

В. И. Городецкий, д-р техн. наук проф., vladim.gorodetsky@gmail.com,

Институт проблем управления РАН, г. Москва,

В. Б. Ларюхин, аспирант, vl@kg.ru,

Самарский государственный технический университет, г. Самара,

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., petr.skobelev@gmail.com,

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара,

Научно-производственная компания "Разумные решения", г. Самара

Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием¹ Часть 2. Цифровые сервисы²

Предлагается концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления производственными предприятиями в приближающуюся эпоху Industry 5.0, для которой будет характерно видение любого бизнеса, включая производство как сложной адаптивной системы управления, построенной на принципах самоорганизации и эволюции при тесном взаимодействии систем искусственного интеллекта и людей. В первой части рассмотрены принципы построения цифровой платформы, способной обеспечить поддержку функционирования предприятия этапа Industry 5.0 как цифровой экосистемы умных сервисов. В данной части статьи предлагается типизация сервисов цифровой платформы, перечисляется минимальный состав сервисов каждого типа и приводится описание их функционалов. Обосновывается ведущая роль мультиагентных систем как базовой архитектуры программного продукта и технологии разработки приложений цифровой платформы. Даются примеры разрабатываемых цифровых платформ и экосистем для управления грузовыми перевозками РЖД на принципах "юберизации", жизненным циклом сложных технических изделий, а также предприятиями отрасли растениеводства. Показывается, что результаты работы применимы для современных производственных корпораций и предприятий сельского хозяйства, проектных, консалтинговых и сервисных организаций.

Ключевые слова: кибер-физическое управление, самоорганизация, цифровая платформа, цифровая экосистема, мультиагентные технологии, сети агентов, системные сервисы, прикладные сервисы, внешние сервисы

Введение

Как было отмечено в первой части данной работы [1], практически уже около десятилетия основные глобальные тренды развития бизнеса, в частности в области производственных систем, определяются концепцией Industry 4.0, суть которой состоит в использовании цифровых методов и средств для интегрированного управления всеми компонентами предпри-

ятия. Но уже в ближайшей перспективе можно прогнозировать появление нового уклада, называемого Industry 5.0, более ориентированного на внедрение систем искусственного интеллекта (ИИ) и кооперации роботов и людей в практику производства [2].

Суть концепции Industry 5.0 по сравнению с концепцией Industry 4.0, как это видится в сообществе ИТ-специалистов, состоит в переходе от "цифровой вещи" к "умной вещи" и "автономной вещи".

Как отмечалось в первой части данной работы, в настоящее время совершается переход от отдельных приложений (англ. *Stand-Alone Application*) и решений масштаба предприятий (англ. *Enterprise-Ready Solutions*) к цифровым платформам будущего (англ. *Digital Platforms*). При этом целью цифровых платформ нового поколения (ЦП НП) становятся, прежде всего, эволюционное формирование и поддержка

¹ Статья подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках госбюджетной темы ИПУСС РАН "Разработка и исследование методов и средств аналитического конструирования, компьютерного представления знаний, вычислительных алгоритмов и мультиагентных технологий в задачах оптимизации процессов управления сложными системами".

² Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2019, Т. 20, № 6.

функционирования цифровых экосистем умных сервисов, построенных как автономные интеллектуальные системы (АИС) кибер-физического управления объектами реального мира, которые интегрируют в себе различные датчики и исполнительные механизмы, вычислительные и сетевые компоненты [3, 4].

В соответствии с развиваемой концепцией экосистемы умных сервисов в принципах построения такого рода систем разного масштаба — от отдельного предприятия до системы отраслевого или национального масштаба — не должно быть принципиальных различий. И это должно быть справедливо, идет ли речь об управлении структурой подразделений аэрокосмического предприятия или его отдельными сотрудниками, об управлении поездом и станцией в целом, локомотивом и вагоном в процессе грузоперевозок РЖД, об управлении агрономами и механизаторами и беспилотными роботами-комбайнами в сельском хозяйстве и т. п.

Главным отличием ЦП НП и управляемой ею экосистемы становится ориентация на взаимодействие, включая как кооперацию, так и конкуренцию указанных автономных вещей и предлагаемых ими сервисов, снабженных интеллектом для анализа ситуаций в реальном мире и в реальном времени, интеллектом для принятия решений и выработки планов, а также их согласования путем переговоров для разрешения конфликтов с себе подобными и людьми.

Целью работы в целом является описание предлагаемой концептуальной модели, базовых функций и сервисов ЦП НП предприятий этапа Industry 5.0. В первой части [1] введено понятие цифровой производственной экосистемы и описаны ее свойства, и на основании этого понятия сформулированы требования к ЦП НП, поддерживающей ее работу. Далее в данной работе вводятся понятия системных, прикладных и внешних сервисов ЦП НП в концепции Industry 5.0. В основе ее системных сервисов предлагается использовать сервисы абстрактной модели агентской платформы FIPA, однако модифицированных с учетом имеющегося многолетнего опыта их использования. Приводится описание состава и функций прикладных сервисов платформы, предназначенных для алгоритмической поддержки производственной экосистемы как адаптивной системы управления ресурсами в реальном времени, а также дается описание внешних сервисов и ресурсов. Приводятся примеры цифровых экосистем, которые в настоящее время находятся в процессе разработки. В частности, в числе таких примеров

рассматривается экосистема, предназначенная для управления жизненным циклом сложных технических изделий, система для управления грузовыми перевозками РЖД на принципах "юберизации", экосистема управления предприятиями отрасли растениеводства. Показывается, что результаты разработки применимы для современных производственных корпораций и предприятий сельского хозяйства, проектных, консалтинговых и сервисных организаций. В заключение резюмируются основные результаты работы.

Стандартные системные сервисы цифровой платформы

Стандартными системными сервисами будем называть сервисы ЦП, которые поддерживают связность абстрактной сети автономных объектов (отношение соседства на множестве всех пар ее узлов, представленных на сетевом уровне программными агентами), информацию об именах (иногда — и о адресах) узлов (агентов) сети и информацию о сервисах, которыми они обладают. Заметим, что это обычные функции системы, основанной на сервисах, однако их реализация может существенно зависеть от используемой технологии концептуализации, средств разработки и программной реализации.

Далее предполагается, что в качестве модели концептуализации и технологии разработки и программной реализации системы управления и ЦП предприятия будет использоваться модель и технология мультиагентных систем (МАС), поэтому имеет смысл использовать соответствующий задел из области абстрактной архитектуры агентской платформы МАС и МАС-технологий. Проанализируем стандартные функции (сервисы) платформы агентов, которая совместима с абстрактной архитектурой, предложенной FIPA [5, 6], рассматривая их как сервисы разрабатываемой ЦП.

Абстрактная архитектура FIPA реализует шесть базовых сервисов, описываемых ниже, которые практически без изменения можно рассматривать как сервисы, реализуемые ЦП НП предприятия.

1. *Сервис белых страниц.* Он включает в себя *директорий агентов* и *механизм поиска* агентов. Директорий агентов называют также *белыми страницами* агентской платформы. Он каждому агенту МАС ставит в соответствие его имя и адрес.

2. *Сервис желтых страниц.* Он также включает в себя два компонента, а именно *директорий сервисов*, доступных в МАС (*желтые страни-*

цы), он каждому сервису ставит в соответствие имя сервиса и список агентов, которые в состоянии его поставлять, а также *механизм поиска*, который реализует поиск сервисов и агентов, ими владеющих, по желтым страницам.

3. *Поддержка жизненного цикла агентов и сервисов.* Директории агентов и сервисов должны поддерживать ссылочную модель, которая фиксирует *создание* агента с соответствующими сервисами, его *регистрацию* (именование), *размещение*, *миграцию* и *уничтожение*, фиксацию информации о *доступности его сервисов*. Иначе говоря, эти компоненты фиксируют все элементы *жизненного цикла агентов* MAC и доступных в ней сервисов.

4. *Язык коммуникаций, поддерживаемый платформой.* Язык коммуникаций агентов должен предоставлять им средства для формального описания и интерпретации сообщений. В качестве стандартного языка в настоящее время принят язык ACL (от англ. *Agent Communication Language*), являющийся одной из основных составляющих стандарта FIPA. Могут использоваться также и другие языки, поскольку функции платформы строятся так, что они отделены от конкретной реализации языка коммуникаций.

5. *Транспорт сообщений.* Этот компонент ответственен за доставку сообщений, содержанием которых может быть, например, запрос на поиск сервисов и агентов, сервис, запрошенный агентом, компоненты сообщений, выполняющих функции координации поведения агентов MAC. К последним, например, относятся сообщения протоколов, управляющих исполнением *сценариев коллективного поведения агентов* и др. Описание компонента, ответственного за транспорт сообщений, должно даваться на таком уровне абстракции, который исключает описание особенностей, связанных с конкретными транспортными протоколами.

В спецификации абстрактной архитектуры платформы [5] перечисляются также те ее аспекты, которые в настоящее время не рассматриваются в абстрактной архитектуре FIPA, но должны быть в программной реализации конкретной платформы. К ним относятся:

6. *Аспекты, которые не могут быть описаны абстрактно*, например, некоторые компоненты жизненного цикла агента типа *старт*, *остановка*, *рестарт* и т. п., которые в различных программных системах и средах реализуются по-разному. То же самое относится и к обеспечению *безопасности агента*, к поддержке его мобильности и др.

7. *Аспекты, которые пока еще не готовы к стандартизации*, поскольку недостаточно понятны или недостаточно разработаны. Их

предполагается стандартизировать и разрабатывать их реализации по мере готовности.

8. *Аспекты, которые являются очень специфическими* и потому пока не нуждаются в стандартизации. К ним относятся обычно предметно-зависимые сервисы.

Заметим, что системные сервисы (функции) платформы, указанные в пунктах 6—8, должны быть проработаны более детально применительно к ЦП предприятия нового поколения.

Отметим также, что в FIPA-спецификации агентской платформы дано детальное описание функций компонентов абстрактной архитектуры, отношений между ними и другой информации, которая определяет все аспекты платформы. Описание этих функций дано в объектно-ориентированном стиле в терминах языка UML с использованием шаблонов проектирования, описанных, например, в работе [7], что делает процесс конкретной реализации этой архитектуры достаточно однозначным и понятным.

Недостатки существующих реализаций агентской платформы

В настоящее время индустриальная технология MAC, несмотря на активные исследования в период с начала 2000-х годов, переживает определенный кризис, возникший при попытках ее быстрого вывода из лабораторий для применения в промышленности и проявляющийся в выявленной высокой сложности и трудоемкости таких разработок для решения практических задач (на сегодня в промышленности известно о внедрении около трехсот таких систем). Можно утверждать, что сдвиг ИТ-парадигмы в область самоорганизации и эволюции не только ломает сложившиеся шаблоны разработки традиционно централизованных, иерархических, монолитных, жестких и последовательных ИТ-систем, но в ряде случаев напрямую противоречит существующим подходам, канонам и стандартам. Вместе с тем выявлен и ряд проблемных вопросов в применении первых промышленных MAC, связанных с феноменологией сложных адаптивных систем (порядок и хаос, неустойчивые равновесия, осцилляции, катастрофы и другие нелинейные эффекты) и др.

В этой связи в области MAC в настоящее время идет "перегруппировка", в рамках которой ряд базовых концепций MAC будет пересмотрен, что, прежде всего, касается существующих программных реализаций мультиагентных платформ. Этот факт нужно принимать во внимание при адаптации агентских

технологий и реализации системных и других сервисов ЦП НП производственной экосистемы, которые предлагаются в работе.

Остановимся кратко на упомянутых выше недостатках, акцентируя их влияние на агентскую реализацию ЦП.

Анализ недостатков агентских технологий, которые в настоящее время существенно сдерживают их широкое практическое применение, выполнен в работе [8]. Далее, следуя материалам этой работы, кратко характеризуются недостатки только тех аспектов технологии MAC, которые могут повлиять на технологию программной реализации ЦП НП предприятия.

1. *Отсутствие общепринятого понимания ключевых понятий MAC.* На это, например, указано в работе [9]. Отсутствие четких определений и соглашений по основным понятиям в области MAC сильно затрудняет взаимопонимание между исследователями и разработчиками. Специалисты в области MAC имеют различное понимание таких базовых понятий, как *агент, роль, переговоры, план, возможность*, и др. При этом реальная задача состоит в том, чтобы уточнить содержание этих базовых понятий и согласовать их взаимоотношения со сходными концепциями объектно-ориентированного программирования, которые используются для программирования агентов и MAC. Одним из путей решения данной проблемы является разработка базовых онтологий для предметно-независимых понятий, используемых в MAC.

2. *Отсутствие общепринятой нотации для представления моделей MAC* и их компонентов. Поскольку еще не существует общепринятых определений базовых агентских понятий и их взаимосвязей [9], то отсутствие общей нотации для их описания и описания отношений на их множестве затрудняет исследование и сравнение различных моделей MAC на практике. Необходимо разработать стандартизацию описания моделей агентов и MAC.

3. *Стандарты FIPA.* Вопрос о стандартах в технологии MAC стал темой исследований и разработок еще в середине 1990-х годов, когда была создана общественная организация FIPA, предназначенная для научного обоснования стандартов MAC-технологий. Но руководство FIPA продвигало в практику логическую модель *BDI*-агента и MAC, а потому эта же модель рассматривалась FIPA и в качестве базовой модели MAC при разработке стандартов. Например, стандартный язык коммуникации агентов *ACL* для описания содержания сообщений, которыми обмениваются агенты, использует весьма сложные языковые конструкции. Базисом для них послужил

логический язык *KQML*, который начали разрабатывать еще в 1970-е годы, когда он позиционировался как язык представления знаний в системах ИИ с исчислением предикатов в своей основе. Современная *ACL*-версия этого языка представляет собой достаточно мощный и выразительный язык интерпретирующего типа, манипулирующий понятиями онтологии и способный представлять содержание весьма сложных семантически насыщенных сообщений, которыми обмениваются агенты. Но он привносит в стандарт все черты логической модели *BDI*-агента со всеми вытекающими отсюда последствиями из-за проблем вычислительной сложности и большой загрузки каналов связи. Кроме того, он труден для понимания и использования разработчиками приложений, а свобода, которую язык *ACL* вроде бы предоставляет разработчикам в модификации компонентов синтаксической оболочки этого языка (так называемых перформативов), используется, главным образом, в исследовательском сообществе специалистов MAC.

На практике же в большинстве случаев оказывается возможным обойтись значительно более простыми специализированными языками. Примером такого специализированного языка является язык обмена сообщениями, принятый в сервере RoboCup [10]. Он использует только средства общения агентов, необходимые и достаточные для приложения, и поэтому весьма эффективен в реальном времени.

Совсем другой, тоже простой и прагматичный язык используется в модели MAC, предложенной сначала в инструментах компании *Magenta*, а затем развитый (теми же авторами) в инструментах Группы компаний "*Генезис знаний*" и НПК "*Разумные решения*" [11, 12]. В нем для представления текущих знаний используется онтологическая модель знаний и данных с моделью поиска в ней по схеме "снизу-вверх", т. е. от экземпляров понятий, описывающих ресурсы и потребности производственной системы. Эта схема оказывается хорошо приспособленной и для планирования использования ресурсов производства, и для управления ими в реальном времени совместно с агентской моделью реализации принципов самоорганизации на основе концепции сети потребностей и возможностей (ПВ-сети, [11]), и для реализации эффективных механизмов поиска ответов на запросы в различных случаях использования.

Еще одна модель обмена сообщениями, которая не следует стандартам FIPA, используется в программном инструментарии *Cougaar* [13], который разработан в США по проекту DARPA для использования агентских моделей и технологий в военных приложениях. В нем

обмен сообщениями поддерживается стандартной архитектурой доски объявлений, на которой агенты предлагают свои сервисы (доступные другим агентам как подключаемые модули) и ищут необходимые им сервисы по мере появления необходимости в них. При этом доска объявлений заметно расширяет множество доступных сервисов за счет веб-сервисов и *UDDI*-протокола. Эта возможность реализуется специальным компонентом доски объявлений, который называется *сервлет*. Он поддерживает коммуникации с объектами Интернет по *http*-протоколу, причем этот сервис доступен для использования всем подключаемым модулям узла.

Важно подчеркнуть, что модели агентов и МАС, предложенные в инструментах компании "Генезис знаний" и НПК "Разумные решения" в нашей стране и *Cougaar* за рубежом, оказались наиболее успешными в части промышленных разработок, хотя они и не используют стандартную платформу *FIPA* и язык *ACL*. Это говорит о том, что опыт МАС в построении агентской платформы, хотя и является достаточно ценным, но для его эффективного использования в ЦП производственной системы он требует существенного пересмотра и, возможно, модификации стандартов *FIPA*.

Заметим также, что *FIPA*-стандарты не рассматривают проблемы *параллельного программирования*, хотя этот аспект очень важен для МАС. Важен он и для ЦП предприятия, и эти вопросы придется решать при программной реализации.

4. *Недостаточная зрелость математических моделей и методов самоорганизации* для сложных объектов сетевой структуры. Это одна из существенных причин, затрудняющих разработку МАС-приложений. Модели самоорганизации и их реализация средствами МАС начали активно изучаться в научном сообществе лишь в самое последнее время [14–16].

Эти недостатки современных концептуальных и формальных аспектов МАС-технологий позволяют сделать вывод о том, что описанные выше сервисы стандартной агентской платформы, в частности, реализованные в модели платформы *JADE*, в любом случае нуждаются в новой формальной основе и в другой модели их программной реализации.

Некоторый опыт изучения возможных путей решения перечисленных проблем показывает, что одним из вариантов реализации сервисов ЦП может быть, например, использование языка *Scala* и его библиотек типа *Akka* [17], обеспечивающих большое число легких параллельных процессов для постоянно "вспыхивающих" переговоров агентов по разрешению конфликтов.

Прикладные и внешние сервисы цифровой платформы

Перечень прикладных сервисов ЦП производственной системы будет существенно зависеть от состава компонентов и архитектуры конкретного предприятия, а также от множества задач, которые в ней решаются. Тем не менее, можно выделить некоторые типовые прикладные сервисы, которые потребуются в большинстве прикладных систем в концепции цифровой экосистемы умных сервисов:

1. *Сервис создания и поддержки единого семантического пространства знаний и данных*. Цифровая экономика в концепции *Industry 4.0*, как уже отмечалось, базируется на принципах, аналогичных тем, которые заложены в концепции Интернета вещей. Однако в концепции *Industry 5.0* становится ведущей роль ИИ, который, по всей видимости, начнет внедряться как "дополненный интеллект" (англ. *Augmented Intelligence*) — по аналогии с входящей сегодня в жизнь дополненной реальностью (англ. *Augmented Reality*). Такой ИИ, скорее всего, будет строиться как "эмержентный интеллект" агентов, представляющих физические вещи и абстрактные понятия, а также людей и документы в виртуальном мире программ. Но такой ИИ невозможен без глубокой формализации знаний предметных областей, их стандартизации и развития механизмов здравого смысла в логике принятия решений агентами, иначе им будут приниматься слишком "сомнительные" решения. И такая задача уже поставлена Минобороны США на 3 млрд долларов уже в следующем году [18].

В связи с этим выскажем гипотезу о том, что "здравый смысл" будет состоять в достижении баланса интересов агентов (консенсуса), вовлеченных в каждую проблемную ситуацию и по различным критериям, в решение сложных задач через самоорганизацию агентов и формирование результата как не улучшаемого "конкурентного равновесия" ("устойчивое неравновесие" или "неустойчивое равновесие") [19].

Вместе с тем предприятие цифровой экономики является частным случаем кибер-физической системы (КФС), а все приложения КФС объединяет то, что несмотря на многообразие компонентов каждой ее прикладной версии и большое число таких компонентов в каждой версии (до десятков тысяч и даже более), они совместно решают множество задач, которое может со временем эволюционировать, например, за счет наращивания ее функционала. И как уже отмечалось выше, ЦП КФС, как и ЦП цифровой экосистемы предприятия, будет той программно-коммуникационной сре-

дой, которая интегрирует все ее компоненты в единую систему, способную решать заданное множество задач. По этой причине первый и, возможно, самый главный сервис такой ЦП НП — это *интеграция знаний и данных* системы в единое, не просто информационное, но и семантическое пространство знаний и данных с обеспечением единства понимания (интерпретации) в текущий момент времени всей используемой к ней терминологии, с поддержкой многоаспектности и целостности данных и знаний, к которым обращаются пользователи или программы.

Интересно, что осознание важности проблематики "семантизации" знаний и данных уже идет, причем именно там, где больше всего неопределенности, разнородности и т. д. В качестве примера можно привести европейский проект Synchronicity [20], в котором восемь крупных городов Европы пытаются построить общее семантическое пространство и приложения, работающие с данными на единой семантической основе, например, по транспорту или освещению улиц, вне зависимости от того, в каких структурах эти данные хранятся в каждом конкретном городе.

Можно уверенно утверждать, что *сервис создания и поддержки единого семантического пространства знаний и данных* является одним из ключевых для ЦП НП производственного предприятия.

Отметим, что требования к этому сервису ЦП НП производственного предприятия во многом могут отличаться от современных требований к онтологии данных и знаний в части поддержки целостности и многоаспектности онтологии знаний и данных, открытости информационного пространства к расширению его новыми знаниями и данными, например, о новых технологиях и потребных ресурсах, о новых компонентах организационной структуры предприятия и ее цифрового двойника и т. п.

По-видимому, отличия будут касаться также механизмов доступа к знаниям и данным в контексте разных аспектов и случаев использования. Например, в задачах планирования производственных ресурсов предприятия удачным оказывается вариант механизма поиска знаний и данных, который используется в платформе ПВ-сетей компании "Разумные решения". В этой платформе механизмы поиска организованы по схеме снизу вверх, т. е. от экземпляров "потребностей" (они формируют запрос на ресурсы) к экземплярам возможностей (экземплярам ресурсов, соответствующих запросам "потребностей"). Но в случае, когда предприятие реализует сборочное производство, для

него главными являются такие задачи, как поставка комплектующих на сборочные участки, оптимизация запасов деталей по номенклатуре и количеству, выбор поставщиков, логистика доставки комплектующих изделий в цепях поставок. В этой задаче важен механизм поиска по атрибутам деталей и сборочных единиц, что потребует иного метода поиска данных. Другой механизм поиска данных и знаний может оказаться наилучшим для задач финансового менеджмента предприятия и т. д.

По этой причине сервис использования знаний и данных единого информационного пространства в принципе следует рассматривать как отдельный прикладной сервис в общем множестве сервисов поддержки единого информационного пространства знаний и данных предприятия, который позволяет выбирать и формировать механизм поиска ответов на запросы в терминах понятий, атрибутов и примеров онтологии для различных случаев использования знаний и данных.

В этом же контексте можно рассматривать и сервисы, которые поддерживают основные компоненты процесса инжиниринга и модификации онтологий, сервис формирования и сервис использования единого информационного пространства знаний и данных. Однако эти непростые сервисы пока недостаточно проработаны в алгоритмическом отношении и требуют больших исследовательских усилий.

2. *Сервис виртуального рынка.* Еще одной особенностью ЦП НП предприятия по сравнению с платформой МАС является то, что в ЦП практически всегда параллельно решается множество разнообразных задач, которым нужно использовать одни и те же ресурсы и сервисы, которым требуются данные от одной и той же сенсорной сети, которым подходят одни и те же транспортные средства для поддержки различных технологических процессов и т. д. и т. п. Естественно, что в такой системе будут постоянно возникать конфликты в борьбе за ресурсы, всегда ограниченные. Но отличительной особенностью цифрового производства является тот факт, что в большинстве случаев все доступные в нем ресурсы являются *ресурсами общего пользования*, т. е. у этих ресурсов нет владельцев, а потому стандартной задачей ЦП НП производственного предприятия будет решение задачи планирования и распределения ресурсов на множестве потенциальных потребителей, причем, как правило, в реальном времени.

Практика показывает, что в производственных системах реальной сложности решение этой задачи возможно только с привлечением принципов самоорганизации на основе

концепции виртуального рынка и МАС. Более того, необходимость решения задач такого типа в процессе работы производственной системы возникает на постоянной основе. Это означает, что ЦП НП производственной системы должна *предоставлять сервис виртуального рынка*. Так же, как и сервис создания и поддержки единого семантического пространства знаний и данных, сервис виртуального рынка относится к числу типовых сервисов ЦП НП предприятия и представляется ее обязательным компонентом.

Известно, что один и тот же метод виртуального рынка не может быть подходящим для всех случаев. Например, есть своя специфика в транспортных задачах и в цепях поставок комплектирующих деталей для сборочного производства. Другие задачи могут потребовать использования, например, вариантов протоколов контрактных сетей или различных видов аукционов. Для распределения задач и ресурсов в задачах группового управления мобильными роботами, которые, например, реализуют полностью роботизированное сборочное производство, потребуется свой, еще более сложный механизм реализации виртуального рынка.

Один из вариантов такого виртуального рынка предложен и реализован в программной платформе компании "Разумные решения", где для поиска равновесий реализован метод сопряженных взаимодействий с предоставлением агентами друг другу компенсаций при ухудшении своего положения, что регулируется функциями удовлетворенности и бонусов-штрафов, определяющих индивидуальные интересы и характеристические особенности каждого экземпляра агента. Этот подход со специализированным механизмом поиска ответов за запросы демонстрирует один из возможных вариантов алгоритмизации сервиса виртуального рынка.

Хорошие возможности в развитии виртуального рынка предоставляет модель ПВ-сети, где каждая связь "потребность—возможность" фиксирует контракт в виртуальной валюте. В этом варианте виртуального рынка перспективным является использование технологий блокчейна, что особенно актуально в случае, если ресурсы принадлежат различным предприятиям. Совместное использование МАС-технологий и технологий блокчейна позволит создавать качественно новые инструменты экономики программных роботов (робономики [21]), например, в части развития принципов солидарной экономики, как это будет показано ниже на примерах разрабатываемых платформ.

Таким образом, на практике нужно иметь возможность использовать различные моде-

ли алгоритмизации виртуального рынка в зависимости от решаемых задач. И платформа должна их поддерживать как различные версии одного и того же типа сервисов.

3. *Сервис поддержки новых протоколов*. Практически все задачи цифрового производства в концепции Industry 5.0 решаются на основе взаимодействия его компонентов. В настоящий момент трудно предвидеть все разнообразие таких задач. Однако понятно, что в распределенной системе основным способом вычислений будут вычисления на основе взаимодействий, реализуемые автономными программными агентами по тем или иным протоколам. Поэтому представляется очень важной способностью ЦП НП предприятия к расширению множества протоколов, которые по отдельности или в некоторых комбинациях будут формировать новые сервисы ЦП НП. Можно говорить также о расширяемых библиотеках протоколов (распределенных алгоритмов), из которых пользователь сможет формировать сложные сценарии взаимодействия агентов для реализации специальных случаев использования ЦП НП.

4. *Сервис логирования процессов функционирования экосистемы для накопления данных о ее работе и сервис обработки накопленных данных для обнаружения новых знаний*. Как уже отмечалось выше, производственная система в концепции Industry 5.0 должна представлять собой цифровую экосистему, которая функционирует как распределенная адаптивная социотехническая "система систем" сетевой организации, обладающая свойствами самоорганизации, масштабируемости и устойчивого развития.

Основу ее информационного наполнения должны составлять знания, доступные всем компонентам производства через единое информационное пространство. База знаний и данных такой системы должна постоянно пополняться новыми знаниями, и средства решения этой задачи также должны быть в числе базовых прикладных сервисов ЦП НП. Новые знания должны не только вноситься пользователями, но и автоматически формироваться на основе опыта работы платформы.

В соответствии с современной концепцией накопления и обновления знаний в сложных системах основным источником новых знаний могут быть данные логов о процессах работы различных компонентов, подсистем и конкретных объектов производственной системы. Это утверждение следует из того, что реальная производственная система слишком сложна, чтобы можно было получить о ней достоверные, а тем более полные знания экспертным путем. Информация о взаимосвязях параметров управления и значений атрибутов

отдельных объектов с многочисленными показателями качества функционирования отдельных подсистем производства и производства в целом может быть получена только на основе машинного обучения с использованием данных, полученных экспериментально. И важность этих знаний очевидна, поскольку при их отсутствии представляется невозможным эффективно управлять совместно, например, технологическими и экономическими показателями производства.

Современная технология обработки больших данных имеет целью обнаружение в них указанных выше зависимостей. Эта задача должна решаться на постоянной основе в любой производственной системе концепции Industry 5.0, и ее поддержка — это задача комплекса сервисов ЦП НП, обеспечивающих создание подсистем логирования данных, их хранения, а также механизмов обнаружения закономерностей в накопленных больших данных с помощью сервисов машинного обучения и их использования для улучшения механизмов принятия решений.

5. *Подключение внешних сервисов и ресурсов.* Цифровая экосистема обязательно должна иметь доступ к богатым источникам сервисов и ресурсов, которые в настоящее время доступны благодаря облачным технологиям и технологиям Интернета вещей. В настоящее время имеются и практически используются различные программные инструменты доступа к облачным ресурсам и сервисам, которые должны быть интегрированы в ЦП НП и таким образом стать неотъемлемой частью ресурсов и сервисов, которые находятся в распоряжении предприятия.

То же самое относится и к внешним источникам онлайн-информации, которая собирается на постоянной основе внешними (по отношению к производственной системе) сенсорными сетями. Задача доступа к этой информации в настоящее время успешно решается с помощью программно-аппаратных интерфейсов, и в большей своей части эти интерфейсы стандартизированы. Сервисы ЦП НП должны обеспечить прозрачный доступ любого компонента производственной системы к этим данным наравне с доступом к облачным сервисам и ресурсам.

Другие требования к сервисам платформ, которые она должна поддерживать, будут определяться множеством случаев ее использования. Заметим, что число этих случаев использования может постоянно увеличиваться, и потому рассматриваемая ЦП должна будет фактически поддерживать расширяющееся множество протоколов реализации различных

случаев ее использования. К ним относятся, например, сервисы платежей и расчетов, сервисы обеспечения безопасности, сервисы восстановления системы при сбоях и в исключительных ситуациях — сервисы управления нагрузкой и ряд других.

Примеры применений

Рассмотрим кратко текущие применения разработанной концепции ЦП НП для разработок прикладных цифровых платформ различных назначений, проводимых при участии авторов данной работы.

1. *Цифровая платформа для управления грузоперевозками РЖД.* Одним из важных шагов в интеллектуализации управления в РЖД рассматривается реализация юбер-подобной технологии сквозного управления грузовыми перевозками. Целью этой разработки является построение открытой цифровой экосистемы, состоящей из набора АИС для распределенного управления полигонами, станциями, портами, поездами, локомотивами и бригадами машинистов, а также другими критически важными ресурсами инфраструктуры перевозок.

Архитектура проектируемой экосистемы, поддерживаемой цифровой платформой нового поколения, представлена на рисунке (см. вторую сторону обложки). Здесь желтым цветом выделены ключевые системные сервисы уровня ЦП НП, зеленым — прикладные сервисы цифровой экосистемы, а голубым — расширения сервисов ИИ. В этой архитектуре укрупненный план строится на основе анализа мощностей и пропускной способности, а оперативный — до уровня планирования конкретных экземпляров ресурсов. Между этими уровнями поддерживаются как вертикальные, так и горизонтальные переговоры для согласования принимаемых решений.

Предлагаемая сеть АИС совместного киберфизического управления указанными объектами, участвующими в выполнении грузовых перевозок, ориентирована на замену единой централизованной модели общего плана движения РЖД распределенным планом, состоящим из множества самосинхронизируемых по событиям планов отдельных подразделений РЖД, до уровня каждого локомотива и вагона и других ресурсов.

Предполагается также подключение интеллектуальных систем крупных заказчиков, например, угольных компаний, которые смогут динамически договариваться не только с РЖД, но и между собой о совместном использовании пустых вагонов с применением блокчейн-тех-

нологии, которая сможет гарантировать справедливость автоматически заключаемых по ситуации контрактов между агентами-участниками, чтобы, в частности, исключить движение пустых вагонов навстречу друг другу и повысить эффективность грузоперевозок.

Ожидаемый результат — рост клиенто-ориентированности РЖД, снижение расходов, повышение эффективности использования имеющейся инфраструктуры и т. д.

Учитывая тот факт, что в настоящее время РЖД выполняет значительную часть грузовых перевозок в стране, разрабатываемая система имеет перспективу масштабирования на уровень ЦП НП национальной мультимодальной транспортной системы грузовых перевозок.

2. Цифровая платформа нового поколения для управления разработками проектов НИОКР. Наряду с ЦП НП отраслевого и даже национального масштаба не менее важное значение приобретают ЦП НП для управления и одним предприятием, где цифровая экосистема может состоять из умных сервисов, реализующих управление бизнес-центрами и центрами знаний.

В этих целях на основе интеллектуальной системы Smart Projects [22] для поддержки принятия решений по управлению проектами НИОКР создается новая платформа по типу "проектного юбера" для управления сотрудниками подразделений с элементами виртуального рынка, где сотрудники подразделений "охотятся" за наиболее дорогостоящими задачами, а задачи "охотятся" за лучшими сотрудниками.

Сетецентрическая архитектура разрабатываемой системы, сходная с представленной на рисунке, но с заменой умных сервисов для управления инфраструктурой РЖД укрупненного и оперативного уровня на умные сервисы управления указанными выше центрами предприятия, между которыми также должны поддерживаться вертикальные и горизонтальные переговоры на основе протоколов r2r-взаимодействий. Создаваемая платформа имеет целью повысить оперативность, гибкость и эффективность выполнения задач проектов в общем пуле ресурсов предприятия.

В качестве перспективы рассматривается возможность масштабирования создаваемой платформы для работы по всему жизненному циклу сложных технических изделий, включая подключение смежников и умных сервисов для управления производством и цепочками поставок, а также эксплуатации создаваемых объектов.

3. Цифровая платформа для управления отраслью растениеводства. В этой разработке ведется разработка цифровой платформы для отрасли растениеводства, включающей АИС управле-

ния предприятиями растениеводства, к планам которых получают индивидуальный доступ АИС производителей удобрений и АИС поставщиков средств защиты растений, АИС транспортных компаний, АИС банковых и страховых компаний, АИС дронов и беспилотных комбайнов и других участников рынка растениеводства.

Несмотря на значительное отличие в предметной области, предлагаемая ЦП НП обладает той же сетецентрической архитектурой "системы систем" с вертикальными и горизонтальными r2r-взаимодействиями и близким набором системных и прикладных сервисов.

Заключение

В работе обоснована необходимость создания и сформулирована постановка задачи разработки ЦП НП, представлена общая концепция и состав базовых сервисов ЦП как основы цифровой экосистемы для управления предприятиями в приближающуюся эпоху Industry 5.0, которая фокусируется на использовании формализованных знаний как информационной основы процессов управления и применении методов искусственного интеллекта для принятия решений.

Структура таких систем включает в себя разнообразные, относительно автономные компоненты предприятия, объединенные в единую производственную систему сетевой структуры с горизонтальными и вертикальными взаимодействиями компонентов. Эти системы должны функционировать в едином информационном пространстве знаний и данных, обладать способностью обмениваться информацией, сервисами и ресурсами. В работе описано базовое множество системных сервисов, которые в состоянии поддержать такой стиль функционирования производственной системы. В основу системных сервисов предлагается положить аналогичные сервисы абстрактной архитектуры FIPA.

Предложены базовые прикладные сервисы, которые должны обеспечить:

- создание единого информационного пространства знаний и данных производственной системы и механизмы его непротиворечивого использования всеми ее компонентами;
- эффективные механизмы планирования использования ресурсов производственной системы и оперативного управления ими в реальном времени на основе сервисов виртуального рынка;
- поддержку расширяемой библиотеки протоколов и механизмов формирования сценариев различных встроенных механизмов об-

нарушения закономерностей в накопленных данных и машинного обучения механизмов принятия решений;

- поддержку сервисов логирования работы компонент системы, накопления и анализа данных, а также сервисов встроенных механизмов обнаружения закономерностей в накопленных данных и машинного обучения механизмов принятия решений;
- подключение внешних сервисов и ресурсов, в частности, облачных сервисов и источников онлайн-информации типа сенсорных сетей.

Материалы данной работы в целом рассматриваются ее авторами как концептуальная модель базовой отечественной цифровой платформы для создания цифровых экосистем производственных предприятий, предприятий сельского хозяйства, проектных, сервисных и других типов предприятий, заинтересованных в развитии и внедрении продуктов и технологий Industry 5.0.

Список литературы

1. Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием. Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 323–332.
2. Yes, Industry 5.0 is Already on the Horizon / MachineDesign. URL: <https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon> (дата обращения 20.01.2019).
3. Leitão P., Colombo A., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // Computers in Industry. 2016. Vol. 81. P. 11–25.
4. Leitão P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems // Proceedings of the IEEE. 2016. Vol. 104, N. 5. P. 1086–1101.
5. FIPA Abstract Architecture Specification / FIPA. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (дата обращения 21.01.2019).

6. FIPA P2P NA WG6. Functional Architecture Specification Draft 0.12 / FIPA. URL: <http://www.fipa.org/subgroups/P2PNA-WG-docs/P2PNA-Spec-Draft0.12.doc> (дата обращения 21.01.2019).
7. Gamma E., Helm R., Johnson J., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, 1995. 383 p.
8. Городецкий В. И., Бухвалов О. Л., Скобелев П. О., Майоров И. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем // Управление большими системами. 2017. Вып. 66. С. 94–157.
9. DeLoach S. A. Moving multi-agent systems from research to practice // International Journal Agent-Oriented Software Engineering. 2009. Vol. 3, N. 4. P. 378–382.
10. RoboCup Soccer Server. URL: <http://swarm.cs.virginia.edu/robocup/documentation/manual.pdf> (дата обращения 23.01.2019).
11. Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
12. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. WIT Press. London—Boston: WIT Press, 2014. 202 p.
13. Cougaar Agent Architecture / Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cougaar> (дата обращения 27.01.2019).
14. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 92–120.
15. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3. С. 102–123.
16. Ye D., Zhang M., Vasilakos A. Survey of Self-organization Mechanisms in Multi-Agent Systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2016. Vol. 47, N. 3. P.1–21.
17. Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Концептуальная модель и архитектура инфраструктурной компоненты системы группового управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1(14). P. 33–44.
18. Waters R. US Military seeks computers with common sense // Financial Times (дата обращения 14.06.2018).
19. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
20. EU project "Synchronicity" // SYNCHRONICITY. URL: <https://synchronicity-iot.eu/> (дата обращения 20.12.2018).
21. Autonomous Intelligent Robot Agent // AIRA. URL: <https://aira.life/ru/> (дата обращения 21.12.2018).
22. Skobelev P., Kozhevnikov S., Mayorov I., Poludov D., Simonova E. Smart Projects: Multi-Agent Solution for Aerospace Applications // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. WIT Press. 2017. Vol. 12, Iss. 4. P. 492–504.

Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital Services

V. I. Gorodetsky, vladim.gorodetsky@gmail.com,

Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

V. B. Laryukhin, vl@kg.ru,

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

P. O. Skobelev, petr.skobelev@gmail.com,

Institute for the Control of Complex Systems RAS, Samara, Russian Federation

SEC "Smart Solutions", Samara, Russian Federation

Corresponding author: Skobelev Petr O., D.Sc. in engineering, Professor,
Institute for the Control of Complex Systems RAS, Samara, SEC "Smart Solutions", Samara,
Russian Federation, e-mail: petr.skobelev@gmail.com

Abstract

The paper proposes conceptual model of a digital platform for cyber-physical management of manufacturing enterprises in the upcoming era of Industry 5.0, characterized by the vision of any business, including industrial production or logistics, as a complex adaptive system built on fundamental principles of self-organization and evolution, as well as interaction of artificial intelligence systems and people. The first part discusses principles of building a digital platform that can support operation of an enterprise within Industry 5.0 as a digital ecosystem of smart services. This part of the paper proposes typing of basic platform services, lists the minimum set of services of each type, and gives description of their functionality. It also substantiates the leading role of multi-agent systems as a basic software architecture and technology for developing applications of the digital eco-systems. The paper provides examples of digital platforms and ecosystems of smart services for management of cargo transportation of the Russian Railways on the principles of "uberisation", life cycle of complex technical products, as well as enterprises of the plant-growing industry. It is shown that results are applicable to modern industrial corporations and enterprises in industry and agriculture, logistics, design, consulting and service.

Keywords: cyber-physical management, self-organization, digital platform, digital ecosystem, multi-agent technologies, agent networks, system services, application services, external services.

Acknowledgements: The paper has been prepared based on the materials of scientific research within the subsidized state theme of the Institute for Control of Complex Systems of the Russian Academy of Sciences for research and development on the topic: "Research and development of methods and tools of analytical design, computer-based knowledge representation, computational algorithms and multi-agent technology in problems of optimizing management processes in complex systems".

For citation:

Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital services, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 387–397.

DOI: 10.17587/mau.20.387-397

References

1. **Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 323–332 (in Russian).
2. **Yes**, Industry 5.0 is Already on the Horizon / Machine-Design, available at: <https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon> (date of access: 20.01.2019).
3. **Leitão P., Colombo A., Karnouskos S.** Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges, *Computers in Industry*, 2016, vol. 81, pp. 11–25.
4. **Leitão P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A.** Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems, *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, no. 5, pp. 1086–1101.
5. **FIPA Abstract Architecture Specification / FIPA**, available at: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (date of access: 21.01.2019).
6. **FIPA P2P NA WG6.** Functional Architecture Specification Draft 0.12 / FIPA. available at: <http://www.fipa.org/subgroups/P2PNA-WG-docs/P2PNA-Spec-Draft0.12.doc> (date of access: 21.01.2019).
7. **Gamma E., Helm R., Johnson J., Vlissides J.** Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software, Addison-Wesley, 1995, 383 p.
8. **Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L., Skobelev P. O., Mayorov I. V.** *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*, 2017, iss. 66, pp. 94–157 (in Russian).
9. **DeLoach S. A.** Moving multi-agent systems from research to practice, *International Journal Agent-Oriented Software Engineering*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 378–382.
10. **RoboCup Soccer Server**, available at: <http://swarm.cs.virginia.edu/robocup/documentation/manual.pdf> (date of access: 23.01.2019).
11. **Vittikh V. A., Skobelev P. O.** *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).
12. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing complexity, WIT Press, London-Boston, WIT Press, 2014, 202 p.
13. **Cougaar** Agent Architecture / Wikipedia, available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cougaar> (date of access: 27.01.2019).
14. **Gorodetsky V. I.** *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2012, no. 2, pp. 92–120 (in Russian).
15. **Gorodetsky V. I.** *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 3, pp. 102–123 (in Russian).
16. **Ye D., Zhang M., Vasilakos A.** Survey of Self-organization Mechanisms in Multi-Agent Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2016, vol. 47, no. 3, pp. 1–21.
17. **Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L.** *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2017, no. 1 (14), pp. 33–44 (in Russian).
18. **Waters R.** US Military seeks computers with common sense, *Financial Times* (14.06.2018).
19. **Nicolis G., Prigogine I.** Self-organization in non-equilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations, Moscow, Mir, 1979, 512 p. (in Russian).
20. **EU project "Synchronicity"**, SYNCHRONICITY, available at: <https://synchronicity-iot.eu/> (date of access 20.12.2018)
21. **Autonomous Intelligent Robot Agent, AIRA**, available at: <https://aira.life/ru/> (21.12.2018).
22. **Skobelev P., Kozhevnikov S., Mayorov I., Poludov D., Simonova E.** Smart Projects: Multi-Agent Solution for Aerospace Applications, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. WIT Press, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 492–504.