

Д.А. ИВАНОВ, М.А. ИВАНОВА, Б.В. СОКОЛОВ
**АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ
УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ
ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0**

Иванов Д.А., Иванова М.А., Соколов Б.В. Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий Индустрии 4.0.

Аннотация. Объектами данного исследования являются существующие и перспективные информационные технологии, формирующие основу концепций «Индустрия 4.0» и киберфизических систем (КФС), и соответствующие предприятия, на которых они внедряются. В статье в качестве примеров таких предприятий рассматриваются транспортно-логистические и промышленные предприятия. Цель исследований состоит в анализе влияния интеллектуальных информационных технологий (ИИТ), разрабатываемых в рамках проектов «Индустрия 4.0» и соответствующих киберфизических систем, на изменения принципов и способов управления указанными предприятиями в настоящее время и в ближайшем будущем. В статье на конкретных практических примерах проводится иллюстрация происходящих изменений, вызванных внедрением ИИТ. Анализ литературы и практических примеров Индустрии 4.0 показал, что наряду с развитием информационных и инженерных технологий Индустрии 4.0 в экономической части управления транспортно-логистическими и промышленными предприятиями отсутствует четкое понимание и описание бизнес-моделей, в рамках которых эти технологии могут применяться. Проанализированные примеры из практики позволяют сделать вывод, что технологии Индустрии 4.0 и киберфизических систем используются контекстно в виде лишь ограниченного набора той или иной функциональности. Основная же идея Индустрии 4.0 и КФС — создание самоорганизующихся и самоадаптирующихся динамических сетевых структур поставок на протяжении всего жизненного цикла изделий для реализации максимально гибкого индивидуального производства с затратами массового поточного производства — на данный момент реализована лишь в ряде исследовательских проектов. В статье предложена оригинальная интерпретация сервис-ориентированного подхода к описанию и решению задач оценивания и выбора эффективных стратегий использования ИИТ на существующих и перспективных предприятиях. Данная интерпретация базируется на разрабатываемой авторами статьи теории управления структурной динамикой сложных объектов.

Ключевые слова: киберфизические системы и «Индустрия 4.0», интеллектуальные информационные технологии, цепи поставок, промышленные предприятия, эффективность использования информационных технологий

1. Введение. В настоящее время мы являемся свидетелями наступления нового этапа научно-технической революции, характеризующейся интенсивным и повсеместным созданием и внедрением интернет-сервисов и новых информационных технологий. В условиях, когда ресурсы экстенсивного роста экономики за счет наращивания производства новых товаров и услуг замедляются, ключевым фактором дальнейшего развития становится рост эффективности производственно-сбытовых процессов, важная роль в которых отводится как транспортно-логистическим, так и собственно промышленным пред-

приятиям (ТЛП и ПП)). Данные процессы и системы претерпевают постоянные изменения, что приводит к появлению новых концепций организации и управления промышленными и транспортными предприятиями, адекватных уровню развития рыночных отношений, информационных технологий (ИТ) и инженерных систем. Современная степень развития ТЛП и ПП требует того, что они должны проектироваться как распределенные, унифицированные и многофункциональные системы с рекурсивным, самопроизводящимся адаптивно замкнутым характером коммутационных отношений. В адаптивно замкнутых ТЛП и ПП формируются (синтезируются) такие механизмы их избирательной чувствительности, которые обеспечивают ослабление нежелательных воздействий внешней среды за счет контуров отрицательной обратной связи и усиление полезных воздействий (сигналов) по соответствующим каналам положительной обратной связи. В ТЛП и ПП должны быть реализованы технологии управления, обеспечивающие гибкое сочетание принципов иерархического и сетевого управления при динамическом структурно-функциональном синтезе ее облика. Кроме того, создание программно-математического и информационного обеспечения (ИО) и соответствующих подсистем должно базироваться на концепции их самоподобного рекурсивного построения. Самоподобие является одним из необходимых условий жизнеспособности ТЛП и ПП. Предварительные исследования показали, что применительно ТЛП и ПП самоподобие проявляется, прежде всего, через концепцию развивающейся ситуации, которая на формально-математическом уровне описания реализуется с помощью задания состояний, структурных состояний, макросостояний, многоструктурных макросостояний, классов эквивалентных структурных состояний [1-6].

Наиболее распространенной формой ТЛП и ПП являются цепи поставок (ЦП) [5-6]. Цепь поставок (процессное понимание) — это совокупность потоков и соответствующих им кооперационных и координационных процессов между различными участниками цепи создания стоимости для удовлетворения требований потребителей в товарах и услугах.

Цепь поставок (объектное понимание) — это совокупность организаций (предприятий-изготовителей, складов, дистрибуторов, 3PL и 4PL провайдеров, экспедиторов, оптовой и розничной торговли), взаимодействующих в материальных, финансовых и информационных потоках, а также потоках услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя.

Развитие и видоизменение принципов управления цепями поставок имеет объективные основы. Предпосылками происходящих изменений в подходах к организации и управлению цепями поставок являются, прежде всего, появление новых форм конкурентной борьбы, основанных

на стратегическом взаимодействии (Collaboration) предприятий, а также все большее проникновение информационных технологий в бизнес.

Мощным стимулом синтеза новых поколений цепей поставок (ЦП) стали интенсивно развиваемые информационные технологии и соответствующие информационные системы (ИС) [7-9]. К числу указанных технологий можно, в первую очередь, отнести: технологию совмещенного проектирования; технологию удовлетворения ограничений; технологии радиочастотной идентификации и мобильные информационные технологии; технологию системного моделирования и интеллектуального проактивного управления; технологию создания объектно-ориентированных и интеллектуальных баз данных; технологию интеллектуальных геоинформационных систем; технологию проектирования и применения многоагентных и гибридных систем. Все перечисленные технологии получают широкую практическую реализацию в рамках таких глобальных бизнес-проектов, как Интернет вещей и Промышленный Интернет, который ассоциируется с программой Индустрия 4.0 [10-14]. Наряду с указанными технологиями необходимо учитывать также и перспективы их дальнейшего развития, которые базируются на тенденциях в ИТ сфере, связанных с переходом от классических вычислений к альтернативным способам организации вычислительного процесса; с использованием технологии активных объектов; ориентацией на приоритет моделей, а не алгоритмов; реализацией естественного параллелизма вычислений; проактивности и самоорганизации вычислений [10, 15].

При этом технологии проактивного мониторинга и управления ТЛП и ПП в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение возникновения данных инцидентов за счет создания в системах мониторинга и управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на концепции системного (комплексного) моделирования. Данная концепция, в свою очередь, базируется на полимодельном описании соответствующей предметной области, а также применении комбинированных методов, алгоритмов и методик для решения задач многокритериального оценивания, анализа и выбора наиболее предпочтительных альтернативных управленческих решений [15, 21-23].

В связи со сказанным весьма актуальными становятся вопросы анализа влияния существующих и перспективных интеллектуальных информационных технологий (ИИТ), положенных в основу проектов Индустрия 4.0 и киберфизических систем, на организацию функционирования транспортно-логистических и промышленных предприятий.

2. Индустрия 4.0: четвертая индустриальная революция.

2.1. Экономический и управленческий смысл концепции

Индустрия 4.0. Из курса современной истории человечества известно о трех индустриальных революциях: первая индустриальная революция произошла в конце 18 века, когда были изобретены и усовершенствованы паровые двигатели, заменившие ручной труд машинным и многократно увеличившие темпы производства и транспортировки продукции; 1863–1947 гг. называют эпохой второй индустриальной революции, в основе которой — изобретение Генри Фордом конвейерной линии, массовая электрификация производства, вызвавшие резкий подъем промышленного производства и снизившие стоимость готовой продукции, например, автомобиля, сделав ее доступной для массового покупателя.

Третья индустриальная революция началась в 1960 гг. Обычно ее называют цифровой революцией, потому что это время послужило началом использования полупроводников и ЭВМ. Наше время — это переходный период. Четвертая революция еще не наступила, но инновации третьей уже достигли своего промышленного предела.

На основании данных, которые были получены от квалифицированных экспертов, Клаус Шваб предполагает, что временем начала четвертой промышленной революции можно считать 2025 год [24]. Именно в этот период множество экспертов предсказывают масштабные изменения во всех отраслях нашей жизни. Одно из главных отличий этой революции от остальных состоит в том, что изменения будут происходить стремительными темпами. Пройдет всего 10 лет, и мир кардинально изменится.

Четвертую индустриальную революцию или Индустрию 4.0 можно охарактеризовать следующими особенностями [3, 6, 8, 17-20, 24]: комплексная интеллектуализация и автоматизация производственных и транспортных процессов; радиочастотная идентификация деталей (RFID), технологического оборудования и роботов, которая осуществляется с помощью идентифицирующей и управляющей электроники; способность быстро и гибко перенастраивать технологическое оборудование; детали и оборудование самостоятельно «договариваются» между собой с помощью смарт-сенсоров, когда и на каком оборудовании должен производиться продукт, чтобы скорость и эффективность производства были максимальными. Возникает новое поколение smart factories — «умных фабрик». Основное их отличие от классических фабрик, работающих на принципах линейных производственных процессов, состоит в том, что все производственные циклы гибко конфигурируются в соответствии с запросами покупателя и загрузкой оборудования. Это повышает гибкость, эффективную загрузку и про-

изводительность «умных фабрик». Производство индивидуализированной продукции становится рентабельным и возможным в отраслях массового серийного производства, таких как автомобилестроение, машиностроение, авиастроение и другие.

Генри Форд, основатель одного из крупнейших автомобильных концернов и идеолог конвейерного производства, говорил, что покупатель имеет право сам выбрать цвет своего автомобиля, если этот цвет будет черным. Современная автоиндустрия давно отошла от этих принципов. На передний план выходят индивидуализация продукции и удовлетворение запросов покупателя. Индустрия 4.0, основой которой являются высокоавтоматизированные и компьютеризированные сетевые фабрики, фокусируется главным образом на удовлетворении запросов покупателя. Ученые расходятся во мнениях о том, что представляет собой Индустрия 4.0, и следует ли говорить об эволюционном или революционном пути развития индустриализации. Скептики считают, что сама терминология «Индустрия 4.0» придумана политиками и робототехниками в маркетинговых целях. Однако нельзя отрицать тот факт, что научные достижения в области микроэлектроники, сенсорики, робототехники, программного обеспечения и радиоэлектроники и их успешное применение на практике создали новое поколение «умных фабрик».

Аналоги программы Индустрия 4.0 существуют и в других странах: Smart Factory в Нидерландах, Usine du Futur во Франции, High Value Manufacturing Catapult в Великобритании, Fabbrica del Futuro в Италии, «Сделано в Китае-2025» и тому подобное.

В США тоже задумываются о будущем индустриального производства. В 2014 году компании General Electric, AT&T, Cisco, IBM и Intel создали Консорциум промышленного интернета (Industrial Internet Consortium), который сегодня включает уже 170 членов.

Таким образом, Индустрию 4.0 (или по-другому — Производственный Интернет) можно считать ключевым, но более узким понятием, чем Интернет вещей (Internet of Things), поскольку последний объединяет не только оборудование и производственные циклы внутри производственной сферы, но и ИТ вне ее, как, например, смартфоны, умные часы (smart watches), бытовые приборы, «умные дома» (smart homes), автомобили [2, 8]. Такой взгляд на Индустрию 4.0 особенно популярен в Германии, поскольку эта страна является не только лидером мировой индустрии, но и ведущим производителем оборудования и программного обеспечения для автоматизированных производственных систем. Перед страной открываются неограниченные возможности стать главным поставщиком электротехники для «умных фабрик».

2.2. Технологические основы Индустрии 4.0: смарт-сенсоры и искусственный интеллект. Рассмотрим ключевые компоненты, лежащие в основе «умных фабрик». Среди них важнейшим компонентом являются киберфизические системы (Cyber-Physical Systems, далее в тексте — КФС). Термин «киберфизические системы» предложила в 2006 году Хелен Джилл, в то время директор по встроенным и гибридным системам в Национальном научном фонде США, желая подчеркнуть отличительную особенность организованного ею семинара NSF CPS Workshop. Ей удалось уловить общую тенденцию пересмотра роли встроенных систем. Согласно современному взгляду КФС — это системы, состоящие из различных материальных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, которые представляют собой единое целое. В КФС обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами. Область действия КФС распространяется на робототехнику, транспорт, энергетику, управление промышленными процессами и крупными инфраструктурами [3, 19].

От существующих мехатронных систем КФС отличаются наличием интеллекта (знаний и процедур их формирования, пополнения, манипулирования) и способностью взаимодействовать со своим окружением; планировать и адаптировать свое собственное поведение согласно окружающим условиям; учиться новым моделям и линиям поведения и быть самооптимизирующимися [13-15, 20]. В перспективе КФС будут также обладать такими свойствами как самосознание и проактивность, самоконфигурирование, самосовершенствование, самолечение, самосохранение [13-14, 20].

Ключевым в КФС является модель, используемая в системе управления, — от того, как она соотносится с реальностью, зависит работоспособность КФС. Разработка унифицированных языков описания разнородных объектов для построения моделей их функционирования, а также методов оценки качества этих моделей являются чрезвычайно актуальными научными задачами. Наряду с этим большое значение приобретает развитие теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов, с тем чтобы повысить обоснованность автоматического выбора моделей своего поведения самими КФС [15].

На рисунке 1 в качестве примера приведена обобщенная структура системы управления жизненным циклом перспективной сложной организационно-технической системы, в состав которой включены как существующие, так и перспективные КФС, которые в сочетании с соответствующими организационными структурами уже образуют социокриберфизические системы (СКФС).

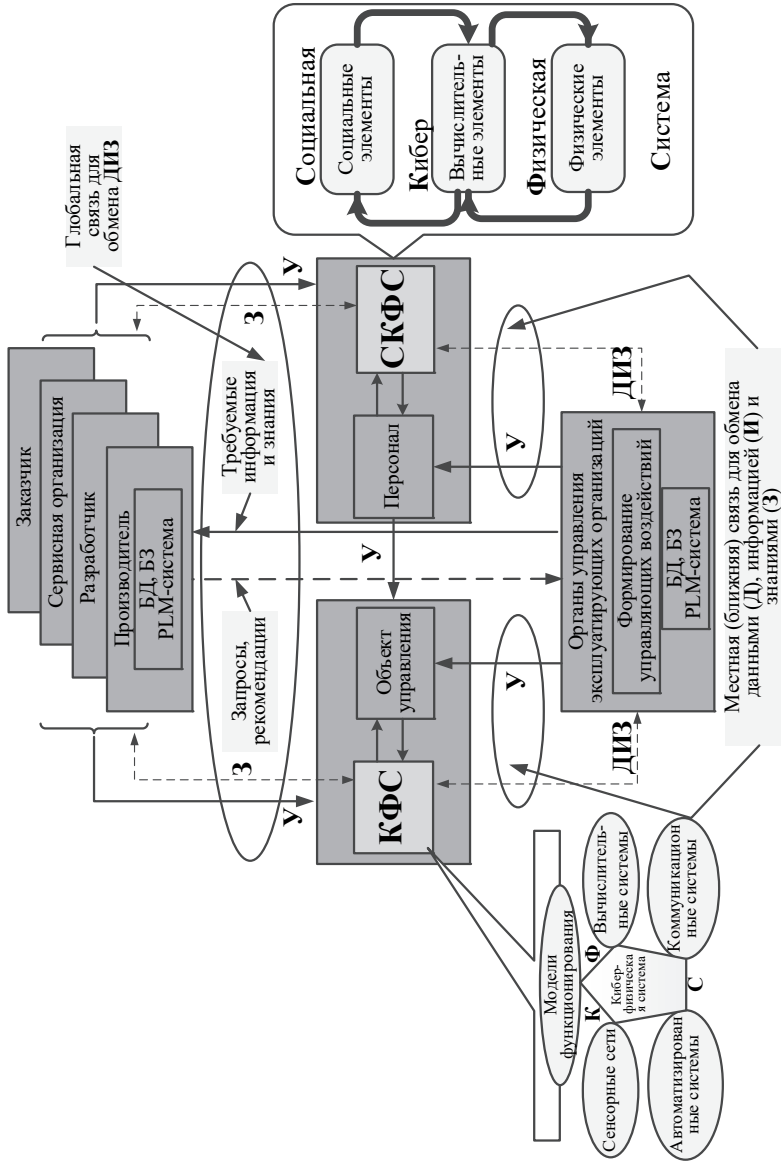


Рис. 1. Обобщенная структура системы управления жизненным циклом сложной организационно-технической системы

На рисунке 1 приняты следующие условные сокращения: З — знания, У — управление, ДИЗ — данные, информация, знания, БД, БЗ — базы данных, базы знаний. Данный рисунок иллюстрирует, как основные компоненты и технологии Индустрии 4.0 взаимодействуют между собой на различных этапах создания и использования перспективных производственных процессов и систем (в том числе и применительно к основным объектам данного обзора — ПЛП, ПЛС, ЦП и соответствующим ИС).

Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время в результате повсеместного внедрения на практике как КФС, так и СКФС происходит эволюционный переход от существующих систем управления жизненным циклом (СУ ЖЦ) (зарубежный аналог — Product Lifecycle Management (PLM) системы) к более совершенной технологии управления ЖЦ, которая получила название CL2M (Closed Loop Lifecycle Management — управление ЖЦ с обратной связью).

Новое поколение PLM систем (СУ ЖЦ СТО) должно быть сопряжено с распределенными базами знаний. В связи с этим в дальнейшем предусматривается разработка (адаптация), внедрение и использование следующих новейших информационных технологий и элементов новой СУ ЖЦ: встраиваемых в изделие интеллектуальных информационных сенсоров и приборов (например, радиочастотных меток — RFID tags, приемников GPS, GSM сигналов), позволяющих осуществлять глобальное и локальное позиционирование изделий, получать и предварительно обрабатывать данные и информацию о состоянии изделия, а также сведения о необходимом объеме его обслуживания; встраиваемых в изделие интеллектуальных информационных сенсоров для контроля технического состояния изделий (smart tags), обеспечивающих непрерывное накопление и обработку данных, информации и знаний о режимах функционирования изделия в течение его ЖЦ, а также сведений о степени удовлетворенности заказчика готовым изделием и создания на этой основе лучших, ориентированных на заказчика и устойчиво развивающихся изделий, процессов и услуг; мобильных телекоммуникационных систем и средств для беспроводного считывания и передачи данных со встроенных в изделие интеллектуальных информационных сенсоров; программного обеспечения для беспроводного Интернет соединения мобильных средств считывания информации с PLM системами в любом месте мира; программного обеспечения, которое позволит с учетом разграничения доступа распределять данные, информацию и знания между субъектами управления в любое время и в любом месте. На базе перечисленных возможностей и технологий использования КФС (как нового поколения встроенных систем) наряду с принципиальным изменением технологии управления ЖЦ изделий происходят такие же масштабные изменения в организации использования произ-

водственного оборудования, о состоянии которого дистанционно получают данные и информацию не только люди, его эксплуатирующие, но и производители данного оборудования. Все это позволяет своевременно и обоснованно проводить регламентные работы, предсказывать аварии, проводить плановые предупредительные ремонты, заранее подготавливать замену тех или иных деталей.

В РФ данные системы уже сейчас получили самое широкое распространение в ракетно-космической отрасли.

На многих современных фабриках в РФ и за рубежом уже существует компьютеризованное управление станками и роботами с помощью распределенной сети компьютеров. На данный момент эта технология распространяется на некоторых наиболее технически оснащенных заводах в автомобилестроении и производстве микрочипов.

Так, например, для устранения простоев на «умных автомобильных фабриках» существуют управляющие компьютеры, которые на основе динамического ситуационного решения задачи теории расписаний осуществляют коррекцию производственного плана и перенаправляют кузов к соответствующему роботу.

Подобные задачи сложны как с модельно-алгоритмической, так и технической точки зрения и их успешное решение возможно только в случае, если соответствующие детали, роботы, станки и оборудование обладают способностью формировать и реализовывать в проактивном режиме соответствующие управляющие воздействия.

Проведенный анализ показывает, что в современных условиях для обеспечения требуемой степени автономности, качества и оперативности управления промышленными предприятиями (ПП) и соответствующими производственными процессами (ПрП) необходимо решить следующие основные научно-технические проблемы: во-первых, обеспечить модельно-алгоритмическое описание процессов смысловой интерпретации всех возможных штатных и нештатных состояний их функционирования, и во-вторых, на этой основе решить весь перечень задач комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов мониторинга и управления ПП и ПрП в различных условиях обстановки. Однако, к сожалению, в подавляющем большинстве случаев на практике мониторинг, прогнозирование и управление их состояниями в указанной выше трактовке автоматизирован в лучшем случае лишь частично. Как правило, в современных системах мониторинга и управления (СМУ) ПП и соответствующими ПрП операторам представляется смысловая информация только о состояниях их элементов, а не объектов контроля в целом. Указанные обстоятельства приводят к тому, что интегральную оценку их состояния так же, как и формирование необходимых управ-

ляющих воздействий операторы выполняют в основном вручную, базирясь на тех или иных эвристических правилах.

Эти задачи в проекте Индустрия 4.0 планируется возложить, прежде всего, на smart-sensors — «умные сенсоры» и соответствующие управляющие подсистемы. «Умный сенсор» (в отличие от классических встроенных систем) способен измерять многочисленные функционально связанные физические параметры. Эти параметры могут характеризовать в каждый конкретный момент времени состояние заданного объекта, обрабатывать и анализировать полученные данные и информацию и осуществлять их преобразование в цифровой вид для последующей передачи управляющему компьютеру. На управляющем компьютере осуществляется интеграция данных, информации и знаний, поступающих от распределенной системы умных сенсоров. КФС системы вместе с компьютерами позволяют реализовать на практике технологии повсеместных вычислений и коммуникаций при решении задач анализа и синтеза бизнес-процессов предприятий в динамике, а также задач оценивания таких параметров, как качество, время, расход ресурсов и тому подобное.

К настоящему времени современная наука создала богатый методологический и методический аппарат, который наряду с КФС может быть положен в основу рассматриваемых технологий Интернета вещей и Промышленного Интернета, позволяющий успешно преодолевать трудности, связанные с воздействием факторов сложности в современном мире. В основу этого аппарата положена междисциплинарная отрасль системных научных знаний. Возникновение системной отрасли научных знаний является велением времени, так как на данном этапе развития науки (этапе интеграции научных знаний) на передний план в развитии научных знаний выступает методология, требующая сочетания (единства) процессов анализа и синтеза при изучении свойств сложных объектов и процессов (к числу которых относятся и рассматриваемые в статье ПрП) как целостных образований, состоящих из взаимосвязанных частей и обладающих качественно новыми свойствами по сравнению со свойствами этих частей. При этом в настоящее время речь должна идти не о взаимном поглощении, а о взаимном дополнении, концептуальном и идейном взаимообогащении, гармоничном и согласованном развитии базовых междисциплинарных направлений, в числе которых, прежде всего, выделяются такие научные направления, как информатика, общая теория систем, кибернетика (в современных условиях — неокибернетика) [23-29].

Говоря о последнем научном направлении (неокибернетика), получившем существенное развитие в нашей стране и за рубежом, следует указать, что основные научные направления неокибернетики

связаны с исследованием проблематики управления сложностью и организации деятельности социоконвергентных систем (СКФС) в указанных условиях (problem of complexity control and management). Следует отметить, что рассматриваемые в данной статье цепи поставок тоже относятся к классу сложных СКФС.

Организация управления СКФС требует (в отличие от управления КФС) проведения междисциплинарных исследований с привлечением специалистов разных специальностей: экономистов, биологов, физиков, математиков, специалистов в области компьютерных технологий. При этом само управление в его классическом понимании (то есть реализация функций целеполагания, планирования, оперативного управления, мониторинга, контроля, координации и т.п.) в таких системах без учета человеческого фактора невозможно, так как поведение (функционирование) данных систем слабо предсказуемо, и поэтому в конечном итоге сводится к организации целенаправленного формирования возбуждающих и тормозящих стимулов (управляющих воздействий) в многочисленных контурах прямых и обратных связей, обладающих большой динамической инерционностью и требующих проведения многовариантного упреждающего (проактивного) прогнозирования сценариев функционирования СКФС [15, 23].

Важная роль в функционировании СКФС отводится процессам их самоорганизации, которую можно трактовать как их способность управлять разнообразием своих состояний и состояний внешней среды. Борьба с разнообразием внешней среды возможна на основе динамической адаптации структур системы к изменяющимся условиям функционирования. Следует признать, что концепция централизованного управления с отрицательной обратной связью, лежащая в основе классической кибернетики Н. Винера, в настоящее время не всегда адекватна современным процессам управления [15, 24-26]. В частности, она не позволяет описывать поведение сложных распределенных самоорганизующихся систем, к числу которых относятся СКФС. В связи с этим в книге [28] систематизированы методологические подходы современной кибернетики, применимые к моделированию распределенных самоорганизующихся систем. Эти подходы в основном базируются на известных концепциях, рассмотренных выше, но в дополнение к ним предоставляют конструктивные механизмы описания процессов саморегуляции и эволюции, применимые на практике. Примеры, рассмотренные в книге, не исчерпываются биологическими системами, речь идет прежде всего о системах естественного происхождения. При этом процессы взаимодействия СКФС с внешней средой, с одной стороны, обеспечивают поддержание динамического равновесия системы, а с другой стороны, наиболее важны с точки зрения внешне-

го наблюдателя. Для описания процессов взаимодействия Н. Нуўтуніемі в [28] использует понятие абстрактной энергии (информационной энергии), применяя термин «эмергия» (как результат объединения таких понятий как энергии и эмерджентность). Можно говорить о потоке «эмергии» из системы во внешнюю среду и об обратном потоке. Теперь, опираясь на сформулированные принципы моделирования самоорганизующихся систем, можно построить общую модельную схему самоорганизации, обобщающую схему классического централизованного управления с обратной связью (рисунок 2) [26].

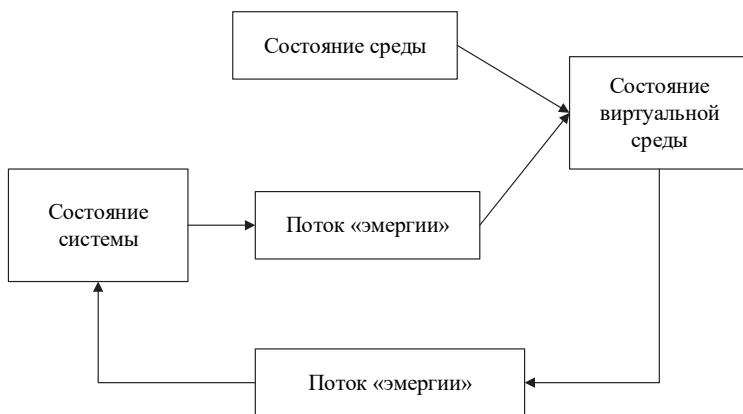


Рис. 2. Самоорганизация с обратной связью, замыкающейся через виртуальную среду

На приведенной схеме показано, что система непосредственно взаимодействует с некоторой абстрактной виртуальной средой. Заметим, что целенаправленная система может использовать модель внешней среды для формирования выходного потока «эмергии». При реализации схемы стрелки заменяются функциональными зависимостями, которые в общем случае могут быть определены неявно, например, алгоритмически, в виде систем алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений.

Эту модельную схему можно использовать также для исследования целенаправленных воздействий на самоорганизующуюся систему, то есть для управления указанной системой.

Для этого совокупность характеристик виртуальной внешней среды следует разделить на группы регулируемых и нерегулируемых характеристик. Далее управляющие воздействия на систему заключаются в непосредственном изменении регулируемых характеристик. Более того, управлению могут подвергаться и структуры. В работах [15, 29]

представлены основы управления структурной динамикой сложных технических объектов, которые могут быть положены в основу еще более интересного научного направления, связанного с управляемой самоорганизацией. При этом, говоря о данном варианте реализации процессов самоорганизации, следует подчеркнуть, что управление в рассматриваемом случае трактуется не в классическом (кибернетическом) смысле, а более широко. Предлагается управлять не самим объектом управления (в нашем случае цепями поставок и соответствующими информационными системами, обеспечивающими их эффективное функционирование), а разнообразием потенциальных состояний, в которых он может находиться. Другими словами, в отличие от классической самоорганизации в рамках предлагаемого подхода на этапе применения целенаправленно и динамически формируются (выявляются) дополнительные свойства и характеристики объекта управления. К их числу могут относиться требуемая степень функциональной избыточности в виде дополнительных параметров, структур, режимов функционирования, ситуационное изменение границ между объектом управления и внешней средой и т.п.). Это позволяет существенно повысить эффективность процессов реализации традиционной самоорганизации. Авторами данной статьи предложено несколько вариантов реализации специального модельно-алгоритмического и программного обеспечения проактивного управления структурной динамикой КФС (в том числе и цепями поставок), в рамках которых на конструктивном уровне были продемонстрированы возможности предлагаемого подхода к проведению управляемой самоорганизации применительно к различным видам технических систем. На сайте [30] можно подробно ознакомиться с проектами и публикациями авторов, в которых использовались предложенные подходы.

В результате таких воздействий опосредованно, а именно через изменение состояния систем, могут изменяться значения непосредственно нерегулируемых характеристик. Как правило, цель управления системой формулируется именно в терминах изменения указанных нерегулируемых характеристик виртуальной среды. Регулируемые характеристики (входные воздействия на систему) можно в свою очередь разделить на два класса. Значения характеристик первого класса непосредственно воздействуют на многие элементы системы. Для экономических систем примером таких характеристик могут служить величины налогов, пошлин, акцизов и так далее. Входные воздействия второго класса влияют на состояние одного или нескольких элементов системы. Последствия таких воздействий с течением времени могут сказываться на состоянии других элементов за счет взаимодействия с уже изменившимися элементами. Например, банкротство крупного предприятия оказывает влияние на его поставщиков и клиентов. У по-

ставщиков и клиентов, в свою очередь, могут существовать свои поставщики и клиенты, условия деятельности которых также изменятся.

Процесс изменения состояния элементов самоорганизующейся системы имеет прямые аналогии с процессами диффузии в жидкостях и газах, поэтому для их описания могут быть использованы известные модели.

Следует отметить, что развивая концепции классической кибернетики второго порядка Фоерстера, Н. Нуйтүниemi ввел следующие конструктивные определения кибернетических систем высоких порядков исходя из их способности к самоорганизации и эволюции [28]: *кибернетическая система первого порядка* находит равновесие в условиях возмущающих воздействий внешней среды; *кибернетическая система второго порядка* настраивает внутренние структуры для лучшего соответствия наблюдаемым воздействиям внешней среды в интересах увеличения жёсткости системы (по критерию минимума наблюдаемых изменений в системе); *кибернетические системы более высоких порядков* перестраивают внешние структуры для создания более комфортной внешней среды. Внешние структуры перестраиваются по критерию максимального потока «эмергии» (максимального переноса «эмергии» через внешнюю среду). Для экономических систем этот критерий может принимать форму максимизации оборота.

К настоящему времени на практике приходится сталкиваться с многочисленными примерами реально существующих кибернетических систем различных порядков, получен ряд интересных теоретических и практических результатов при исследовании проблем управления структурной динамикой ЦП, которые можно повсеместно использовать в условиях расширяющейся технологической базы, предоставляемой программой Индустрия 4.0 [3, 4, 19].

Проведем краткий анализ того, в какой степени перечисленные научно-методические подходы реализуются на практике уже сейчас в рамках программы Индустрия 4.0.

3. Анализ практических примеров Индустрии 4.0. В представленных далее примерах проиллюстрированы те принципиально новые возможности по организации процессов управления, а также оптимизации цепочек создания стоимости, которые появляются при внедрении в существующие производственно-логистические системы новых информационных технологий, разрабатываемых в рамках Индустрии 4.0

3.1. Пример компании по производству микрочипов. Компания Globalfoundries — известный в мире производитель микрочипов. На заводе в Дрездене уже производятся кремниевые шайбы (так называемые «вафли»). Транспортировку «вафлей» осуществляют FOUPS —

«Front Opening Unified Pods», каждый из которых перевозит до 25 «вафлей». Они передвигаются по рельсам через все сборочные цеха, а специальные роботы осуществляют погрузку и разгрузку «вафлей» на всех этапах сборки, считывают с них электронную информацию, на основе которой самостоятельно определяют следующий пункт назначения на сборочной линии для каждой «вафли».

При этом ИИТ внедрены не только в используемых роботах, но и в самих FOUPS: на их поверхность нанесены электронные модули, передающие центральному компьютеру информацию о местонахождении каждого из FOUPs на сборочной линии. Центральный компьютер может дать им команду «припарковаться» на конкретном сборочном узле и ждать, чтобы избежать «пробок» на особенно загруженных участках линии или, например, пропустить вперед более срочный заказ от покупателя [2-4].

3.2. Пример из автоиндустрии. Ведущие производители автомобилей, такие как концерн «Volkswagen», активно применяют принципы и технологии проекта Индустрия 4.0 на практике. Основные производственные процессы, такие как сварка, лакировка, монтаж колес и стекол давно роботизированы. Компания успешно внедряет ИИТ при сборке деталей: каждый автомобильный кузов в момент производства получает свой RFID-чип, на котором сохранена информация о том, каким должен быть цвет автомобиля, какую оснастку он будет иметь, когда должен быть изготовлен и так далее. «Volkswagen» применяет цифровые и Интернет-технологии не только на собственных заводах, но и в цепях поставок. Например, специальный Big Data Monitor, созданный для завода Audi в немецком городе Карлсруэ позволяет в режиме реального времени проводить мониторинг логистических потоков 12 тысяч поставщиков компании. И компания, и поставщики получают актуальную информацию о заказах, могут точно прогнозировать спрос и сроки поставок, сокращая простои оборудования и складские запасы [2, 7].

3.3. Пример компании, организующей цепи поставок. SupplyOn — компания, занимающаяся с 2000 года созданием единой информационной платформы в области управления цепями поставок для таких компаний, как Bosch, Continental, Siemens, Airbus и другие и их поставщиков. Основными клиентами компании являются предприятия авиа- и автомобилестроения, электроники, промышленные предприятия. С момента своего основания в 2000 году SupplyOn стала использовать информационные технологии для взаимодействия компаний с поставщиками и транспортными компаниями (например, Software-as-a-service (SaaS) задолго до того, как SaaS и Cloud-computing стали популярными).

лярными в мире. Сегодня единая информационная платформа Supply On объединяет свыше 12 тысяч компаний в 70 странах мира.

Задачей SupplyOn является перевод цепи поставок в цифровую форму. Наличие прозрачной и высокотехнологичной единой информационной платформы — залог успешного внедрения Индустрии 4. 0 в цепь поставок. Supply On разработала цифровое решение для стандартизированных процессов цепей поставок железнодорожных компаний — приложение RailSupply, позволяющее отображать в электронном виде процессы заказов, поставок и учета крупных ж/д перевозчиков и их компаний-клиентов [3, 8].

3.4. Adidas: 3D-принтеры и первый размер партии. Компания Адидас представила в 2015 году свою «фабрику будущего» в Германии (г. Ансбах) — Speed Factory, на которой планируется производство спортивных товаров в максимально короткие сроки по принципу «размер партии = 1». Ранее почти вся продукция компании производилась в Китае, сроки поставки потребителю составляли в среднем 3 месяца. На Speed Factory активно применяются роботы, способные изготавливать высоко функциональную продукцию в максимально сжатые сроки и по индивидуальным заказам. На фабрике в немецком Ансбахе работает 6 современных единиц оборудования: вязальная машина производит из полимерных нитей высококачественный материал для кроссовок и передает его на лазерную закройную машину, одновременно с этим на 3D-принтере изготавливается подошва. Последний этап производства — «сварка» подошвы и верха обуви. Использование современных технологий при производстве обуви позволило практически исключить использование клея, сделав готовую продукцию более экологичной. Цель Speed Factory — гибкая и быстрая реакция на запросы потребителя и локализация вблизи основных покупателей, позволяющая сократить время нахождения в пути, снизить транспортные расходы и повысить независимость от поставщиков. Для производства одной пары обуви требуется приблизительно 5 часов.

Автоматизация производства на Speed Factory позволит создавать запасы там, где локализованы основные потребители. Открытие «фабрики будущего» в декабре 2015 года явилось важнейшей инновацией для компании Адидас и позволило за счет создания автоматизированного, децентрализованного и гибкого производства изготавливать индивидуализированные спортивные товары высокого качества, находясь вблизи основного рынка в Европе, снижая транспортные затраты и повышая экологичность готовой продукции [9, 16].

3.5. Amazon Robotics: Индустрия 4.0 в дистрибуционной логистике. Дистрибуционные центры сегодня сталкиваются с необходи-

мостью управлять возрастающими потоками товаров, увеличивающимися объемами информации, рисками и ожиданиями других участников цепи поставок. Внедрение Индустрии 4.0 в дистрибуционные центры может повысить гибкость при выполнении операций, снизить операционные затраты, автоматизировать процессы и, как следствие, обеспечить экономический рост.

Технологии, применяемые в Индустрии 4.0, позволяют создавать полностью роботизированные «умные» дистрибуционные центры, объединяя интеллектуальные возможности существующих и перспективных производственных роботов. Специфика дистрибуционных центров заключается в том, что в отличие от фабрик со сборочными линиями и цехами решения для дистрибуционных центров в сфере интеллектуального проактивного мониторинга и управления должны быть более гибкими и высокотехнологичными. Это вызвано колоссальным ассортиментом товаров, поступающим в крупные дистрибуционные центры, постоянно меняющимся спросом и ожиданиями других участников цепи поставок. Транспортировка товаров в крупных дистрибуционных центрах осуществляется автоматизированными роботами-погрузчиками (AGV), передвигающихся по складу с использованием локальных навигационных устройств, обеспечивающих их точное позиционирование. Современные сенсорные технологии позволяют роботам самостоятельно выбирать оптимальный маршрут, корректировать задачи и взаимодействовать с другими роботами. Рассмотрим пример американской компании Amazon Robotics, крупнейшего производителя роботизированных систем.

Amazon Robotics разработала роботов для передвижения стеллажей независимо от размера продуктов и форм их размещения в стеллажах. Роботы управляются централизованно на основе беспроводных технологий. Передвижения основаны на чтении QR-кодов на полу складского комплекса. Роботы являются обучаемыми и самоадаптируемыми элементами системы управления складом, обладая к тому же способностью к коммуникации друг с другом. По состоянию на вторую половину 2015, Amazon использует более 30000 роботов в 13 дистрибуционных центрах, что позволило компании существенно ускорить внутрискладские операции и сократить число ошибочных управленческих решений [4, 17, 18].

4. Анализ основных направлений влияния Индустрии 4.0 на изменения принципов управления цепями поставок. Проведенный анализ результатов внедрения технологий Индустрии 4.0 показывает, что предприятия различных форм собственности, предполагающие внедрение указанных технологий, должны быть хорошо подготовлены к

указанным процессам как в организационно-техническом, так и финансово-экономическом плане. При этом только комплексная автоматизация, информатизация и интеллектуализация основных технологий функционирования ТЛП и ПП будет обеспечивать гарантированный рост оборота, гибкости производства, производительности и в целом эффективности компаний, входящих в состав указанных цепей поставок.

Однако внедрение и использование технологий Индустрии 4.0 и киберфизических систем будет проходить в условиях влияния различного рода неопределенных факторов (возмущающих воздействий). Это в конечном итоге будет приводить к ситуациям принятия управленческих решений в ТЛП и ПП в условиях риска и неопределенности. Указанные факторы условно можно разделить на три большие класса [5]: индифферентные неопределенные факторы (возмущающие воздействия 1 типа); целенаправленные неопределенные факторы (возмущающие воздействия 2 типа); факторы, связанные с неопределенностью целей субъектов, участников ТЛП и ПП (возмущающие воздействия 3 типа).

Индифферентные неопределенные факторы, или по-другому неопределенность воздействий природы, характеризует ограниченность наших знаний об изучаемых и используемых объектах. В этих случаях, как правило, неизвестные факторы представляют собой обычные объекты изучения теории вероятности, математической статистики, в последнее время теории нечетких множеств. При этом предполагается, что вероятностно-статистические характеристики этих факторов известны или потенциально могут быть получены от экспертов в виде соответствующих функций принадлежности. Следует отметить, что во многих случаях невозможно математическое описание степени влияния различных факторов на процесс достижения целей, стоящих перед участниками ТЛП и ПП, либо же это описание будет сделано с недостаточной степенью точности и достоверности. Это связано с тем, что процессы в реальных ТЛП и ПП, как правило, носят неповторяющийся, нестационарный характер, а также с отсутствием или неполнотой необходимой ретроспективной статистической информации.

Неопределенность, вызванная деятельностью конкурентов (либо каких-то других участников рыночных отношений) обусловлена активностью агентов (предприятий) и центра (органа координации ТЛП и ПП) и их предпочтениями (интересами). Анализ неопределенности действий конкурентов базируется на мультиагентных системах, игровых моделях, методе нечеткой логики. В данных подходах реализуются принципы управления конфликтами, а также учета так называемых «мягких» трудно формализуемых факторов, таких как доверие, репутация и так далее.

Неопределенность целей, или иными словами — многокритериальность, связана с невозможностью однозначного формулирования цели и условия соответствующих задач планирования и управления ТЛП и ПП. Для решения многокритериальных задач большой размерности с необходимой оперативностью в настоящее время широко используются нейронные сети, генетические алгоритмы, АСО-алгоритмы, мультиагентные системы.

В целом для обоснованной реализации ранее перечисленных интеллектуальных информационных технологий, составляющих базу программы Индустрия 4.0. в существующих и перспективных ТЛП и ПП представляется целесообразным проводить соответствующее комплексное моделирование и анализ различных сценариев внедрения и использования данных технологий.

Кратко остановимся еще на одном весьма важном вопросе, имеющем непосредственное отношение к проблеме проактивного мониторинга и управления ТЛП и ПП, а именно на проблеме многокритериального количественного оценивания и анализа вкладов ИИТ в основную деятельность предприятий (фирм), из которых формируются указанные предприятия.

При этом возьмем современные цепи поставок (ЦП) в качестве примера, объединяющего подходы, используемые при оценивании и анализе вкладов ИИТ как в деятельность ТЛП, так и ПП. Содержание многочисленных публикаций по данной теме показывает, что, к сожалению, на данный момент времени нет корректных методик, позволяющих установить однозначную связь между повышением производительности ИИТ и информационных систем (ИС) и увеличением доходности и прибыльности бизнеса в соответствующей организации (в нашем случае в ЦП). Так применительно к оцениванию эффективности управления ЦП необходимо понимать, что цели, которые ставятся перед управлением цепями поставок (например, уровень сервиса или прибыль) связаны с так называемой потенциальной эффективностью. Реальная же эффективность реализуется через устойчивость ЦП. Поэтому, наряду с экономической эффективностью ЦП, большое значение при комплексном оценивании и выборе эффективных стратегий управления ЦП в динамически изменяющейся обстановке является обеспечение их безопасности и устойчивости. Как показывает практика, наблюдается значительное снижение экономических эффектов управления ЦП вследствие повреждений грузов, коллапсов транспортных систем, нарушений в финансовых потоках, а также недостаточной координации в ЦП (колебания спроса, несоответствия объемов производства и закупок и т.д.). Современной тенденцией понимания эффек-

тивности ЦП является такое их проектирование управление, которые бы характеризовались высоким уровнем экономической эффективности и необходимым уровнем устойчивости. В основу соответствующих расчетов показателей эффективности управления ЦП положены общеизвестные SCOR-модели, а также методики их использования, которые представлены в работах [1, 5, 9], а также на сайтах Supply Chain Council (www.supply-chain.org и supply-chain.ru). Однако в условиях широкомасштабного цифрового производства и цифровых экономик, данные модели должны быть дополнены моделями, с помощью которых учитывались эффекты, создаваемые ИИТ в рамках их повсеместного использования в ЦП.

Анализ показывает, что в разных предметных областях существуют отдельные частные методики оценивания как на макро, так и на микроуровне эффективности внедрения ИИТ, в том числе и технологий управления жизненным циклом (ЖЦ) (PLM технологий) промышленных предприятий (ПП) и транспортно-логистических компаний (ТЛК) [1, 5]. Данные методики в своем большинстве базируются на методологии функционально-стоимостного анализа (ФСА). Говоря о роли ФСА при решении проблем управления ЖЦ изделий с целью повышения их качества и использования соответствующих PLM систем для информационной поддержки принятия решений, необходимо отметить, что в настоящее время бизнес и государство готовы оплачивать ровно столько информационных ресурсов, сколько им необходимо для организации управленческой деятельности.

При этом они исходят из таких классических показателей эффективности, используемых в настоящее время на рынке компьютерных услуг, как показатель возврата инвестиций (return on investment, ROI), показатель качества обслуживания (quality of service, QoS), показатель совокупной стоимости владения (CCV) (total cost of ownership (TCO)). Лишние информационные ресурсы и избыточные статьи ИТ бюджета — это замороженные инвестиции и ресурсы (более того, потерянные ресурсы, учитывая быстрое моральное старение аппаратно-программных средств и оборудования). Недостаточные ресурсы — это упущенная выгода. Особенностью показателя ССВ является возможность оценки совокупных затрат на создание (приобретение) и использование готовых изделий и ИТ с последующим анализом эффективности сценариев их использования. Методика ССВ позволяет выявить избыточные статьи расходов и дает возможность оценки возврата вложенных в ИИТ и ИС соответствующих организаций, входящих в ЦП. В общем виде показатель ССВ не позволяет оценивать прямой экономический эффект от внедрения ИИТ и ИС, поэтому для ре-

шения данной задачи чаще всего применяется показатель возврата инвестиций (return on investment, ROI). Результатом расчета методики является коэффициент возврата инвестиций в ИС предприятия. С помощью данного показателя можно оценить экономический эффект от вложения средств в повышения качества создаваемых в ЦП новых сервисов на основе внедрения ИИТ и ИС. Главной трудностью данной методики является определение прямых выгод, получаемых компанией от внедрения новых ИИТ и ИС в различных частях ЦП. При анализе указанных выгод выделяются направления бизнеса и цели, стоящие при внедрении ИИТ и ИС, а затем рассчитывается выгода, получаемая соответствующими предприятиями, входящими в ЦП, от их достижения. Это могут быть как повышение качества сервиса, так и возможность разработки и производства новых товаров, дающие данной организации конкурентные преимущества на рынке. В методике ROI важную роль играет показатель ТСО, так как он отражает фактические расходы на ИИТ и ИС [32]. Отметим, что показатель ROI рассматривается на протяжении довольно длительного срока и является оценкой инвестиционных проектов. Для того чтобы связать все ранее перечисленные технологии и показатели, с помощью которых оцениваются выгоды и затраты при том или ином варианте создания и развития изделия, с информационными ресурсами, обеспечивающими их реализацию, был предложен сервис-ориентированный подход [15, 31, 32]. С помощью понятия сервиса можно на конструктивном уровне описать взаимодействия ИИТ и ИС системы с бизнес-процессами. По сути, любая информационная система предоставляет набор сервисов для пользователей. Каждый из этих сервисов должен выполнять поставленные перед ним задачи, имеет ряд функции и использует определенное количество ресурсов. Для описания этих сервисов в работе [32] было предложено использовать типовую модель информационных служб ITSM (ITSM). Данная модель представляет собой мощный инструмент для контроля и управления бизнес-процессами компании. Также с ее помощью достигается четкое представление об информационных службах (ИТ сервисах) компании, их структуре и компонентах, а также их затратные составляющие. Другими словами, в рамках данной модели выделяется взаимосвязь информационных служб с финансовыми ресурсами компании. Причем информационные службы являются связующим звеном между ИИТ, ИС и бизнес-процессами, происходящими в ЦП. В этом случае при решении задачи расчета ССВ с помощью модели ITSM информационные службы принимаются в качестве объектов затрат, и для каждой из них решается задача расчета ССВ. Для этого выделяются ресурсы каждой информационной служ-

бы. Затем рассчитывается стоимость этих ресурсов. ССВ рассматривается как обобщенный показатель для набора информационных служб, предоставляющих необходимые сервисы пользователям ИИТ и ИС. В рамках такой модели легко выявляются наиболее проблемные участки существующих и перспективных ИС и, как следствие, удастся с точки зрения экономической эффективности оптимизировать и сокращать расходы на ИС ЦП в целом. Важной проблемой при определении совокупной стоимости сервисов является тот факт, что разные сервисы могут использовать один и тот же ресурс. Для решения этой задачи применяется метод функционально-стоимостного анализа. В общем виде показатель ССВ (ТСО), как уже указывалось ранее, не показывает прямой экономический эффект от внедрения PLM системы, поэтому на практике для решения данной задачи применяется показатель ROI:

$$ROI(t) = \frac{Ef(t)}{TCO(t)}, \quad (1)$$

где $Ef(t)$ — экономическая эффективность внедряемой PLM системы.

С помощью данного показателя можно количественно оценить экономический эффект от вложения средств в ИИТ и ИС. Это может быть как повышение качества сервиса, создаваемых в ЦП, так и возможность разработки и производства новых товаров, дающих организациям, входящих в ЦП конкурентные преимущества на рынке. В работах [5, 32] представлены конкретные пути расчета показателя ROI, базирующиеся на комбинированном использовании данных, формируемых в реальных системах бухгалтерского, финансового и управленческого учета и генерируемых с использованием аналитико-имитационных моделей. В работе [33] проведен анализ подходов и выработка предложений по решению задачи оценивания эффективности информационных систем и технологий. В данной статье проводится дальнейшее развитие содержания [33] в части учета факторов, описывающих эволюционное развитие как самих ПП (на примере ЦП), так и информационных систем, обеспечивающих их функционирование.

Еще одной из важнейших проблем модернизации ЦП на основе повсеместного использования ИИТ и соответствующих ИС, разрабатываемых в рамках программы Индустрия 4.0, является проблема управления указанной модернизацией, в ходе которой надо комплексно решить *пять основных вопросов*: сформировать (синтезировать) конечный облик соответствующих модернизируемых ИС, определить сроки, к которым должна завершиться указанная модернизация, определить технологии модернизации ИС (в рамках которой на каком-то

интервале времени будут одновременно функционировать элементы и подсистемы «старой» и «новой» ИС, чтобы обеспечить устойчивость функционирования в целом ЦП), определить программу перехода от «старой» и «новой» ИС, и наконец сформировать программы перепланирования либо коррекции исходной программы модернизации ИС, если появятся непредусмотренные возмущающие воздействия.

В настоящее время существует большое разнообразие подходов к решению перечисленных пяти задач. Основной их недостаток состоит в разобленном решении. При этом на практике очень трудно согласовать решения, полученные с использованием различных классов моделей, методов и алгоритмов. В рамках разрабатываемой авторами статьи теории проактивного управления цепями поставок удалось все перечисленные задачи формально описать и исследовать с единых методологических и методических позиций. В этом случае задача многокритериального выбора эффективных стратегий создания, применения и модернизации как самих ЦП, так и соответствующих ИИТ и ИС, используемых в них может быть формально представлена в следующем виде: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, позволяющие находить такие $\langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle$, при которых выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned}
 J_{\theta} \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f] \right) &\rightarrow \underset{\langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \in \Delta_g}{extr}, \\
 \Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \mid R_{\beta} \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; \right. & \quad (2) \\
 \left. U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta, \delta \rangle}^t; \chi \in \mathbf{B} \right\}, &
 \end{aligned}$$

где χ — индекс, характеризующий различные типы структур ЦП и соответствующих модернизируемых ИС, $\chi \in \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ИО, Ор}\}$ — множество индексов, соответствующих топологической, функциональной и технической структурам, структурам программно-математического и информационного обеспечения (ПМО, ИО), организационной структуре, $t \in T$ — множество моментов времени; $X_{\chi}^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_{\chi}\}$ — множество элементов, входящих в состав структуры динамического альтернативного системного графа (ДАСГ) G_{χ}^t (множество вершин ДАСГ), помощью которого задается управляемая структурная динамика как ЦП, так и соответствующих ИС в момент времени t ; $\Gamma_{\chi}^t = \{\gamma_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ — множество дуг ДАСГ типа G_{χ}^t , отражаю-

щих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ; $Z_{\chi}^t = \{z_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ — множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАСГ. $F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t$ — отображения различных структур ЦП и ИС друг на друга в момент времени t , $\Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t$ — операция композиции многоструктурных макросостояний с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент времени t ; U^t — управляющие (программные и в реальном масштабе времени) воздействия, позволяющие синтезировать как структуры ЦП и соответствующих модернизируемых ИС, так и процессы функционирования предприятий, входящих ЦП; J_{θ} — стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования виртуальных предприятий, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ — множество номеров показателей; Δ_g — множество динамических альтернатив (множество структур и параметров ЦП, ИС и предприятий ЦП, множество программ их функционирования); \mathbf{B} — множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих процессы реализации ЦП для различных сценариев возмущающих воздействий; \tilde{R}_g — заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ — интервал времени, на котором синтезируются и модернизируются как ЦП, ИС, так и облики соответствующих предприятий, входящих в ЦП [5, 6, 15, 29, 30]. Особенностью модели вида (2) является то, что с ее помощью можно конструктивно описать и решить традиционные задачи управления ЖЦ ЦП и ИС (в рамках технологий PLM), но и задачи проактивного управления ЖЦ ЦП и ИС уже в рамках принципиально новой концепции управления ЖЦ указанных объектов, базирующейся на технологии CL2M.

Представленную формулой (2) проблему многокритериального выбора эффективных стратегий (программ) модернизации ЦП на основе технологий, разрабатываемых в проекте Индустрия 4.0. предлагается решить в рамках следующей многоэтапной процедуры, в соответствии с которой *на первой фазе* должно осуществляться формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний ЦП (в том числе ИС) или, другими словами, должен проводиться структурно-функциональный синтез нового облика ЦП, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке. На данном этапе на основе многомерного ортогонального проектирования на множество достижимости, сформированного в результате комплексного моделирования структурной динамики ЦП, множества, с помощью которого задаются требования, предъявляемые к частным показателям

эффективности ЦП (новому облику ЦП), происходит формирование множества неокончателных решений (множества недоминируемых, эффективных альтернатив, множества Парето). Окончателный выбор эффективных системотехнических решений должен осуществляться из указанного множества. *На второй фазе* проводится выбор и реализация конкретного варианта многоструктурного макросостояния ЦП с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) управления переходом ЦП из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие ЦП, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого управления ЦП в промежуточных макросостояниях.

5. Заключение. В статье рассмотрены ИИТ, формирующие основу концепций Индустрии 4.0 и киберфизических систем для выявления основных направлений влияния указанных концепции и технологий на изменения принципов управления цепями поставок в ближайшем будущем. Вместе с тем анализ литературы и практических примеров Индустрии 4.0 показал, что наряду с развитием информационных и инженерных технологий Индустрии 4.0 в экономической части управления ТЛП и ПП отсутствует четкое понимание и описание бизнес-моделей, в рамках которых эти технологии могут применяться. Проанализированные примеры из практики позволяют сделать вывод, что технологии Индустрии 4.0 и киберфизических систем используются контекстно в виде лишь ограниченного набора той или иной функциональности (например, RFID, сенсоры или 3D принтеры). Основная же идея Индустрии 4.0 и КФС — создание самоорганизующихся и самоадаптирующихся динамических сетевых структур поставок на протяжении всего жизненного цикла изделий для реализации максимально гибкого индивидуального производства с затратами массового поточного производства — на данный момент реализована лишь в ряде исследовательских проектов.

К причинам подобного развития следует отнести преобладание инженерных разработок в области технологии Индустрии 4.0 и КФС и недостаточное участие экономистов и управленцев-практиков в данных проектах. Для менеджеров цепей поставок пока остается непонятным влияние инвестиций в технологии Индустрии 4.0 и киберфизических систем на повышение доходности бизнеса. Вместе с тем потенциал технологий Индустрии 4.0 и киберфизических систем наряду с уже существующими практическими реализациями не оставляет сомнений в том, что принцип «технология определяет организацию» и на этот раз подтвердится на практике. В связи со ска-

занным в статье ее авторами предложена оригинальная интерпретация сервис-ориентированного подхода применительно к задачам оценивания и выбора эффективных стратегий внедрения и использования ИИТ и ИТ в существующих и перспективных цепях поставок, базирующаяся на разрабатываемой авторами прикладной теории проактивного управления структурной динамикой ЦП.

В рамках предложенного подхода к формализации и решению одной из центральных проблем промышленного Интернета вещей, связанной с ситуационным структурно-функциональным синтезом как ЦП, так и соответствующих ИИТ и ИС удастся с единых методологических и методических позиций одновременно решить следующие пять основных задач комплексного планирования функционирования и модернизации рассматриваемого класса СКФС. Во-первых, удастся сформировать (синтезировать) конечный облик соответствующих модернизируемых СКФС. Во-вторых появляется возможность определить сроки, к которым должна завершиться указанная модернизация. В-третьих, можно определить технологии модернизации СКФС (в рамках которой на каком-то интервале времени будут одновременно функционировать элементы и подсистемы «старой» и «новой» СКФС, чтобы обеспечить устойчивость функционирования в целом СКФС). В-четвертых, появляется возможность определить программу перехода от «старой» и «новой» СКФС. В-пятых, удастся сформировать программы перепланирования либо коррекции исходной программы модернизации СКФС, если появятся непредусмотренные возмущающие воздействия.

При этом в рамках предложенного формального описания (см. формулу (2) и конкретные варианты ее реализации [30]) удастся описать как процессы совместного функционирования бизнес-систем (БС), связанных с функционированием ЦП, так и обеспечивающих их работу ИС, а также процессы модернизации ИС с учетом различных схем их финансирования и сценариев реализации возмущающих воздействий со стороны внешней среды. К настоящему времени, базируясь на сервис-ориентированном подходе к оцениванию эффективности ЦП, ИТ и ИС удастся, с одной стороны, зафиксировать в стоимостной форме объем услуг, оказываемых ИС соответствующей БС (ЦП), а с другой стороны, каждую услугу (сервис) можно непосредственно связать с конкретными информационными ресурсами, которые необходимы для ее реализации. Указанное обстоятельство очень важно при обосновании распределения денежных средств, выделяемых на приобретение и эксплуатацию аппаратно-программных средств современных ИС в рамках создаваемых структур производственного Интернета вещей.

Литература

1. *Orunfleh S., Tarafdar M.* Supply chain management practices — IT utilisation alignment: Impact on supply chain performance and firm performance // *International Journal of Business Information Systems*. 2015. vol. 18(4). pp. 364–389.
2. *Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L.S.* A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing // *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(23). pp. 7060–7073.
3. *Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S.Y.* Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies // *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(23). pp. 6969–6983.
4. *Theorin A. et al.* An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 1297–1311.
5. *Ivanov D., Sokolov B.* Adaptive Supply Chain Management // London: Springer. 2010. 245 p.
6. *Ivanov D. et al.* A dynamic model and an algorithm for shortterm supply chain scheduling in the smart factory Industry 4.0 // *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(2). pp. 386–402.
7. *Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D.* Towards Industry 4.0 — Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems // *Proceedings of IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 48. Issue 3. pp. 579–584.
8. *Zhong R.Y., Xu C., Chen C., Huang G.Q.* Big Data Analytics for Physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors // *International Journal of Production Research*. 2015. pp. 2610–2621.
9. *Oesterreich T.D., Teuteberg F.* Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry // *Computers in Industry*. 2016. vol. 83. pp. 121–139.
10. *Велихов Е.П., Бетелин В.Б., Кушницренко А.Г.* Промышленность, инновации, образование и наука в России // М.: Наука. 2009. 141 с.
11. *Вонг Р., Перинг Т., Тенненхау Д.* Адаптивные и проактивные компьютерные системы // *Открытые системы*. 2003. № 7. С. 4–9.
12. *Добрынин А.П. и др.* Цифровая экономика — различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) // *International Journal of Open Information Technologies*. 2016. Т. 4. № 1. С. 4–11.
13. *Черняк Л.* Платформа для облаков // *Открытые системы. СУБД*. 2014. № 8. С. 42–46.
14. *Черняк Л.* Гибридные облака: новый виток виртуализации // *Открытые системы. СУБД*. 2014. № 9. С. 11–15.
15. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: Наука. 2006. 410 с.
16. *Erol S. et al.* Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production // *Procedia CIRP*. 2016. vol. 54. pp. 13–18.
17. *Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W.* Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment // *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 2590–2602.
18. *Kolberg D., Zühlke D.* Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // *Proceedings of IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 48. Issue 3. pp. 1870–1875.
19. *Zhuge H.* Semantic linking through spaces for cyber-physical-socio intelligence: A methodology // *Artificial Intelligence*. 2015. vol. 175. Issues 5–6. pp. 988–1019.

20. *Намиот Д.Е.* Умные города 2016 // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4. № 1. С. 1–3.
21. *Кульба К.С.* Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM — системы // М.: Машиностроение. 2008. 256 с.
22. *Соломенцев Ю.М., Волкова Г.Д.* Когнитивные технологии в конструкторско-технологической информатике // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 4. С. 132–135.
23. *Хищенко В.Е.* Самоорганизация: элементы теории и социальные приложения // М.: КомКнига. 2005. 224 с.
24. *Шваб К.* Четвертая промышленная революция // М.: Эксмо. 2018. 278 с.
25. *Бир С.* Мозг фирмы // М.: УРСС. 2005. 416 с.
26. *Верзилин Д.Н., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Неокибернетика — вчера, сегодня, завтра // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон». 2014. С. 192–201.
27. *Крылов С.М.* Неокибернетика: Алгоритмы, математика эволюции и технологии будущего // М.: Издательство ЛКИ. 2008. 288 с.
28. *Hübner H.* Neocybernetics in Biological Systems. Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory. Report 151. 2006. 273 p.
29. *Юсупов Р.М., Соколов Б.В.* Проблемы развития кибернетики и информатики на современном этапе // Сб. «Кибернетика и информатика». 2006. С. 6–21.
30. Официальный сайт лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании (ЛИТСАМ). URL: <http://litsam.ru> (дата обращения: 01.08.2016).
31. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5–22; № 2. С. 5–21.
32. *Скрипкин К.Г.* Экономическая эффективность информационных систем // М.: ДМК Пресс. 2002. 256 с.
33. *Юсупов Р.М., Мусаев А.А.* Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. 2017. № 2(51). С. 5–34.

Иванов Дмитрий Александрович — д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой управления международными цепями поставок, Берлинская школа экономики и права. Область научных интересов: структурная динамика цепей поставок, риски в цепях поставок, динамическое планирование расписаний. Число научных публикаций — 300. dmitri.ivanov@mail.ru; ул. Баденштрассе, 50-51, 10825, Берлин, Германия; р.т.: +49(0)3030877-1155.

Иванова Марина Александровна — к-т экон. наук, научный сотрудник отдела бизнеса и экономики, Берлинская школа экономики и права. Область научных интересов: индустрия 4.0, планирование и оперативное управление в цепях поставок. Число научных публикаций — 40. marina.ivanova@hwr-berlin.de; ул. Баденштрассе, 50-51, 10825, Берлин, Германия; р.т.: +49(0)3030877-1155.

Поддержка исследований. Результаты исследований, представленные в 1-3 разделах статьи, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214, 17-29-07073- оф-м, 18-07-01272, 18-08-01505), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, результаты исследований, представленные в 4 и 5 разделах статьи, проводились в рамках финансирования по бюджетной теме №№0073–2018–0003.

D.A. IVANOV, M.A. IVANOVA, B.V. SOKOLOV
**ANALYSIS OF TRANSFORMATION TRENDS IN ENTERPRISE
MANAGEMENT PRINCIPLES IN THE ERA OF INDUSTRY 4.0
TECHNOLOGY**

Ivanov D.A., Ivanova M.A., Sokolov B.V. Analysis of Transformation Trends in Enterprise Management Principles in the Era of Industry 4.0 Technology.

Abstract. This study is devoted to the existing and future information technology that forms a base for concepts of Industry 4.0 and cyber-physical systems using examples of firms that apply this technology. Examples include manufacturing and transportation companies. The objective of this paper is to analyse the impact of intelligent information technologies in Industry 4.0 and cyber-physical systems on the enterprise management principles in near future. The transformation trends are illustrated on case-study examples. The literature and case-study analysis shows that enterprise management in manufacturing and transportation lacks understanding of Industry 4.0 and cyber-physical systems in terms of application to concrete business models. The reviews cases lead to the conclusion that the Industry 4.0 and cyber-physical technology applications are rather contextual and engineering-oriented. The implementation of the main principle of the Industry 4.0 and cyber-physical technology, i.e., the self-organisation and self-adaption of dynamic networked structures along the entire product lifecycle to ensure the flexible individual manufacturing at the mass production costs, has been yet applied very restrictively and mostly in research projects. The paper presents an original interpretation of the service-oriented approach to modeling and solution of the information technology assessment and selection problems to facilitate a broader application in firms. This approach is based on the structural dynamics control theory developed by the authors.

Keywords: Cyber-Physical system, Industry 4.0, intelligent information technology, supply chain, manufacturing, effectiveness of information technology utilization.

Ivanov Dmitry Alexandrovich — Dr. Habil., professor, head of international supply chain management department, Berlin School of Economics and Law (BSEL). Research interests: structural dynamics of supply chains, risks in supply chains, dynamic scheduling of schedules. The number of publications — 300. dmitri.ivanov@mail.ru; 50, Badensche Str., 10825, Berlin, Germany; office phone: +49(0)3030877-1155.

Ivanova Marina Alexandrovna — Ph.D., research associate of department of business and economics, Berlin School of Economics and Law (BSEL). Research interests: industry 4.0 systems, supply chain planning and scheduling. The number of publications — 40. marina.ivanova@hwr-berlin.de; 50, Badensche Str., 10825, Berlin, Germany; office phone: +49(0)3030877-1155.

Sokolov Boris Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, head of information technologies in systems analysis and modeling laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 560. sokol@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

Acknowledgements. The research described in 1-3 paper sections is partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214, 17-29-07073-ofi-i, 18-07-01272, 18-08-01505)), state order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation №2.3135.2017/4.6, the research described in 4 paper section is partially supported by the state research №№0073–2018–0003.

References

1. Qrunfleh S., Tarafdar M. Supply chain management practices — IT utilisation alignment: Impact on supply chain performance and firm performance. *International Journal of Business Information Systems*. 2015. vol. 18(4). pp. 364–389.
2. Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L.S. A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing. *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(23). pp. 7060–7073.
3. Nayak A., Reyes Levalle R., Lee S., Nof S.Y. Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies. *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(23). pp. 6969–6983.
4. Theorin A. et al. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 1297–1311.
5. Ivanov D., Sokolov B. Adaptive Supply Chain Management. London: Springer. 2010. 245 p.
6. Ivanov D. et al. A dynamic model and an algorithm for shortterm supply chain scheduling in the smart factory Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(2). pp. 386–402.
7. Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D. Towards Industry 4.0 — Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *Proceedings of IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 48. Issue 3. pp. 579–584.
8. Zhong R.Y., Xu C., Chen C., Huang G.Q. Big Data Analytics for Physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors. *International Journal of Production Research*. 2015. pp. 2610–2621.
9. Oesterreich T.D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*. 2016. vol. 83. pp. 121–139.
10. Velihov E.P., Betelin V.B., Kushnirenko A.G. *Promyshlennost', innovacii, obrazovanie i nauka v Rossi* [The industry, innovations, science and education in Russia]. M.: Nauka. 2009. 141 p. (In Russ.).
11. Vong R., Pering T., Tennenhou D. [Adaptive and pro-active computer systems]. *Otkrytye sistemy – Open systems*. 2003. vol. 7. pp. 4–9. (In Russ.).
12. Dobrynin A.P. et al. [Digital economy — various ways to effective use of technologies (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA et al.)]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016. vol. 4. no. 1. pp. 4–11. (In Russ.).
13. Chernjak L. [Platform for clouds: fabric computing]. *Otkrytye sistemy. SUBD – Open systems*. 2014. vol. 8. pp. 42–46.
14. Chernjak L. [Hybrid clouds: a new round of virtualization]. *Otkrytye sistemy. SUBD – Open systems*. 2014. vol. 9. pp. 11–15.
15. Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravleniya strukturnoj dinamikoj slozhnykh tehnicheskikh ob'ektov* [Intellectual technologies of monitoring and management of complex technical objects structural dynamics] M.: Nauka. 2006. 410 p. (In Russ.).
16. Erol S. et al. Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP*. 2016. vol. 54. pp. 13–18.

17. Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment. *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 2590–2602.
18. Kolberg D., Detlef Zühlke. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. Proceedings of IFAC-PapersOnLine. 2015. vol. 48. Issue 3. pp. 1870–1875.
19. Zhuge H. Semantic linking through spaces for cyber-physical-socio intelligence: A methodology. *Artificial Intelligence*. 2015. vol. 175. Issues 5–6. pp. 988–1019.
20. Namiot D.E. [Smart cities 2016]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016. vol. 4. no. 1. pp. 1–3. (In Russ.).
21. Kul'ga K.S. *Avtomatizacija tehničkoj podgotovki i upravlenija proizvodstvom na osnove PLM — sistemy* [Automation of technical training and production management on the basis of PLM — systems]. M.: Mashinostroenie. 2008. 256 p. (In Russ.).
22. Solomencev Ju.M., Volkova G.D. [Cognitive technologies in design-technology informatics]. *Vestnik MGTU «Stankin» – Vestnik MSTU «Stankin»*. 2008. vol. 4. pp. 32–135. (In Russ.).
23. Hicenko V.E. *Samoorganizacija: jelementy teorii i social'nye prilozhenija* [Self-organization: elements of the theory and social applications]. M.: KomKniga. 2005. 224 p. (In Russ.).
24. Schwab K. *Chevertaya promyshlennaya revolyuciya*. [Fourth industrial revolution]. M.: Eksmo. 2018. 278 p. (In Russ.).
25. Bir S. *Mozg firmy* [Firm's brain]. M.:URS. 2005. (In Russ.).
26. Verzilin D.N., Sokolov B.V., Yusupov R.M. [Neocybernetics — yesterday, nowadays, tomorrow]. *Materialy konferencii «Informacionnye tehnologii v upravlenii» (ITU-2014)* [Information Technologies in Control: Collected papers]. SPb.: JSC «Concern CRI «Elektropribor». 2014. pp. 192–201. (In Russ.).
27. Krylov S.M. *Neokibernetika. Algoritmy, matematika evoljutsii I tehnologii budushego* [Neocybernetics. Algorithms, mathematics of evolution and technologies of the future]. M.: Izdatelstvo LKI. 2008. 288 p. (In Russ.).
28. Hyötyniemi H. Neocybernetics in Biological Systems. Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory. Report 151. 2006. 273 p.
29. Yusupov R.M., Sokolov B.V. [Cybernetics development problems and computer science at the present stage]. *Problemy razvitiya kibernetiki i informatiki na sovremennom etape* [Cybernetics and informatics: Collected papers]. 2006. pp. 6–21. (In Russ.).
30. Oficial'nyj sajt laboratorii informacionnyh tekhnologij v sistemnom analize i modelirovanii (LITSAM) [Official web site of information technologies in systems analysis and modeling laboratory]. Available at: <http://litsam.ru> (accessed: 01.08.2016).
31. Vasil'ev S.N. [From classical problems of regulation to intellectual management] *Teorija i sistemy upravlenija*. 2001. vol. 1. pp. 5–22; vol. 2. pp. 5–21. (In Russ.).
32. Skripkin K.G. *Jekonomicheskaja jeffektivnost' informacionnyh system* [Economic efficiency of information systems]. M.: DMK Press. 2002. 256 p. (In Russ.).
33. Yusupov R.M., Musaev A.A. [Efficiency of Information Systems and Technologies: Features of Estimation]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceeding*. 2017. vol. 2(51). pp. 5–34. (In Russ.).