отличающимися технологическими и ресурсными особенностями, которые обуславливают необходимость семантического сопряжения и выравнивания концептуальных моделей предметных областей. Кроме того, в процессе совместной деятельности эти концептуальные модели развиваются по мере развития самого проекта по созданию и производству выпускаемой продукции. В качестве инструментария семантического моделирования предметной области сетевого предприятия выступают онтологии. Их использование обусловлено необходимостью описания производственных сервисов [24], обеспечения взаимодействия i4.0-компонент [25, 26], а также функционирования интеллектуальных сервисов, связанных, например, с оценкой бизнес-процессов на соответствие требованиям [27] или с планированием работ по обслуживанию оборудования [28]. Вместе с тем решение задачи совместного использования и развития общей онтологии предметной области для обеспечения семантической интероперабельности компонентов масштабной i4.0-системы требует проведения всестороннего анализа различных аспектов деятельности и разработки соответствующих алгоритмов.

Рассмотрим типовую схему взаимодействия административных оболочек i4.0-компонентов [29] (рис. 2), на которой один компонент А с помощью диспетчера взаимодействия (части административных оболочек, отвечающей за информационный обмен между i4.0-компонентами) формирует запрос на выполнение определенных действий другим компонентом Б, обращаясь к онтологии (рис. 3).

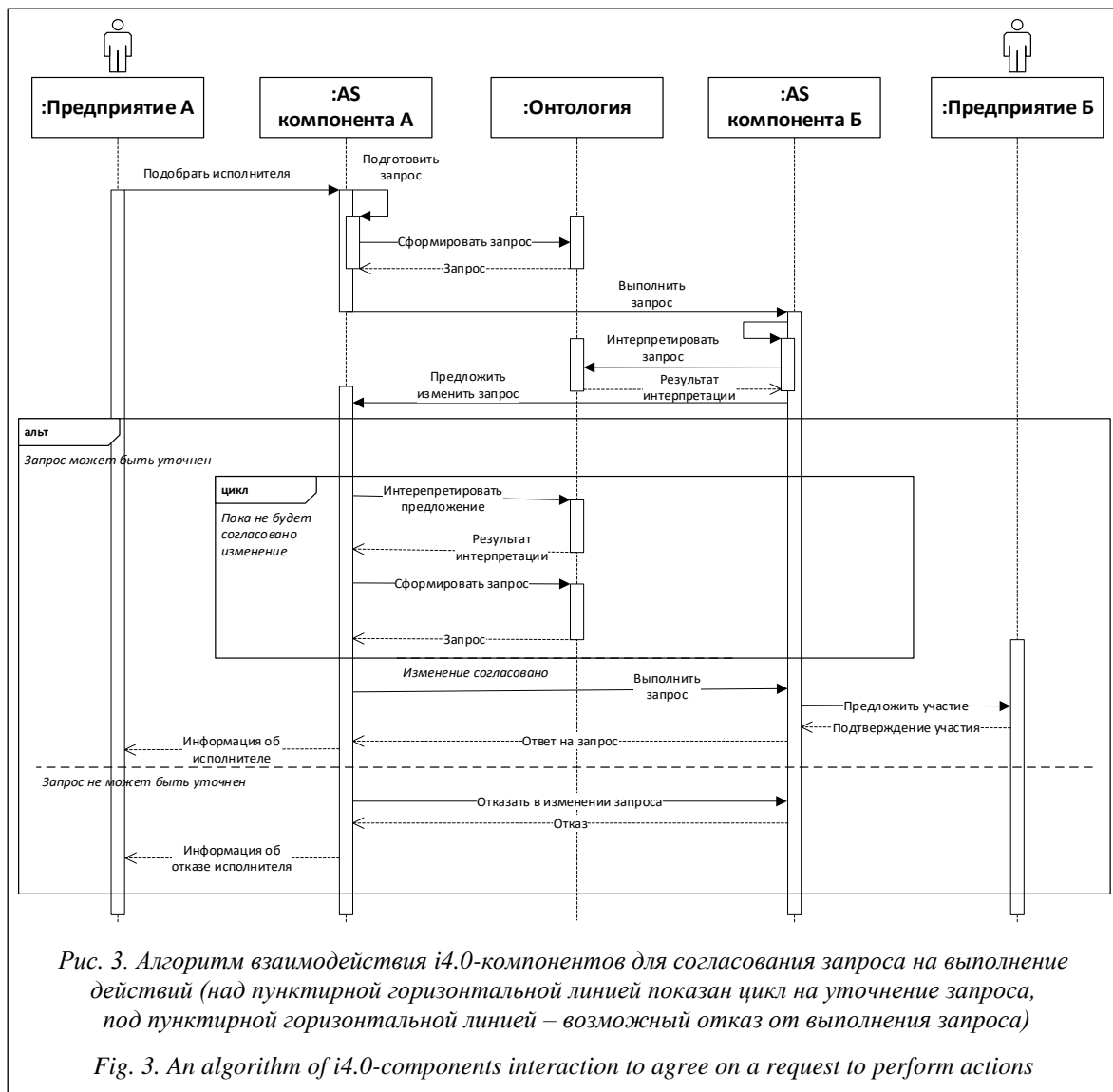
Для выполнения этих действий второй компонент Б должен сначала с помощью диспетчера взаимодействия проинтерпретировать поступивший запрос и затем передать управление диспетчеру компонента, который, в свою очередь, вызывает исполнение внутренних алгоритмов компонента для определения возможности выполнения запроса. В случае такой воз-



ние компоненту А о своей готовности выполнить работу и после подтверждения действий вызывает внутренние сервисы для выполнения соответствующей работы. В случае невозможности выполнения работы компонентом Б диспетчер взаимодействия компонента А интерпретирует отказ, диспетчер компонента А вызывает процедуры для модификации запроса на выполнение действий и описанный цикл взаимодействия этих i4.0-компонентов повторяется (рис. 3) или осуществляется поиск другого i4.0-компонента, который мог бы выполнить запрос.

Для реализации описанной схемы взаимодействия i4.0-компонентов требуется общая онтология предметной области, на которую должны быть организованы ссылки из взаимодействующих i4.0-компонентов. Тогда при интерпретации фрагмента онтологии, задейство-

возможности диспетчер компонента Б с помощью диспетчера взаимодействия посылает сообще-



ванного в запросе, на уровне экземпляров концептов в соответствующих подмоделях должно быть произведено сопоставление конкретных объектов данных и представлений функций. В случае полного совпадения запрос в дальнейшем выполняется. В случае несовпадения может быть организован переговорный процесс между двумя i4.0-компонентами об изменении характеристик запрашиваемых свойств (рис. 3), в ходе которого возможно также и изменение самой онтологии (рис. 4) в процессе уточнения конструкции продукта со стороны взаимодействующих участников сетевого предприятия.

В процессе согласования запроса на выполнение работы между взаимодействующими участниками сетевого предприятия с помощью i4.0-компонентов диспетчера компонентов могут вызывать дополнительные сервисы по оценке экономических рисков и рисков безопасности установления корпора-

тивных отношений партнеров. Для этого могут использоваться другие фрагменты онтологии, с которыми связаны открытые внешние информационные ресурсы о деятельности партнеров.

Заключение

Анализ подходов к трансформации бизнес-экосистем и бизнес-моделей сетевых предприятий показал недостаточную проработанность механизмов программной реализации систем управления сетевыми предприятиями в промышленности на основе построения цифровых платформ, что обуславливает необходимость формирования детальных требований к программной реализации компонентов цифровых платформ и создаваемых на их основе систем Индустрии 4.0.

В статье предлагается подход к программной декомпозиции систем управления сете-

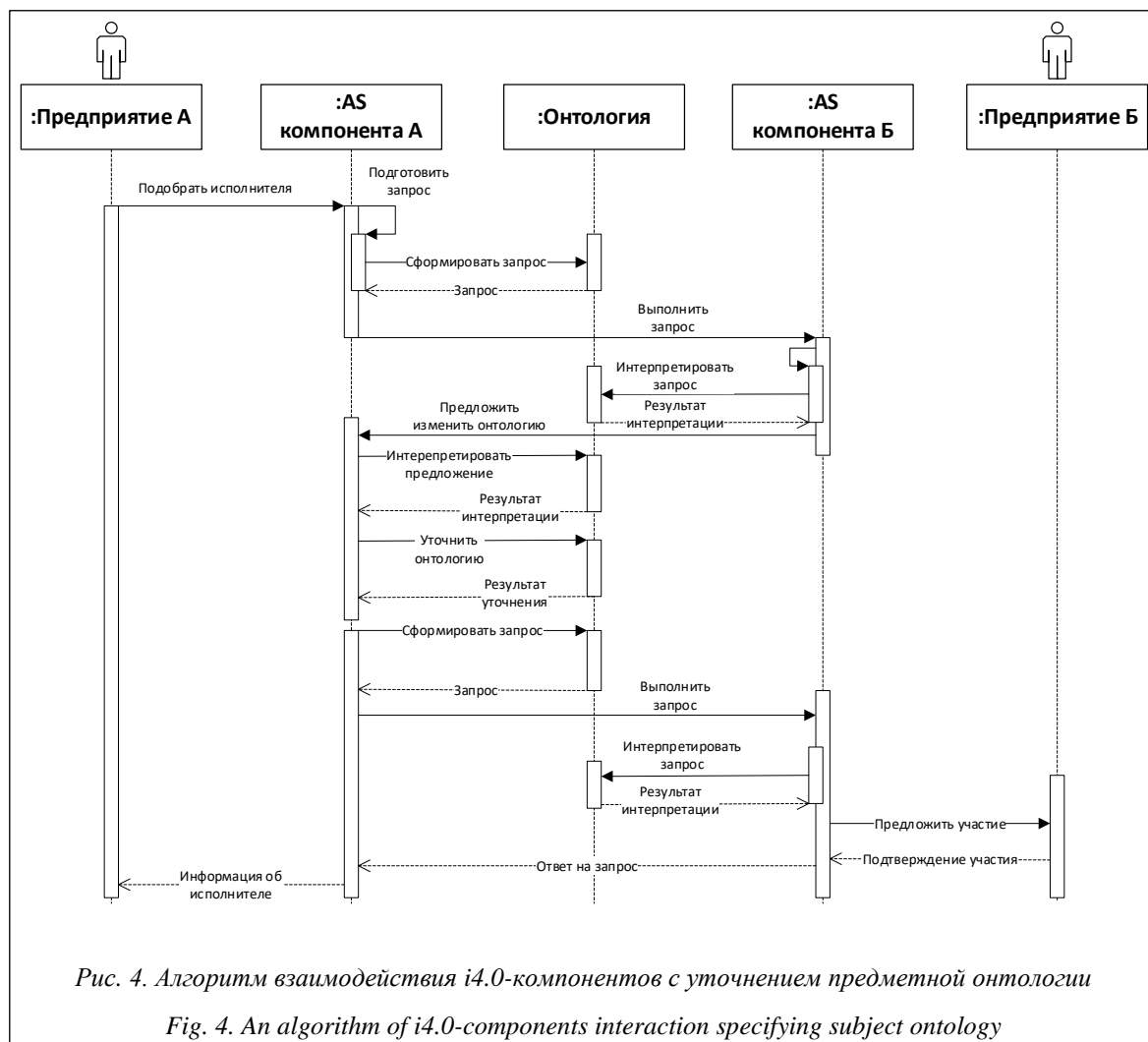


Рис. 4. Алгоритм взаимодействия i4.0-компонентов с уточнением предметной онтологии

Fig. 4. An algorithm of i4.0-components interaction specifying subject ontology

выми предприятиями на основе принципов построения и использования цифровых платформ Болдуина и Вударда, наилучшим образом реализуемых в концепции Индустрии 4.0, и уточняется применение метода декомпозиции систем Индустрии 4.0 для реализации инфраструктурных платформенных сервисов и сервисов функционально-ориентированных i4.0-компонентов.

Формулируются требования к программной реализации платформенных сервисов и сервисов функционально-ориентированных компонентов по уровням эталонной модели архитектуры систем Индустрии 4.0 RAMI. В результате формируется необходимый состав платформенных сервисов по управлению участниками сетевого предприятия, функционально-ориентированными компонентами и их взаимодействием, информационными ресурсами и онтологиями, интеграцией с физическими активами. Для функционально-ориентированных компонентов определяются требования к свойствам в виде наборов данных и функций, формируемым и используемым сервисами административной оболочки i4.0-компонента на различных уровнях архитектуры i4.0-систем. Новизна полученных результатов заключается в более четкой систематизации

сервисов платформенных и функционально-ориентированных компонентов в соответствии с архитектурными уровнями эталонной модели RAMI.

В качестве инструмента повышения семантической интероперабельности взаимодействия функционально-ориентированных i4.0-компонентов формируется требование по использованию онтологии предметной области. Предлагается алгоритм взаимодействия i4.0-компонентов на основе поэтапной реализации сценария согласования запросов на исполнение действий и имеющихся ресурсов исполнителя с использованием предметной онтологии. Новизна алгоритма заключается в возможности итерационного развития предметных онтологий в процессе согласования запросов и ресурсных возможностей.

Практическая значимость полученных результатов заключается в обеспечении гибкости конфигурирования i4.0-системы для создания и поддержания сетевого предприятия за счет реализации четкого разделения требований к функциям компонентов платформы и i4.0-компонентов, а также в возможности применения итерационно развиваемой предметной онтологии i4.0-системы для организации взаимодействия используемых i4.0-компонентов.

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

Литература

1. Industrie 4.0 – Digital Platforms in Manufacturing 2021. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digital-platforms-in-manufacturing-2021.pdf> (дата обращения: 26.08.2022).
2. Шеер А.-В. Индустрия 4.0. От прорывной бизнес-модели к автоматизации бизнес-процессов; [пер. с англ.]. М.: Дело, 2020. 272 с.
3. Lin S.-W., Murphy B., Clauer E., Loewen U. et al. Architecture alignment and interoperability. An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper. URL: https://www.iiconsortium.org/pdf/JTG2_Whitepaper_final_20171205.pdf (дата обращения: 26.08.2022).
4. Технет. Многоуровневая структура фабрик будущего. URL: <https://technet-nti.ru/article/fabriki-buducshego> (дата обращения: 26.08.2022).
5. Gerrikagoitia J., Unamuno G., Urkia E., Serna A. Digital Manufacturing platforms in the Industry 4.0 from private and public perspectives. Applied Sciences, 2019, vol. 9, no. 14, art. 2934. DOI: 10.3390/app9142934.
6. Шведов Л.А. Современное состояние и перспективы цифровизации российской промышленности // Экономика и предпринимательство. 2021. № 6. С. 246–249.
7. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.М., Данилов А.В. Технология проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг сетевого предприятия с использованием i4.0-системы, основанной на знаниях // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 76–92.
8. Matthyssens P. Reconceptualizing value innovation for Industry 4.0 and the Industrial Internet of Things. J. of Business & Industrial Marketing, 2019, vol. 34, no. 6, pp. 1203–1209. DOI: 10.1108/JBIM-11-2018-0348.

9. Müller J.M. Antecedents to digital platform usage in Industry 4.0 by established manufacturers. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 4, art. 1121. DOI: 10.3390/su11041121.
10. Феофанов А.Н., Бондарчук Е.Ю., Тясто С.А. Организация виртуального предприятия – будущее производства // *Вестн. МГТУ «СТАНКИН». Информатика, вычислительная техника и управление*. 2018. № 3. С. 101–105.
11. Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> (дата обращения: 26.08.2022).
12. Vajaj M., Hedberg T. System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing. *Proc. INCOSE Int. Symposium*, 2018, pp. 1626–1650. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
13. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления // *Радиопромышленность*. 2019. Т. 29. № 3. С. 68–78. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78.
14. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. М.: Технет, 2019. 58 с. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoinik.pdf (дата обращения: 26.08.2022).
15. Tarassov V.B. Enterprise total agentification as a way to Industry 4.0: Forming artificial societies via goal-resource networks. In: *Proc. ПТИ. AISC*, 2019, vol. 874, pp. 26–40. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_3.
16. Городецкий В.И. Многоагентная самоорганизация в B2B-сетях // *Матер. XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014*. 2014. С. 8954–8965.
17. Industrie 4.0. Discussion Paper: Usage View of Asset Administration Shell. URL: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.html> (дата обращения: 26.08.2022).
18. Cartus A., Both M., Maisch N., Müller J., Diedrich C. Interoperability of semantically heterogeneous digital twins through Natural Language Processing methods. *Proc. CLIMA*, 2022.
19. Segovia M., Garcia-Alfaro J. Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 14, art. 5396. DOI: 10.3390/s22145396.
20. Абдрахманова Г.И., Быховский К.Б., Веселитская Н.Н., Вишневецкий К.О., Гохберг Л.М. и др. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты. М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2021. 239 с.
21. Веселовский М.Я., Хорошавина Н.С. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях инновационной экономики. М.: Мир науки, 2021. 296 с. URL: <https://izdmn.com/PDF/ObMNNPM21.pdf> (дата обращения: 26.08.2022).
22. Zutshi A., Grilo A. The emergence of digital platforms: A conceptual platform architecture and impact on industrial engineering. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, vol. 136, pp. 546–555. DOI: 10.1016/j.cie.2019.07.027.
23. Baldwin C.Y., Woodard C.J. The architecture of platforms: A unified view. *SSRN Electronic J.*, 2008, no. 09-034, pp. 1–32. DOI: 10.2139/ssrn.1265155.
24. Ameri F., Urbanovsky C., McArthur C. A systematic approach to developing ontologies for manufacturing service modeling. *Proc. Workshop on Ontology and Semantic Web for Manufacturing at the VII Int. Conf. FOIS*, 2012, 14 p. URL: http://ceur-ws.org/Vol-886/paper_1.pdf (дата обращения: 26.08.2022).
25. Industrie 4.0. Details of the Asset Administration Shell – Part 1. URL: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf (дата обращения: 26.08.2022).
26. Belyaev A., Diedrich C. Specification "Demonstrator I4.0-Language" v3.0. Project: Industrie 4.0 Communication, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/334429449_Specification_Demonstrator_I40-Language_v30 (дата обращения: 26.08.2022).
27. Pham T.A., Le Thanh N. An ontology-based approach for business process compliance checking. *Proc. X Int. Conf. Ubiquitous IMCOM*, 2016, art. 56, pp. 1–6. DOI: 10.1145/2857546.2857603.
28. Cao Q., Samet A., Zanni-Merk C., de Bertrand de Beuvron F., Reich C. Combining chronicle mining and semantics for predictive maintenance in manufacturing processes. *Semantic Web*, 2020, vol. 11, no. 6, pp. 927–948. DOI: 10.3233/SW-200406.
29. Examples of the Asset Administration Shell for Industrie 4.0 Components – Basic Part. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/April/Asset_Administration_Shell/ZVEI_WP_Verwaltungschale_Englisch_Download_03.04.17.pdf (дата обращения: 26.08.2022).

Requirements for the software implementation of the Industrie 4.0 system for creating network enterprises

Yu.F. Telnov¹, *Dr.Sc. (Economics), Professor, Head of the Department, Telnov.YUF@rea.ru*

V.A. Kazakov¹, *Ph.D. (Economics), Associate Professor, Kazakov.VA@rea.ru*

A.V. Danilov¹, *Senior Lecturer, Danilov.AV@rea.ru*

A.A. Denisov¹, *Senior Lecturer, Denisov.AA@rea.ru*

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

Abstract. The digital transformation of enterprises based on the digital technologies leads to a radical change in business models and the formation of new organizational and production structures, which include network enterprises. Network enterprises as dynamically formed production structures in the business ecosystem that unite many enterprises participating in joint economic activity; in modern conditions they are based on digital platforms. Nowadays, an approach to building digital platforms is actively developing within the framework of the Industrie 4.0. The subject of the study is to determine the requirements for software implementation of Industrie 4.0 systems (i4.0 systems) based on digital platforms using multi-agent technologies and an ontological approach.

As a research method, the authors propose to use the method of decomposing the i4.0 system into platform software components and software administrative shells related to managing and functioning of network enterprise resources (assets) – i4.0 components. The reference architectural model of the Industrie 4.0 (RAMI 4.0) is chosen as the basis for building the architecture of the i4.0 system. It is proposed to use an ontological approach in order to implement multi-agent interaction of i4.0 components within the framework of building the value-added chain of a network enterprise.

The main results of the study are the formulated requirements for the software implementation of the i4.0 system with regard to the i4.0 platform software components formation and the software administrative shells of the i4.0 components at the levels of the RAMI architecture. As a software mechanism for the interaction of i4.0 components the paper proposes an algorithm for the i4.0-components interaction using a domain ontology.

The software implementation of the formulated requirements for constructing the i4.0 system architecture will increase the flexibility and efficiency of creating and functioning of value-added chains of network enterprises in the dynamically developing business ecosystem of industrial manufacturing of products and services.

Keywords: business ecosystem, digital platform, Industrie 4.0 system (i4.0-system), Industrie 4.0 platform (i4.0-platform), Industrie 4.0 component (i4.0-component), administrative shell (AS), RAMI architecture, requirements for the program implementation, domain ontology.

Acknowledgements. *The research has been financially supported by grant no. 22-11-00282 from the Russian Science Foundation.*

References

1. *Industrie 4.0 – Digital Platforms in Manufacturing 2021*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digital-platforms-in-manufacturing-2021.pdf> (accessed August 26, 2022).
2. Scheer A.-W. *Enterprise 4.0 – From Disruptive Business Model to the Automation of Business Processes*. Saarbrücken, AWSi Publ., 2018, 242 p. (Russ. ed.: Moscow, 2020, 272 p.).
3. Lin S.-W., Murphy B., Clauer E., Loewen U. et al. Architecture alignment and interoperability. *An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper*. Available at: https://www.iiconsortium.org/pdf/JTG2_Whitepaper_final_20171205.pdf (accessed August 26, 2022).
4. *Tekhneta. A Multi-Level Structure of the Factories of the Future*. Available at: <https://technet-nti.ru/article/fabriki-buduschego> (accessed August 26, 2022) (in Russ.).
5. Gerrikagoitia J., Unamuno G., Urkia E., Serna A. Digital Manufacturing platforms in the Industry 4.0 from private and public perspectives. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 14, art. 2934. DOI: 10.3390/app9142934.
6. Shvedov L.A. Current state and prospects of digitalization of the Russian industry. *J. of Economy and Entrepreneurship*, 2021, no. 6, pp. 246–249 (in Russ.).
7. Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V. Technology for designing innovative processes for creating products and services of a network enterprise using an i4.0 knowledge-based system. *Business Informatics*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 76–92 (in Russ.).
8. Matthyssens P. Reconceptualizing value innovation for Industry 4.0 and the Industrial Internet of Things. *J. of Business & Industrial Marketing*, 2019, vol. 34, no. 6, pp. 1203–1209. DOI: 10.1108/JBIM-11-2018-0348.

9. Müller J.M. Antecedents to digital platform usage in Industry 4.0 by established manufacturers. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 4, art. 1121. DOI: 10.3390/su11041121.
10. Feofanov A.N., Bondarchuk E.Yu., Tyasto S.A. The organization of a virtual enterprise – The future of production. *Vestn. MSUT "Stankin". Information Technology, Computer Science and Control*, 2018, no. 3, pp. 101–105 (in Russ.).
11. *Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> (accessed August 26, 2022).
12. Bajaj M., Hedberg T. System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing. *Proc. INCOSE Int. Symposium*, 2018, pp. 1626–1650. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
13. Minaev V.A., Mazin A.V., Zdiruk K.B., Kulikov L.S. Digital twins of objects in the solution of control problems. *Radio Industry (Russia)*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 68–78. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78 (in Russ.).
14. *Digital Twins in the High-Tech Industry*. Moscow, 2019, 58 p. Available at: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoynik.pdf (accessed August 26, 2022) (in Russ.).
15. Tarassov V.B. Enterprise total agentification as a way to Industry 4.0: Forming artificial societies via goal-resource networks. In: *Proc. IITI. AISC*, 2019, vol. 874, pp. 26–40. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_3.
16. Gorodetskiy V.I. Multi-agent self-organization in B2B networks. *Proc. 12th All-Russian Conf. on Management Problems VSPU-2014*, 2014, pp. 8954–8965 (in Russ.).
17. *Industrie 4.0. Discussion Paper: Usage View of Asset Administration Shell*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.html> (accessed August 26, 2022).
18. Cartus A., Both M., Maisch N., Müller J., Diedrich C. Interoperability of semantically heterogeneous digital twins through Natural Language Processing methods. *Proc. CLIMA*, 2022.
19. Segovia M., Garcia-Alfaro J. Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 14, art. 5396. DOI: 10.3390/s22145396;
20. Abdrakhmanova G.I., Bykhovsky K.B., Veselitskaya N.N., Vishnevskiy K.O., Gokhberg L.M. et al. *Digital Transformation of Industries: Starting Conditions and Priorities*. Moscow, 2021, 239 p. (in Russ.).
21. Veselovskiy M.Ya., Khoroshavina N.S. *Digital Transformation of Industrial Enterprises in an Innovative Economy*. Moscow, 2021, 296 p. Available at: <https://izdmn.com/PDF/06MNNPM21.pdf> (accessed August 26, 2022) (in Russ.).
22. Zutshi A., Grilo A. The emergence of digital platforms: A conceptual platform architecture and impact on industrial engineering. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, vol. 136, pp. 546–555, DOI: 10.1016/j.cie.2019.07.027.
23. Baldwin C.Y., Woodard C.J. The architecture of platforms: A unified view. *SSRN Electronic J.*, 2008, no. 09-034, pp. 1–32. DOI: 10.2139/ssrn.1265155.
24. Ameri F., Urbanovsky C., McArthur C. A systematic approach to developing ontologies for manufacturing service modeling. *Proc. Workshop on Ontology and Semantic Web for Manufacturing at the VII Int. Conf. FOIS*, 2012, 14 p. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-886/paper_1.pdf (accessed August 26, 2022).
25. *Industrie 4.0. Details of the Asset Administration Shell – Part 1*. Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf (accessed August 26, 2022).
26. Belyaev A., Diedrich C. Specification "Demonstrator I4.0-Language" v3.0. *Project: Industrie 4.0 Communication*, 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/334429449_Specification_Demonstrator_I40-Language_v30 (accessed August 26, 2022).
27. Pham T.A., Le Thanh N. An ontology-based approach for business process compliance checking. *Proc. X Int. Conf. Ubiquitous IMCOM*, 2016, art. 56, pp. 1–6. DOI: 10.1145/2857546.2857603.
28. Cao Q., Samet A., Zanni-Merk C., de Bertrand de Beuvron F., Reich C. Combining chronicle mining and semantics for predictive maintenance in manufacturing processes. *Semantic Web*, 2020, vol. 11, no. 6, pp. 927–948. DOI: 10.3233/SW-200406.
29. *Examples of the Asset Administration Shell for Industrie 4.0 Components – Basic Part*. Available at: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/April/Asset_Administration_Shell/ZVEI_WP_Verwaltungschale_Englisch_Download_03.04.17.pdf (accessed August 26, 2022).

Для цитирования

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.

For citation

Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V., Denisov A.A. Requirements for the software implementation of the Industrie 4.0 system for creating network enterprises. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 4, pp. 557–571 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.140.557-571.