

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 предприятием*

Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема

Предлагается концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления производственными предприятиями в приближающуюся эпоху Industry 5.0. В отличие от Industry 4.0, ориентированной на автоматизацию физических процессов, Industry 5.0 ориентируется на цифровизацию знаний и автоматизацию процессов мышления для создания искусственного интеллекта, управляющего предприятиями. Для этой еще только зарождающейся эпохи будет характерно видение любого бизнеса, включая промышленное производство или логистику, как сложной адаптивной системы, построенной на фундаментальных принципах самоорганизации и эволюции. Показывается, что реализация таких систем управления производством и логистикой потребует разработки новых моделей и методов принятия решений на основе знаний и семантической обработки информации, интеграции вычислительных и коммуникационных компонентов, накопления больших данных и их обработки для предсказательной аналитики, блокчейн-технологий фиксации взаимных обязательств компонентов системы в форме умных контрактов, а также человеко-машинных и программных интерфейсов. Анализируются существующие подходы к созданию цифровых платформ в концепции цифровой экономики этапа Industry 4.0 и их ограничения. Развивается концепция цифровой экосистемы как открытой, распределенной, самоорганизующейся "системы систем" умных сервисов, способных вырабатывать решения и автоматически разрешать конфликты на основе переговоров с уступками. Описывается концепция цифровой платформы этапа Industry 5.0, которая будет способна обеспечить поддержку функционирования цифровой экосистемы "умных сервисов" кибер-физического управления как отдельными объектами, так и целыми предприятиями людей и роботов, а в будущем — и отраслями таких предприятий, реализуемых с помощью самоорганизующихся автономных агентов на всех уровнях.

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

Введение

Практически уже около десятилетия основные глобальные тренды развития производственно-логистических систем определяются концепцией Industry 4.0, суть которой состоит в использовании цифровых методов и средств для интегрированного управления всеми ком-

понентами производства, включая АСУ технологическими процессами, ERP- и BI-системы и т. д. [1].

Однако на горизонте уже возникают основные черты совершенно нового уклада Industry 5.0, целиком ориентированного на внедрение систем искусственного интеллекта (ИИ) в управление производством и на сотрудничество и взаимодействие роботов и людей [2].

По оценке ведущей ИТ-консалтинговой компании (ИТ — от "информационные технологии") Gartner, в числе десяти самых перспективных трендов на 2019 г. (Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 [3]) главный тренд — это

*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".

"Автономные вещи" (англ. *"Autonomous things"*): "вне зависимости от того, идет ли речь о беспилотных машинах или роботах в сельском хозяйстве, автономные вещи будут использовать ИИ для выполнения задач, традиционно выполнявшихся людьми. Уровень "интеллекта" вещей будет различаться, но все эти "вещи" будут использовать интеллект для более органичного взаимодействия со средой" (перевод авторов). При этом Gartner рассматривает пять типов автономных вещей: роботы, беспилотные машины, дроны, бытовая техника и программные агенты. Автономность каждой вещи означает, что она способна ставить цели и решать задачи, реагировать на события и анализировать ситуацию во внешней среде, планировать свою работу и контролировать достижение целей. Автономные вещи постепенно завоюют четыре сферы: море, сушу, воздух и, что отмечается отдельно, цифровой мир, оперируя с разной степенью своими физическими и интеллектуальными возможностями, а также осуществляя все более разнообразную координацию поведения с себе подобными. Например, дрон для сельского хозяйства может кооперировать свои решения и действия как с человеком-ассистентом на земле, так и с полностью автономным роботом в поле. И, как следствие, главный вывод этой концепции состоит в том, что "кооперация автономных вещей, как, например, в рою дронов, становится главным драйвером будущего ИИ-систем" (перевод авторов).

Этот вывод показывает стремительный прогресс в эволюции видения будущего ИТ-систем в сообществе специалистов от "цифровой вещи" к "умной вещи" и далее — к "автономной вещи".

Можно ли говорить о тех же тенденциях, но в управлении современными предприятиями, и о направлениях развития пост-классических ERP-систем для поддержки этих тенденций? Что ждет нас дальше, за уже свершающимся переходом от отдельных приложений (англ. *Stand-Alone Application*) и решений масштаба предприятий (англ. *Enterprise-Ready Solutions*) — к цифровым платформам будущего (англ. *Digital Platforms*)? На каких принципах будут строиться такие платформы и каковы будут новые свойства создаваемых систем в рамках этих платформ?

Целью цифровых платформ нового поколения (ЦП НП) становятся, прежде всего, эволюционное формирование и поддержка функционирования открытых цифровых экосистем умных сервисов, построенных как автономные интел-

лектуальные системы (АИС) кибер-физического управления объектами реального мира, которые интегрируют различные датчики и исполнительные механизмы, вычислительные и сетевые компоненты [4, 5]. В принципах построения такого рода систем разного масштаба (от отдельного предприятия до системы отраслевого или национального масштаба) не должно быть принципиальных различий, идет ли речь об управлении структурой подразделений аэрокосмического предприятия или об управлении его отдельными сотрудниками, об управлении поездом или станцией в целом, локомотивом или вагоном в процессе грузоперевозок, об управлении агрономами и механизаторами или беспилотными роботами-дронами в сельском хозяйстве и т. п. Главным отличием ЦП НП становится ориентация на групповое взаимодействие, включая как кооперацию, так и конкуренцию указанных автономных вещей и предлагаемых ими сервисов, снабженных интеллектом для анализа ситуаций в реальном мире, принятия решений и выработки планов, а также их согласования путем переговоров для разрешения конфликтов с себе подобными и людьми в реальном времени.

Целью данной работы является описание разрабатываемой в настоящее время концептуальной модели, базовых функций и сервисов ЦП НП предприятий этапа Industry 5.0. Далее в разделе 1 обсуждаются цели и задачи ЦП НП, в разделе 2 рассматривается современное состояние исследований и разработок в области моделей и программных разработок ЦП НП предприятия с анализом вопроса о том, в какой степени на сегодня уже разработаны нужные архитектуры и механизмы функционирования такого рода платформ и имеются ли их коммерческие приложения. В разделе 3 поясняется понятие цифровой производственной экосистемы и рассматриваются ее свойства, из которых вытекают требования к ЦП НП, поддерживающей ее работу. Дальнейшая детализация состава сервисов ЦП НП и их классификация даются во второй части работы. В заключении резюмируются основные результаты первой части работы.

1. Цели и задачи цифровой платформы

Интеграция компонентов производственной системы — один из ключевых трендов Industry 4.0 для обеспечения взаимодействия ее подсистем, различных по своему устройству

и принципам работы, по их информационной совместимости в процессах обмена данными, по методам обеспечения безопасности и надежности передачи данных и т. д.

Однако разработанные модели и методы интеграции, в особенности в части использования моделей "ведущий—ведомый" (от англ. *master-slave*), как правило, далеко не всегда отражают реальные взаимосвязи между различными компонентами производственной системы, которые на практике оказываются много сложнее и динамичней.

В связи с этим в последнее время все большее развитие и применение находит концепция сложных адаптивных систем [6], в которой вместо тотальной централизации используется распределенное управление, предполагающее наличие множества локальных центров принятия решений, замену указаний "сверху-вниз" на переговоры равных сторон и т. д.

Действительно, что важнее для предприятия: производственный или финансовый план? Иногда производственный план диктует финансовый и заставляет брать кредиты для обеспечения производства, но иногда, наоборот, производство подстраивается под доступные финансовые ресурсы, т. е. решение всякий раз зависит от ситуации, которая при этом непрерывно меняется за счет различных непредвиденных событий, появляющихся в реальном времени. Примерами таких событий являются предложение нового крупного заказа, выход из строя какого-то оборудования или недоступность ранее имевшихся ресурсов, изменение стратегии развития предприятия, получение новых инвестиций и др. В этих условиях жесткое централизованное планирование становится неприемлемым ввиду его неэффективности.

В качестве одного из перспективных путей повышения эффективности современных предприятий в этих условиях рассматривается переход от централизованных, иерархических и монолитных схем управления предприятиями к сетям бизнес-центров и центров знаний [7, 8]. В этом варианте процессы управления неизбежно должны быть распределенными. В них каждое из подразделений производства должно координированным образом взаимодействовать с другими его подразделениями по принципам "каждый с каждым" и "равный с равным". Этот подход на деле означает переход к принципам сетецентрического управления, давно развиваемым и применяемым в военном деле, где

отсутствие координации и любые задержки и промедления могут иметь критические последствия для исхода боевой операции [9]. Переход к сетевым структурам, основанным на взаимодействиях и переговорах узлов сети для выработки, согласования, принятия и исполнения локальных и глобальных решений, а также прогнозирования и контроля последствий принятых решений, имеет целью обеспечить сквозную бесшовную работу всего предприятия как единого производственного организма (и, в будущем, целой отрасли).

В связи с этими изменениями во взглядах на модели управления предприятиями, что является закономерной реакцией на возрастание сложности, на неопределенность и динамику бизнеса, постепенно начинают меняться и модели цифрового производства, в которых все шире используются сетевые организационные структуры. В этих структурах производство рассматривается как сеть взаимодействующих относительно автономных компонентов, ответственных за выполнение своих частей общего распределенного бизнес-процесса, которые выполняются ими не только на основе своих знаний, с использованием своих технологий и ресурсов, в первую очередь, финансовых и материальных (станков, роботов, вспомогательного оборудования и своего персонала), но также и за счет обмена сервисами, ресурсами, знаниями и данными с другими автономными компонентами производственного процесса.

Характерно, что подобное сетевое представление рассматривается для производственных предприятий произвольного масштаба и уровня вложенности. Например, для крупного предприятия в качестве компонентов такой сети (ее узлов) могут выступать отдельные цеха и логистические подразделения разного назначения, подразделения, ответственные за снабжение предприятия теплом и электроэнергией, ремонтные бригады, службы охраны, финансовые службы, подразделения, ответственные за работу с персоналом, и другие вспомогательные и управляющие подразделения предприятия. Аналогичные сетевые модели рассматриваются также и применительно к предприятиям малого и среднего бизнеса и к их объединениям в виртуальные сетевые производства, например, в сетевые B2B-производства, в сетевые предприятия многомодальной транспортной логистики и т. д. Естественно, что компоненты таких сетей, в свою очередь, тоже могут иметь

сетевую структуру. Заметим, что это представление органично согласуется с концепцией жизнеспособной системы С. Бира [10], которая, по его мнению, должна иметь именно сетевую структуру с самоподобием ее компонентов на разных уровнях иерархии (производственное объединение — как сеть КБ и заводов, завод — как сеть цехов, цех — как сеть участков, участок — как сеть станков и людей).

Однако на практике реализация цифрового производства такой организационной структуры и согласованное функционирование его подразделений может быть достигнуто, если все его разнородные компоненты функционируют в единой информационно-коммуникационной среде исполнения, которая способна поддерживать их программную совместимость, совместимость по данным и взаимодействие хотя бы на уровне передачи данных или вызовов через программные интерфейсы (пока здесь не идет речь о действительно согласованном взаимодействии через переговоры и уступки или встречные предложения систем). В настоящее время такую среду принято называть цифровой платформой (ЦП).

Но описанный взгляд на ЦП и ее функции, который отражает потребности *современного* цифрового производства, представляется достаточно ограниченным. Такая ЦП будет, например, не в состоянии обслуживать потребности сетевого производства с адаптацией к событиям реального времени, о которых шла речь выше. В соответствии с современными представлениями ЦП нового поколения должна быть интеллектуальным и организующим ядром производственного предприятия. Она должна трансформировать предприятие в сеть автономных интеллектуальных компонентов, функционирующих как единая система за счет упомянутой выше согласованности действий. Она также должна быть способна реагировать на события, обеспечивать адекватное событиям планирование ресурсов и координацию поведения подразделений предприятия (узлов его сетевой организации), доводить построенные планы до сотрудников предприятия и контролировать их исполнение, т. е. работать в соответствии с известным в менеджменте циклом Деминга "Планируй—Исполняй—Анализируй—Корректируй" [11]¹.

¹Другими словами, обеспечить управление производством с использованием обратной связи по событиям.

Создание ЦП НП (далее для краткости просто ЦП) с такими возможностями становится одной из ключевых целей цифровой экономики в концепции Industry 5.0, в которой ЦП предприятия — это открытая программно-аппаратная среда согласованного взаимодействия систем ("система систем"), которая интегрирует множество автономных компонентов предприятия, их знания и данные, их сервисы и ресурсы в единую сетевую модель кибер-физической системы, узлы которой обладают встроенными управляющими, вычислительными и коммуникационными возможностями.

Такая ЦП предприятия должна быть способна:

- "погрузить" все компоненты производственной системы в единое информационное, а далее — и в семантическое пространство знаний и данных с обеспечением необходимых пользовательских и программных интерфейсов;
- обеспечить совместимость компонентов производственной системы по информации и управлению, что необходимо для поддержки их взаимодействия в процессах кооперации, координации и принятия согласованных решений;
- обеспечить узлы сети набором стандартных сервисов для решения не только задач учета, как это преимущественно реализуется сейчас, но и задач распределения, планирования, оптимизации и контроля использования ресурсов в реальном времени при выполнении разнородных распределенных бизнес-процессов производства;
- предоставлять узлам сети дополнительные ресурсы, например, вычислительные ресурсы, когда это необходимо;
- обеспечивать узлы сети доступом к облачным ресурсам и сервисам, а также к внешним источникам информации, например, к данным, собираемым сенсорными сетями общего назначения в режиме реального времени;
- предоставлять компонентам сети единую среду исполнения программ и протоколов их взаимодействия.

Обратим внимание на то, что приведенное описание общего назначения и функций ЦП никак не затрагивает внутреннюю структуру, функции, а также конфиденциальные данные и знания отдельных узлов сети. И это важно для того, чтобы, во-первых, обеспечить необходимый уровень абстракции архитектуры и функций ЦП по отношению к предметным особен-

ностям приложений, которые обслуживаются платформой, во-вторых, принять во внимание и поддержать автономность конфиденциальных данных, знаний, ресурсов и функций, которые не должны быть "видны" на уровне сетевой организации предприятия, и, в-третьих, обеспечить возможность повторного использования компонентов ее программной реализации.

2. Состояние исследований и разработок в области цифровых платформ

В литературе можно найти довольно обширную информацию о моделях, архитектурах и программно-аппаратных реализациях ЦП предприятий, но большая их часть, по существу, отвечает концепции Industry 4.0 или, что еще проще, не выходит за рамки классических ERP- и BI-систем.

Так, в текущей программе ЕС Horizon 2020 около 10 крупных проектов посвящены непосредственно исследованиям и разработкам различных аспектов ЦП для предприятий в рамках концепции Industry 4.0. Обзор этих проектов и полученных в них результатов имеется, например, в работах [12, 13]. В этих проектах основное внимание уделяется роли ЦП как *интегратора* знаний и данных различных предприятий в B2B-производственной сети для обеспечения их информационной и программной совместимости. Другие задачи, возлагаемые на ЦП, детально в рамках указанной программы пока не ставятся.

Один из вариантов архитектуры и функций новой платформы в концепции Industry 4.0 для B2B-производственных предприятий предложен в работе [14]. В ней сформулированы основные функции (сервисы) ЦП для B2B-производственной сети, архитектура ЦП и возможные решения в части ее программной реализации. В качестве стандартных инфраструктурных сервисов этой платформы указаны:

- коммуникационный сервис, обеспечивающий каналы связи, отправку и маршрутизацию сообщений, которыми обмениваются узлы производственной сети, и поиск узлов сети (агентов) и сервисов, которыми они обладают;
- средства поддержки ее открытости для подключения новых компонентов сети;
- сервис, обеспечивающий информационную совместимость компонентов производственной сети, а также

- сервис поддержки стандартных протоколов взаимодействия узлов сети в различных задачах и случаях использования сетевой модели B2B-производства.

Все эти сервисы, безусловно, необходимы для реализации базовых функций ЦП нового поколения, однако их оказывается недостаточно. В последние годы предложено несколько более общих концепций управления объектами сетевой структуры, частным случаем которых является сетевая производственная система, исследуемая в данной работе.

Одна из таких концепций — это концепция Интернета вещей (англ. *Internet of Things, IoT*), другая — это концепция кибер-физической системы (КФС). Парадигма IoT рассматривает приложение как сеть относительно автономных узлов, обладающих встроенными измерительно-управляющими, вычислительными и коммуникационными возможностями. Она имеет целью расширение доступных ресурсов и сервисов приложения, в частности, сервисов, доступных производственной системе, за счет облачных технологий и внешних источников информации типа сенсорных сетей в реальном времени. Парадигма КФС [4, 5], если говорить упрощенно, имеет целью обеспечить более эффективное, более адаптивное и более устойчивое управление сложной системой, в частности, производством, за счет использования ее так называемых "цифровых двойников" (компьютерных моделей объекта и системы управления), которые эксплуатируются параллельно с реальными программно-аппаратными компонентами системы и используются для анализа текущих ситуаций в реальном времени, построения планов действий и предсказания последствий и рисков принимаемых управленческих решений².

Для примера можно представить себе летящую в космосе Международную космическую станцию, а на Земле — "летящую" в моделирующей среде ее компьютерную модель, зеркально отражающую актуальное состояние станции по основным измеряемым параметрам. Такую модель "цифрового двойника" можно использовать как для выработки оперативных управляющих воздействий, так и моделирования и прогнозирования ситуаций по прин-

²Кибер-физические системы можно считать обобщением и развитием систем концепции IoT.

ципу "Что будет, если?". Заметим, что следует отличать "цифрового двойника" от "цифровой тени", представленной данными об объекте, не позволяющими моделировать различные ситуации и оценивать последствия. Можно уже говорить и об умном "цифровом двойнике", если компьютерная модель объекта еще и изменяется и эволюционирует во времени, реализуя принцип "томагочки" (например, в сельском хозяйстве интеллектуальная система управления должна иметь встроенную модель развития растения как объекта управления).

К сожалению, в настоящее время в научной и технической литературе проблема построения ЦП для сетевых объектов управления типа IoT и КФС развивается в достаточно узком понимании, в котором основное внимание уделяется интерфейсным средствам сопряжения аппаратных компонентов объекта (сенсоров, например) и его программной части. Эти разработки носят сугубо прикладной характер на уровне стандартных программных или веб-интерфейсов и потому не решают проблему построения ЦП предприятия в концепции Industry 5.0.

Среди существующих программно-коммуникационных сред сходного назначения ближайшим аналогом ЦП предприятия является платформа программных агентов, для которой имеются стандарты абстрактной архитектуры (англ. *Reference Model*) в централизованном и распределенном (p2p) вариантах, разработанные FIPA, и несколько их программных реализаций [14–17]. Упомянутое выше сходство не случайно, поскольку мультиагентная система (МАС), например, реализующая задачи управления B2B-производственной сетью или групповой работой мобильных роботов, в ограниченном варианте играет практически ту же роль и выполняет те же функции, что и ЦП производственной системы. По этой причине имеющийся многолетний опыт создания и практического использования платформ МАС является очень полезным, и его, несомненно, следует использовать при разработке ЦП предприятия. Отметим в связи с этим работу [18], в которой МАС рассматриваются уже для реализации механизмов межоблачных взаимодействий.

Среди агентских платформ следует, прежде всего, упомянуть платформу JADE (от англ. *Java-Agent DEvelopment Framework*), для которой благодаря использованию концепции открытого кода (англ. open source) разработано много полезных программных инструментов [19].

Более того, имеются разработки, в которых платформа JADE рассматривается в качестве варианта для реализации ЦП в концепции самоорганизующихся сетей агентов [14–16].

Однако платформа JADE, хотя и имеет индустриальный уровень разработки и реализации, обладает рядом существенных недостатков, которые делают невозможным ее непосредственное использование в качестве ЦП для цифрового предприятия. Во-первых, она медленно работает в условиях интенсивного обмена сообщениями, поскольку каждое сообщение на этой платформе проходит многоэтапную обработку: сначала работает интерпретатор языка обмена сообщениями ACL, генерирующий Java-код, затем генерируется bite-код и далее — исполняемый код. В то же время обмен сообщениями — это базовая и интенсивно используемая функция сетевого объекта вообще и ЦП производственной системы — в частности. Во-вторых, JADE поддерживает только диалоги между распределенными сущностями, и она не рассчитана на реализацию сложных многосторонних протоколов, использование которых — это обычная функция технологии взаимодействия, поддерживаемой ЦП. Имеются также и другие проблемы использования платформы JADE в качестве прототипа ЦП предприятия нового поколения.

3. Концепция цифровой экосистемы

В работе рассматривается возможность создания нового поколения распределенных интеллектуальных систем управления предприятиями в концепции Industry 5.0, построенных как многоуровневые сети автономных интеллектуальных сервисов поддержки принятия решений, способных к взаимодействию и согласованию решений для повышения эффективности бизнеса³.

Принципиально новый подход к созданию таких систем оказался возможным благодаря появлению концепции *цифровых экосистем*.

³Напомним, что, в то время как Industry 4.0 фокусируется на автоматизации технологических процессов, интеграции систем и агрегации данных, а также их визуализации для лиц, принимающих решения (https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_4.0#cite_note-9), Industry 5.0 ориентируется на широкое внедрение методов искусственного интеллекта для принятия решений, в частности, для кооперации роботов и людей (<https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon>).

В силу важности этой концепции процитируем целиком ее определение, совсем недавно появившееся в Википедии [20]: *"A digital ecosystem is a distributed, adaptive, open socio-technical system with properties of self-organization, scalability and sustainability inspired from natural ecosystems. Digital ecosystem models are informed by knowledge of natural ecosystems, especially for aspects related to competition and collaboration among diverse entities"*. В буквальном переводе цифровая экосистема — это распределенная, адаптивная, открытая социотехническая система, способная к самоорганизации, масштабированию и устойчивому развитию, устроенная подобно биологическим системам, что предполагает, в особенности, конкуренцию и кооперацию между отдельными ее подсистемами. Заметим, что точно такие же свойства декларируются в данной работе и для производственной системы в концепции Industry 5.0, поэтому производственная система в этом контексте может рассматриваться как частный случай цифровой экосистемы, а ЦП такого предприятия — как ЦП цифровой экосистемы. Если говорить более точно, то ЦП должна стать именно тем компонентом, который преобразует цифровое предприятие в цифровую экосистему умных сервисов кибер-физического управления.

Важнейшей особенностью проектируемой платформы для создания экосистем интеллектуальных сервисов является ее открытость, позволяющая новым системам входить в уже функционирующую цифровую "систему систем" или покидать ее без останова и перезапуска всей "системы систем", а также возможность для новых систем как конкурировать, так и кооперироваться с уже существующими системами, предлагая лучшие сервисы или их цепочки-комбинации (композиции сервисов) для потребителей.

Обратим внимание на то, какой значительный шаг был сделан в этом плане с 2016 г., когда уже упомянутая выше компания Gartner [21] делала акцент на сервисы и их интеграцию через обычные вызовы (англ. API Enabled), игнорирующие выработку и принятие согласованных решений за счет взаимодействия систем. По-видимому, в существующих ИТ-решениях для промышленности сегодня еще слишком трудно найти системы, реализующие самоорганизацию, адаптацию, конкуренцию и кооперацию сервисов. Однако при этом Gartner уже тогда отмечал принципиальную важность подхода к управлению "от событий" (англ. Event-

driven) для построения ЦП НП, что невозможно без гибкой адаптации систем "на лету", а это, в свою очередь, требует от системы автономности ее компонентов как важнейшего ее свойства.

В практическом (инженерном) плане следует выделить следующие новые и наиболее важные свойства интеллектуальных экосистем умных сервисов:

- *открытость* — это возможность вводить новые сервисы в работающую экосистему "на лету", без остановки и перезапуска, что касается и возможностей динамического установления связи и появления взаимодействия между сервисами, а также вывода сервиса из эксплуатации. Отметим, что при этом новый сервис должен объявить о себе в соответствии с некоторым протоколом, чтобы как-то "вписаться" в систему, т. е. объяснить уже работающим сервисам, что ему требуется и что он может предложить для других систем и для пользователей;
- *распределенность* — это свойство предполагает, что все сервисы могут работать непрерывно, параллельно и асинхронно. Они могут вызываться пользователями или другими сервисами как напрямую, так и проактивно, т. е. инициироваться событиями, которые генерируются самой системой в зависимости от внутреннего ее состояния и с учетом имеющихся критериев, предпочтений и ограничений в принятии решений;
- *адаптивность* — в широком понимании — это способность системы изменять структуру или функции под действием внешних факторов для повышения своей эффективности, что в более узком понимании можно трактовать как способность адаптивно реагировать на события, частично изменяя, например, сделанные ранее выводы по результатам анализа или ранее построенные планы в связи с изменением ситуации;
- *самоорганизация* — способность сервисов системы самостоятельно устанавливать локальные связи и в ходе работы пересматривать их при изменении ситуации. Ключевым отношением между сервисами любой рассматриваемой экосистемы являются отношения "потребность — возможность", что должно позволять сервисам формировать связанные цепочки сервисов;
- *конкуренция и кооперация сервисов* — эта способность предполагает, что один и тот же

сервис в экосистеме может быть предоставлен разными поставщиками. Он может быть также клонирован для разных потребителей. Например, один и тот же сервис планирования загрузки рабочих цеха может быть специализирован, настроен и может работать для каждого цеха завода. При этом несколько цехов могут конкурировать за один заказ или кооперироваться для совместной более эффективной реализации большого заказа. Например, задержка в исполнении части заказа в одном цеху может компенсироваться в других цехах на последующих этапах исполнения заказа, предотвращая тем самым распространение и увеличение задержки исполнения бизнес-процесса в целом.

В отличие от традиционных закрытых, централизованных, монолитных и последовательных систем управления предприятиями, реализующих преимущественно учетные функции, эко-системы предлагается строить из автономных интеллектуальных систем киберфизического управления ресурсами реального мира, обеспечивающими возможность анализа ситуаций во внешней среде, способных строить планы и их оптимизировать, взаимодействовать с другими системами и пользователями и договариваться о совместных действиях, а также реагировать на события, возникающие в реальном времени, для гибкой перестройки планов и достижения поставленных перед ними целей, вести мониторинг и контролировать достижение целей.

Для создания цифровых экосистем требуется переход от централизованных иерархических, монолитных и последовательных систем к распределенному сообществу автономных систем, имеющих сетевую архитектуру и способных к p2p-взаимодействию (от англ. "peer-to-peer" — "каждый с каждым" как "равный с равным") как по вертикали, так и по горизонтали.

В связи с этим требуется разработка принципиально новой ЦП, поддерживающей сервисы распределенного ИИ, которые поставляются расширяемой сетью взаимодействующих автономных интеллектуальных компонентов управления предприятием, способной поддерживать конструирование (генерацию) требуемых классов агентов, модели и методы принятия решений, протоколы переговоров между агентами для согласования решений, хранение динамически модифицируемых наборов дан-

ных, реакцию на события, передачу данных между сервисами, защиту информации и безопасность пользователей и т. д.

Во второй части работы предлагается типизация и состав таких сервисов, поддерживаемых компонентами сети взаимодействующих автономных интеллектуальных компонентов управления предприятием.

Заключение

В работе обоснована необходимость создания и сформулирована постановка задачи разработки ЦП нового поколения, представлена общая концепция и состав базовых сервисов цифровой платформы 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 при управлении предприятиями.

Проанализированы существующие подходы к созданию цифровых платформ, получающих все большее распространение в Industry 4.0, обсуждены их ограничения, обусловленные использованием в них устаревших моделей управления и недостатками в семантической интероперабельности, отсутствием средств поддержки принятия и согласования решений, отсутствием абстрактных моделей платформ и т. д.

Основное содержание работы относится к развитию новой концепции цифровой экосистемы — открытой, распределенной, самоорганизующейся "системы систем" умных сервисов, способных автономно принимать решения, выявлять и разрешать конфликты и координировать индивидуальное поведение компонентов производственной системы при совместном решении ими сложных задач планирования и распределения ресурсов и других задач управления. В данной работе предлагается для реализации экосистемы использовать архитектуру и технологию мультиагентных систем и модели кооперативного принятия решений в самоорганизующихся сетях автономных агентов, которые уже на практике зарекомендовали себя в решении подобных классов задач.

ЦП НП предприятия рассматривается как основа для создания экосистем АИС киберфизического управления, способных самостоя-

тельно принимать управленческие решения, доводить задачи до исполнителей и контролировать их исполнение. Очевидно, что создание такого рода систем — это пока еще дело будущего, но уже сегодня АИС надо начинать строить как системы "дополненного интеллекта", которые работают в контуре с лицами, принимающими решения.

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.

Материалы данной работы в целом рассматриваются ее авторами как основа для создания базовой концептуальной модели первой отечественной мультиагентной платформы для создания цифровых экосистем умных сервисов производственных предприятий машиностроения, сельского хозяйства, проектных, сервисных и других типов предприятий, заинтересованных в скорейшем развитии и внедрении продуктов и технологий Industry 5.0.

Список литературы

1. **Industry 4.0** / Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_4.0#cite_note-9 (дата обращения 18.01.2019).
2. **Yes, Industry 5.0 is Already on the Horizon** / Machine-Design. URL: <https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon> (дата обращения 20.01.2019).
3. **Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019** / Gartner. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/> (дата обращения 20.01.2019).
4. **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.

5. **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.
6. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing complexity. London-Boston: WIT Press, 2014. 202 p.
7. **Виттих В. А.** Введение в теорию интерсубъективного управления. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. 64 с.
8. **Кудрявцев Г. И., Скобелев П. О.** Цифровая экономика: концепция управления крупным высокотехнологичным предприятием // *Горизонты экономики*. 2017. Т. 5, № 38. С. 54–60; Т. 6, № 39. С. 37–46.
9. **Сетцентрическая война: материалы** Научно-исследовательского центра Военной ордена Ленина Краснознаменной ордена Суворова академии Генерального Штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. М., 2010, 331 с.
10. **Бир С.** Мозг фирмы. Пер. с англ. М.: Книжный дом "Либроком", 2009. 414 с.
11. **Деминг Э.** Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами. Пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 370 с.
12. **Городецкий В. И.** Многоагентная самоорганизация в B2B-сетях // Матер. XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, М.: ИПУ, 2014. С. 8954–8965.
13. **Городецкий В. И., Бухвалов О. Л.** Самоорганизующиеся производственные B2B-сети. Часть 1. Концепция и базовые задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 11. С. 776–781.
14. **Городецкий В. И., Бухвалов О. Л.** Самоорганизующиеся производственные B2B-сети. Часть 2. Архитектура и алгоритмическая поддержка // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 12. С. 829–839.
15. **FIPA Abstract Architecture Specification** / FIPA. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (дата обращения 21.01.2019).
16. **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).
17. **Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S.** P2P Agent Platform: Implementation and Testing / Eds Joseph S. R. H., Despotovic Z., Moro G., Bergamaschi S. *Agents and Peer-to-Peer Computing*. AP2PC 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5319. Springer, 2010. P. 41–54.
18. **Fingar P.** Competing For The Future With Intelligent Agents... And A Confession / *Forbes*. URL: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2018/11/11/competing-for-the-future-with-intelligent-agents-and-a-confession/#20d33b83613d> (дата обращения 11.11.2018).
19. **JADE** / Tilab. URL: http://jade.tilab.comhttps://en.wikipedia.org/wiki/Digital_ecosystem (дата обращения 25.01.2019).
20. **Top Strategic Predictions for 2016 and Beyond: The Future Is a Digital Thing** / Gartner. URL: <https://www.gartner.com/doc/3142020?refval=&pcp=mpe> (дата обращения 20.01.2019).

Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises

Part 1. Digital Platform and Digital Ecosystem

V. I. Gorodetsky, D. Sc. in engineering, Professor, vladim.gorodetsky@gmail.com,

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

V. B. Laryukhin, Graduate Student, vl@kg.ru, Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

P. O. Skobelev^{3, 4}, D. Sc. in engineering, Professor, petr.skobelev@gmail.com,

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

SEC "Smart Solutions", Samara, Russian Federation

Abstract

The paper proposes conceptual model of a digital platform for cyber-physical management of modern enterprises in the upcoming era of Industry 5.0. Unlike Industry 4.0, which focuses on automation of physical processes, Industry 5.0 is oriented on digitization of knowledge and automation of reasoning processes for creating artificial intelligence that is able to manage enterprises. This still emerging era will be 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 humans. The paper shows that implementation of such production and logistics management systems will require development of new models and decision-making methods based on knowledge and semantic information processing, integration of computational and communication components, accumulation of big data and its processing for predictive analytics, blockchain technologies for fixing mutual obligations of systems components in the form of smart contracts, as well as human-machine and software interfaces. Existing approaches to creation of digital platforms within the digital economy of Industry 4.0 and their limitations are analyzed. The concept of digital ecosystem is developed as an open, distributed, self-organized "system of systems" of smart services capable of coming up with solutions and automatically resolving conflicts through negotiations and concessions. The concept of the digital platform within Industry 5.0 is described, which will be able to support functioning of the digital ecosystem of "smart services" of cyber-physical management of both individual objects and enterprises of humans and robots, and in the future, industries of such enterprises — implemented using self-organizing autonomous agents at all levels.

Keywords: cyber-physical management, self-organization, digital platform, digital eco-system, multi-agent technologies, network of agents

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 1. Digital Platform and Digital Eco-system, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 323—332.

DOI: 10.17587/mau.20.323-332

References

1. **Industry 4.0** / Wikipedia, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_4.0#cite_note-9 (18.01.2019).
2. **Yes, Industry 5.0 is Already on the Horizon** / MachineDesign, available at: <https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon> (20.01.2019).
3. **Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019** / Gartner, available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/> (20.01.2019).
4. **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.
5. **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.
6. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing complexity, London-Boston, WIT Press, 2014, 202 p.
7. **Vittikh V. A.** Introduction to the theory of intersubjective management, Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2013, 64 p. (in Russian).
8. **Kudryavtsev G. I., Skobelev P. O.** *Gorizonty ekonomiki*, 2017, vol. 5, no. 38, pp. 54—60; vol. 6, no. 39, pp. 37—46 (in Russian).
9. **Network-centric war: materials of Research Center of Lenin Military Order of the Red-Banner Order of Suvorov of the Academy of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation**, Moscow, 2010, 331 p. (in Russian).
10. **Beer S.** Brain of the Firm: The Managerial Cybernetics of Organization, John Wiley & Sons, 1981, 417 pp.
11. **Deming E.** Emerging from the crisis: A new paradigm of managing people, systems and processes, Moscow, Al'pina Biznes Buks, 2007, 370 p. (In Russian).
12. **Gorodetskiy V. I.** *Proc. XII All-Russian Conference on Management Problems*, Moscow, IPU, 2014, pp. 8954—8965 (in Russian).
13. **Gorodetskiy V. I., Bukhvalov O. L.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 776—781 (in Russian).
14. **Gorodetskiy V. I., Bukhvalov O. L.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 829—839 (in Russian).
15. **FIPA Abstract Architecture Specification** / FIPA, available at: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (21.01.2019).
16. **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> (21.01.2019).
17. **Gorodetskiy V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S.** P2P Agent Platform: Implementation and Testing / Eds Joseph S. R. H., Despotovic Z., Moro G., Bergamaschi S. Agents and Peer-to-Peer Computing. AP2PC 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5319, Springer, 2010, pp. 41—54.
18. **Fingar P.** Competing For The Future With Intelligent Agents... And A Confession / Forbes, available at: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2018/11/11/competing-for-the-future-with-intelligent-agents-and-a-confession/#20d33b83613d> (11.11.2018).
19. **JADE** / Tilab, available at: http://jade.tilab.comhttps://en.wikipedia.org/wiki/Digital_ecosystem (25.01.2019).
20. **Top Strategic Predictions for 2016 and Beyond: The Future Is a Digital Thing** / Gartner, available at: <https://www.gartner.com/doc/3142020?refval=&pcp=mpe> (20.01.2019).