

На правах рукописи

Жиляев Алексей Александрович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ПОСТРОЕНИЯ «ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ» ПРОЦЕССОВ
УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ
И МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена на кафедре «Конструкции и проектирования летательных аппаратов» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» и кафедре «Электронные системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Научный руководитель: **Скобелев Петр Олегович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Официальные оппоненты: **Граничин Олег Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры системного программирования математико-механического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

Шишкин Вадим Викторович, Кандидат технических наук, доцент кафедры, директор института авиационных технологий и управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, (ИПУ РАН), г. Москва

Защита состоится «__» октября 2021 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.03 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корпус № 6, ауд. № 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская, д. 18.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.03; тел. (846) 337-04-43, e-mail: zoteev-ve@mail.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.217.03

Зотеев В.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Понятие «цифрового двойника» (ЦД) объекта (Grieves и др.) еще только входит в науки об управлении и обработке данных.

Общепринятых определений ЦД еще не выработано, но на практике выделяют следующие свойства ЦД (В. Barricelli и др): быть виртуальным «представителем» объекта, замещающим его при планировании и моделировании; обеспечивать непрерывную синхронизацию своего состояния с состоянием реального объекта; поддерживать автономность работы относительно объекта. Такое понимание ЦД отражает суть происходящей конвергенции различных информационных технологий, направленной на построение целостного виртуального образа объекта, работающего в реальном времени параллельно с реальным объектом.

Для достижения этой цели объединяются возможности кибер-физических систем (КФС) и компьютерных моделей объекта управления, отражающих структуру и поведение объекта и имеющих обратную связь для самосинхронизации с состоянием реальных объектов (А. Боровков и др.). Но если изначально ЦД строились для технических объектов, то в последнее время начали создаваться ЦД процессов управления предприятиями (далее – ЦД предприятий), включающие процессы распределения, планирования и контроля использования ресурсов.

В развитие этого направления под ЦД предприятия в настоящей работе предложено понимать интеллектуальную кибер-физическую систему (ИКФС), расширяющую возможности ERP систем по оперативному управлению задачами и ресурсами предприятия в реальном времени, а также моделирование его работы и синхронизацию модели предприятия с состоянием реального предприятия.

Для реализации ЦД предприятий предлагается использование онтологий и мультиагентных технологий, позволяющих принимать решения по событиям.

Цель применения онтологий, создаваемых в рамках Semantic Web и получивших развитие в работах Т. Gruber, В. Хорошевского, Т. Гавриловой, С. Смирнова и ряда других авторов, – создание формализованной модели знаний о предметной области «Управление ресурсами предприятия», которая далее может расширяться на сферу деятельности предприятия и порождать его онтологическую модель, используемую в унифицированной мультиагентной системе (МАС) для настройки на предметную область и специфику работы предприятия.

Мультиагентные технологии развиваются в работах М. Wooldridge, P. Jennings, A. Tambe, H. Brussel, P. Valkenaers, V. Marik, P. Verba, P. Leitao, G. Rzevski, В. Городецкого, В. Тарасова уже несколько десятилетий. Для мультиагентного решения задач управления ресурсами В. Виттихом и П. Скобелевым в 2002 – 2003 гг. была предложена концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) на основе виртуального рынка, которая в 2010 – 2020 гг. была развита в работах Е. Клейменовой, О. Лахина, И. Майорова и А. Лады для решения конкретных прикладных задач управления ресурсами. Важным теоретическим результатом, полученным в работах Y. Shoham и K. Leyton-Brown в 2009 – 2010 гг., было доказательство эквивалентности методов линейного программирования и виртуального рынка в задаче о назначениях, но более сложные задачи планирования и оптимизации ресурсов при этом не рассматривались. В работах А. Фрадкова и О. Граничина доказана эффективность мультиагентных методов

локального голосования для получения глобального оптимума при решении задачи динамического распределения нагрузки в сетях с переменной топологией и помехами. Однако задачи построения ЦД предприятий на основе онтологий, сочетающих в себе планирование и исполнение планов в МАС по событиям в реальном времени, а также моделирование процессов управления, не ставились. Кроме того, опыт разработки ПВ-сетей для различных применений показал существенную сложность и трудоемкость этого процесса, что требует создания инструментальных средств для автоматизации разработки ЦД предприятий.

В этой связи задача разработки методов и средств создания ЦД предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий является актуальной.

Целью диссертационного исследования является разработка методов и средств построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий для повышения оперативности управления ресурсами и сокращения трудоемкости, стоимости и сроков создания «цифровых двойников» предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить системный анализ особенностей задачи управления производственными ресурсами, которые должны учитываться при создании «цифровых двойников» предприятий.

2. Разработать базовую онтологию управления ресурсами и методику построения онтологических моделей «цифровых двойников» предприятий, позволяющую учитывать особенности производственной области предприятия при планировании его деятельности.

3. Модифицировать базовые классы агентов ПВ-сети и протоколы их взаимодействия для решения задачи поиска баланса интересов (консенсуса) агентов при возникновении событий рассогласования состояния «цифрового двойника» и реального предприятия.

4. Разработать комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания программных компонент «цифровых двойников» предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий.

5. Провести апробацию разработанных методов и средств построения «цифровых двойников» в задачах управления ресурсами различных предприятий.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы системного анализа, методы исследования операций и теории расписаний, модели и методы построения ПВ-сетей, теория множеств, методы формализованного представления знаний и построения онтологий для поддержки принятия решений.

Достоверность результатов обеспечивается применением классических методов в новой области ЦД, сопоставлением классических и разработанных методов и средств построения ЦД на модельных и реальных данных, практическим использованием результатов применения ЦД для решения задач управления целевым применением космических аппаратов, сборкой самолетов и электромобилей, бурением нефтяных скважин, выращивания посевов растений, сравнением результатов моделирования с результатами, полученными квалифицированными специалистами предприятий.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются производственные системы, предметом – методы и средства принятия решений по управлению ресурсами на основе онтологий и мультиагентных технологий.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена методика построения ЦД предприятий в виде ИКФС, синхронизируемых с реальным предприятием по событиям в реальном времени, позволяющая повысить оперативность управления и сократить сроки создания ЦД.

2. Разработана базовая онтология управления ресурсами для создания онтологических моделей предприятий, позволяющих настраивать ЦД на специфику производственного предприятия без перепрограммирования.

3. Модернизирована модель ПВ-сети за счет введения новых классов онтологически-настраиваемых агентов и методов (протоколов) их взаимодействия для автоматизации процессов создания ЦД предприятий.

4. Разработаны инструментальные средства построения ЦД предприятий позволяющие создавать и развивать ЦД пользователями-непрограммистами.

5. На основе разработанного инструментального комплекса впервые созданы прикладные ЦД для различных предприятий.

Практическая значимость. Результаты работы позволяют:

1. Решить сложные задачи управления ресурсами предприятий, в частности задачи управления сборкой самолетов и электромобилей, бурением скважин, целевым применением группировки космических аппаратов и выращиванием посевов сельскохозяйственных культур.

2. Снизить трудоемкость, стоимость и сроки разработки и эксплуатации ЦД предприятий.

3. Обеспечить открытость создаваемых ЦД процессов управления предприятиями за счет расширения предметных онтологий и модификации онтологических моделей предприятий.

4. Повысить оперативность, гибкость и эффективность управления ресурсами, а также снизить риск возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором.

5. Повысить коэффициент использования программных компонент при разработке новых ЦД процессов управления предприятиями.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика построения ЦД процессов управления предприятиями в виде ИКФС управления ресурсами, синхронизируемых по событиям.

2. Базовая онтология управления ресурсами ЦД для построения онтологических моделей предприятия.

3. Унифицированная МАС, расширенная новыми классами агентов и протоколами их взаимодействия в ЦД, обеспечивающая настройку на предметную область посредством загрузки онтологической модели предприятия.

4. Комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания программных компонент ЦД предприятий.

5. Прототипы ЦД для управления целевым применением группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), агрегатно-

сборочным производством самолетов и электромобилей; бурением нефтяных скважин и выращиванием посевов сельскохозяйственных культур.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при проектировании, разработке и внедрении интеллектуальных систем управления производством самолета МС-21 в ПАО «Иркут» (г. Иркутск), управления сборкой грузовых электромобилей с применением робототехнических комплексов для компании «ТРА» (г. Санкт-Петербург), управления группировкой космических аппаратов для предприятия «СТТ Групп», управления бурением нефтяных скважин для компании «Газпромнефть-Ямал» (г. Тюмень), а также управления сельскохозяйственным предприятием точного земледелия на основе ЦД посевов растений для ОАО «Рассвет» (Ростовская область).

Результаты использованы в проектах Минобрнауки РФ 14.576.21.0012 – уникальный ID номер RFMEFI57614X0012, выполненному в ООО "Научно-производственная компания "Разумные решения" и № 075-15-2019-1691 – уникальный ID номер RFMEFI60419X0224, выполненному в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: Всероссийская конференция «Инфокоммуникационные технологии в научных исследованиях» (г. Таруса, 14 – 16 ноября 2012 г.); XII Королевские чтения: Международная молодёжная научная конференция (г. Самара, 1 – 3 октября 2013 г.); Международная научно-техническая конференция «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, 4 – 6 декабря 2013 г.); XVI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 30 июня – 3 июля 2014 г.); VII Российская мультikonференция по проблемам управления (г. Санкт-Петербург, 7 – 9 октября 2014 г.); Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем» (г. Москва, 17 – 19 ноября 2014 г.); International Conference on Complex Systems in Business, Administration, Science and Engineering (New Forest, UK, 12 – 14 May 2015); Восьмая всероссийская мультikonференция по проблемам управления (г. Геленджик, 28 сентября – 3 октября 2015 г.); XVIII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 20 – 25 сентября 2016 г.); XII International Symposium «Intelligent Systems» (г. Москва, 5 – 7 октября 2016 г.); XIX Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 12 – 15 сентября 2017 г.); Десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления (г. Геленджик, 25 – 30 сентября 2017 г.); 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Funchal, Portugal, 16 – 18 January 2018); International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization (Prague, Czech Republic, 9 – 21 May 2018); 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Valetta, Malta, 22 – 24 February 2020).

Основные публикации. Результаты опубликованы в 20 научных работах, из них 5 – в журналах, рекомендованных ВАК, 6 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 9 работ – в трудах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад аспиранта. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: [1], [8], [12] – разработка модифицированной модели ПВ-сети для управления ресурсами и проведение экспериментальных исследований методов взаимодействия малых космических аппаратов; [2], [6] – разработка протоколов переговоров агентов; [3], [9] – реализация бесконфликтного и проактивного планирования в ПВ-сети; [4], [11] – применение онтологии для настройки логики агентов; [7] – проведение экспериментального сравнения мультиагентного и комбинаторного поиска для задачи планирования передачи спутниковых данных на сеть наземных станций; [10] – разработка механизма планирования, проведение экспериментальных исследований времени восстановления расписания после разрушающих событий; [17] – разработка базового метода адаптивного планирования с применением онтологии и базы знаний; [14], [15] – формализация задачи планирования передачи данных в сети наноспутников и наземных станций, описание мультиагентного подхода к решению задачи; [16], [20] – разработка платформы мультиагентного оперативного планирования ресурсов; [18] – разработка онтологической модели стадий развития пшеницы; [19] – применение онтологий для настройки модуля мультиагентного планирования, а также пример реализации подхода для управления ростом и развитием пшеницы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 75 источников. Текст занимает 124 страницы основной части, содержит 79 рисунков, 11 таблиц и 6 приложений объемом 10 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения, приведены сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе рассмотрена задача построения ЦД процессов управления предприятиями и показаны возможные принципы и подходы к ее реализации, обоснован выбор баз знаний и мультиагентных технологий для их построения.

Предложена методика построения ЦД предприятия в виде ИКФС на базе МАС, обеспечивающая автоматизацию всего цикла управления ресурсами, включая процессы распределения заказов, планирования задач и оптимизации их исполнения, мониторинга и контроля результатов, моделирования работы предприятия и синхронизации его состояния в реальном времени.

Сформулированы требования к ЦД рассматриваемого типа, которые должны позволять описывать структуру предприятия, изготавливаемые изделия или предоставляемые сервисы, используемые технологические и бизнес-процессы, необходимые для выполнения задач ресурсы, строить планы работы предприятия до уровня сотрудников и контролировать их исполнение, моделировать варианты действий, оценивать эффективность работы предприятия в реальном времени, синхронизировать состояния ЦД и реального предприятия путем обработки событий и выдачи предложений к планам работы.

Для синхронизации состояния ЦД и реального предприятия предложено использовать событийный подход, когда каждое событие, поступающее от датчиков или мобильных устройств, должно вызывать переходный процесс с адаптивным пересмотром планов предприятия и их согласования с сотрудниками. При этом требуется найти новое «конкурентное равновесие» (консенсуса) агентов предприятия в целом и его подразделений (до уровня каждого заказа и ресурса).

Обоснована возможность использования ЦД как для оперативного управления предприятием, так и для его моделирования по типу «Что будет, если ...?».

Во второй главе выделены основные концепты и построена базовая онтология управления ресурсами в форме семантической сети, состоящей из классов понятий и отношений, а также предложена методика построения онтологической модели ЦД предприятия.

Общее определение онтологии имеет вид: $O = \langle C, R, \Phi \rangle$, где C – множество понятий, R – множество атрибутов и отношений (n -местных предикатов), Φ – множество функций семантической обработки (интерпретации), заданных на понятиях и отношениях.

Для построения онтологических моделей предприятий предлагается использовать базовую онтологию управления ресурсами O_{plan} , в которой на основе анализа различных производственных задач выделены наиболее общие и повторно используемые понятия (таблица 1), в то время как детали, зависящие от предметной области предложено специфицировать в прикладных онтологиях O_{domain} , расширяющих базовую: $O_{domain} \supseteq O_{plan}$.

Таблица 1 – Основные понятия базовой онтологии управления ресурсами

Заказ	Заявка на выпуск продукта, специфицирующая его количество и директивные сроки получения
Продукт	Объект, поступающий на вход или являющийся результатом выполнения задачи
Задача	Групповая или атомарная работа (набор связанных работ), выполнение которых необходимо для получения продукта
Ресурс	Средства производства, необходимые для выполнения задачи

Онтология O_{plan} используется реализованными в МАС классами агентов, которые через функции интерпретации Φ получают возможность взаимодействовать с базой знаний. Часть понятий и отношений из O_{domain} являются производными от базовых понятий и отношений из O_{plan} , что позволяет объяснить МАС, как работать с онтологией предметной области, связав ее понятия и отношения с уже известными и интерпретируемыми системой, обработка которых встроена в ее программный код. При этом O_{domain} может также включать понятия и отношения, не являющиеся производными от базовых, которые будут использоваться МАС при сопоставлении свойств ресурсов и продуктов с требованиями со стороны задач.

В предлагаемой формализованной онтологии управления ресурсами C_{plan} заказы (*Order*) определяют количество и сроки создания продукта (*Product*), задачи (*Task*) задают необходимую последовательность действий для его получения и специфицируют необходимые для своего выполнения ресурсы (*Resource*):

$$C_{plan} = \{Order, Product, Task, Resource\}.$$

Каждый заказ требует появления продукта («создает» – *create*), который, в свою очередь, связан с задачей, в результате выполнения которой он появляется:

$$\forall x \exists y (Order(x) \rightarrow Product(y) \wedge create(x, y)).$$

Продукты могут поступать на вход задаче, а также являться результатом ее выполнения, и в зависимости от роли в технологическом процессе их предложено декомпозировать на «Производимые» (*Produced Product*) и «Потребляемые» (*Consumed Product*). Между задачей и соответствующим видом продукта предложено отношение «производит» (*produce*) и «потребляет» (*consume*):

$$\forall x \exists y (ProducedProduct(x) \rightarrow Product(x) \wedge Task(y) \wedge produce(y, x)),$$

$$\forall x \exists y (ConsumedProduct(x) \rightarrow Product(x) \wedge Task(y) \wedge consume(y, x)).$$

Множество задач предложено разбивать на подмножества: «Групповые» (*Group Task*) и «Атомарные» (*Atomic Task*). Задачи связаны между собой посредством отношений вложенности («является частью» – *part of*) и упорядоченности («следует за» – *follow*). Эти отношения позволяют агенту найти предыдущую и следующую задачу для запроса о перемещении в расписании или сообщения о возникшей задержке в выполнении:

$$\forall x, y (partof(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y)),$$

$$\forall x, y (follow(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y)),$$

$$\forall x \exists y (GroupTask(x) \leftrightarrow Task(x) \wedge Task(y) \wedge partof(y, x)),$$

$$\forall x (AtomicTask(x) \leftrightarrow \neg GroupTask(x)).$$

В зависимости от способа определения длительности, предложено атомарные задачи подразделять на задачи с фиксированной длительностью, с фиксированным объемом работ и на задачи вида «гамак» (таблица 2).

Таблица 2 – Базовые типы задач

Атомарная	Фиксированная длительность	Продолжительность задана фиксированной нормой времени.
	Фиксированный объем работы	Продолжительность зависит от состава и характеристик используемых ресурсов и/или объема выпускаемого продукта.
	Гамак	Выполняется строго между задачами предшественниками и задачами последователями.
Групповая		Продолжительность «покрывает» интервалы выполнения дочерних задач.

Ресурсы обеспечивают выполнение задач и с точки зрения участия в технологическом процессе предложено их подразделять на преобразуемые и обеспечивающие (таблица 3).

Отношение «требует» (*require*) задает, какие ресурсы необходимы для выполнения задачи. Для моделирования выполнения задачи на различных наборах ресурсов вводится понятие «Требование к ресурсам» (*Resource requirement*):

$$\forall x, y (require(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge (ResourceRequirement(y) \vee Resource(y))).$$

Продукты могут требовать размещения (*stored*):

$$\forall x, y (stored(x, y) \rightarrow Product(x) \wedge ReusableResource(y)).$$

Таблица 3 – Базовые типы ресурсов

Преобразуемые	Тратится при выполнении задачи (в количестве, определенном ее требованиями), может быть восполнен согласно графику поставок
Обеспечивающие	Становится доступными для повторного использования в прежнем количестве сразу после завершения задач, на которые был выделен. Может иметь график зависимости располагаемого объема от времени.

Таким образом, на уровне базовой онтологии планирования фиксируется множество отношений R , которые должны поддерживаться МАС:

$$R_{plan} = \{create, consume, produce, partof, follow, require, stored\}.$$

Для работы с онтологиями управления ресурсами и построения баз знаний предприятий были выделены и реализованы в виде библиотеки средств агентов следующие функции семантической обработки (интерпретации) Φ :

1. $Concepts = \phi_1(c)$ – получить множество всех понятий $Concepts \subseteq C$, являющихся производными от указанного понятия $c \in C$.
2. $Relations = \phi_2(r)$ – получить множество всех отношений $Relations \subseteq R$, являющихся производными от указанного отношения $r \in R$.
3. $Instances = \phi_3(c)$ – получить множество всех экземпляров $Instances$ заданного класса $c \in C$ (включая экземпляры производных классов).
4. $AreRelated = \phi_4(c_1, c_2)$ – проверить является ли понятие $c_1 \in C$ производным от понятия $c_2 \in C$.
5. $AreRelated = \phi_5(r_1, r_2)$ – проверить является ли отношение $r_1 \in R$ производным от отношения $r_2 \in R$.
6. $IsPart = \phi_6(i, set)$ – определить, принадлежит ли экземпляр i заданному множеству set , путем сравнения атрибутов и отношений экземпляра с атрибутами и отношениями, определяющими это множество (учитывая возможность замещения базового класса или отношения производным).
7. $Tasks = \phi_7(p)$ – определить множество задач, результатом которых является получение указанного продукта $p \in ProducedProduct$.
8. $Resources = \phi_8(t)$ – определить подходящие для выполнения задачи $t \in Task$ ресурсы.
9. $Products = \phi_9(t)$ – определить подходящие для выполнения задачи $t \in Task$ продукты.

В отличие от базовой онтологии управления ресурсами, онтология предметной области может дополняться новыми элементами без необходимости последующего внесения изменений в состав и логику работы агентов. Для работы унифицированной МАС добавляемые новые понятия, атрибуты и отношения должны быть достижимы относительно базовых понятий, атрибутов и отношений при применении к ним функций семантической обработки Φ .

Например, на уровне онтологии машиностроения в качестве продуктов рассматриваются детали (*Component*), сборочные единицы (*AssemblyElement*) и изделия (*FinalProduct*), в качестве задач – технологические процессы (*Process*) и операции (*Operation*), ресурсы представлены оборудованием (*Equipment*), оснасткой (*Tool*) и персоналом (*Employee*):

$$\forall_x (Product(x) \rightarrow Component(x) \vee AssemblyElement(x) \vee FinalProduct(x)),$$

$$\forall_x (Task(x) \rightarrow Process(x) \vee Operation(x)),$$

$$\forall_x (Resource(x) \rightarrow Equipment(x) \vee Tool(x) \vee Employee(x)).$$

На основе прикладной онтологии строится онтологическая модель предприятия:

$$M = \{O_{domain}(O_{plan}), I\},$$

в которую, помимо понятий и отношений базовой онтологии O_{plan} и прикладной онтологии O_{domain} , рассмотренных выше, включаются дополнительные понятия уровня предприятия, а также экземпляры I введенных ранее понятий, например, добавляются единицы оборудования с инвентарными номерами, а также рабочие с табельными номерами, навыками и компетенциями.

На этой основе строится онтологическая сцена предприятия S , которая описывает состояние предприятия и содержит значения атрибутов всех экземпляров понятий и отношений онтологической модели предприятия для заданного момента времени t :

$$S = M(t).$$

В результате применения предлагаемого подхода расписание работы предприятия представляется в виде сложной сети семантически связанных между собой объектов, что позволяет не только учитывать специфику каждой задачи, но и использовать «топологию» расписания при принятии решений агентами, например, быстрее определять состав участников переговоров, существенно сокращая перебор вариантов и время вычислений.

Для создания ЦД предложена методика, позволяющая формализовать знания предметной области в онтологии и на этой основе создавать онтологические модели ЦД предприятия, состоящая в выполнении нижеследующих этапов:

1. Описать номенклатуру используемых и производимых продуктов или сервисов (сырья, полуфабрикатов, готовых изделий, сборочных единиц и др.).
2. Описать состав и структуру производственных ресурсов.
3. Задать технологические процессы получения продуктов, представляющие собой упорядоченный список задач (операций).
4. Определить критерии, предпочтения и ограничения для адаптивного планирования заказов на ресурсы предприятия при возникновении событий рассогласования плана и факта.
5. В качестве входных данных для такой модели могут подаваться перечень заказов, содержащих сведения об изготавливаемом продукте, его количестве и сроках выполнения, а также выделенные события (новый заказ, поломка станка, задержка исполнения задачи и т.д.).

В результате каждому реальному предприятию будет поставлена в соответствие его онтологическая модель, отражающая текущее состояние его заказов и ресурсов, а также планы и показатели работы на любой горизонт времени, ограниченный сроками крайнего заказа.

В третьей главе предложена постановка задачи достижения консенсуса между агентами системы при переходе из текущего – в новое состояние при появлении незапланированного события, рассинхронизирующего планы.

Состояние ЦД предприятия предлагается определить композицией состояний $s_i, i = \overline{1, n}$, объектов, участвующих в производственном процессе (заказов, продуктов, ресурсов и задач):

$$S_{twin} = \{s_i\},$$

$$s_i = \{model_i, plan_i, kpi_i\},$$

где: $model_i$, – онтологическая модель объекта; $plan_i$ – план работы объекта, kpi_i – показатели эффективности его работы. Если обозначить как S_{real} состояние реального предприятия, то необходимо, чтобы состояние реального предприятия и состояние его ЦД в каждый момент времени k максимально совпадали:

$$D(S_{real}^{(k)}, S_{twin}^{(k)}) \rightarrow 0,$$

где D – функция, показывающая степень различия онтологической модели, планов и показателей объектов ЦД с реальным предприятием. Тогда при появлении нового события $Event^{(k)}$ в реальном предприятии, его ЦД должен максимально быстро перейти в новое состояние за счет переходного процесса по адаптивному перепланированию задач и ресурсов, задетых событием:

$$S_{twin}^{(k+1)} = F(S_{twin}^{(k)}, Event^{(k)}),$$

где F – функция, адаптивно перестраивающая план работы предприятия в ответ на поступившее событие, которую и должна реализовывать МАС. Для решения поставленной задачи выделен модифицированный набор базовых объектов ПВ-сети и каждому такому объекту s_i поставлен в соответствие программный агент a_i , реализующий заданное для его класса поведение (таблица 4).

Будем определять цели каждого агента через функцию удовлетворенности $Y_i(plan_i)$, представляющую собой взвешенную сумму M компонент, соответствующих различным критериям – показателям kpi_i и рассчитываемых на основе текущего плана работы $plan_i$, связанного с агентом объекта:

$$Y_i = \sum_{j=1}^M w_{ij} y_{ij},$$

где: y_{ij} – компонент функции удовлетворенности по критерию $j = \overline{1, M}$,

w_{ij} – весовой коэффициент, такой что $0 \leq w_{ij} \leq 1$ и $\sum_{j=1}^M w_{ij} = 1 \forall i$.

Для автоматизации принятия решений будем использовать виртуальный рынок ПВ-сети системы, на котором агенты заказов могут покупать время ресурсов и решать конфликтные ситуации, когда несколько заказов или задач претендуют на использование одного и того же ресурса или продукта, посредством выплаты компенсаций за освобождение слота времени.

В зависимости от достигнутой удовлетворенности, агенту начисляется премия (штраф), размер которой определяется через заданную для него функцию бонусов и штрафов: $B_i(Y_i)$. Ожидаемый бонус и текущий бюджет могут быть потрачены агентом на выплату компенсаций агентам, которые согласились на уступки, но чье состояние было ухудшено при изменениях.

Функция удовлетворенности агента связывается с оценкой состояния объекта, а функция бонусов и штрафов – с возможностями агента перестроить расписание для удовлетворения своих интересов. Вид функций выбирается таким образом, чтобы приближение состояния агента к его идеалу показателей kpi_i повышало удовлетворенность и размер бонуса агента.

Таблица 4 – Цели, предпочтения и ограничения основных классов агентов

Тип	Цели и предпочтения	Ограничения
Агент заказа	Быть выполненным с минимальной задержкой (c) и стоимостью (p): $Y_i = w_1 \left(1 - \frac{c}{c_{кр}}\right) + w_2 \left(1 - \frac{p}{p_{кр}}\right)$	Сроки, объем, предельная стоимость
Агент задачи: • групповой • атомарной	Быть выполненным на подходящем ресурсе в указанные сроки за минимальное время ($\tau_i = finish_i - start_i$): $Y_i = \begin{cases} 1, & \tau_i < \tau_{опт} \\ \frac{\tau_i - \tau_{кр}}{\tau_{опт} - \tau_{кр}}, & \text{иначе} \end{cases}$	Характеристики требуемых ресурсов и продуктов, сроки начала и окончания, взаимосвязи с другими задачами
Агент ресурса	Быть максимально загруженным, минимизировать простои и переналадки: $Y_i = \begin{cases} 0, & u_i < u_{кр} \\ \frac{u_i - u_{кр}}{u_{опт} - u_{кр}}, & \text{иначе} \end{cases}$ где u_i – утилизация ресурса i	Календарь работы, интервалы недоступности, правила обслуживания и переналадки, производительность
Агент продукта	Обеспечить свое хранение, минимизировать время между производством и потреблением (e): $Y_i = 1 - \frac{e_i}{e_{кр}}$	Требования по хранению, время поставки или производства, время потребления
Агент системы (предприятия в целом)	Управление активностью агентов системы, взаимодействие с внешними системами	Время, отводимое на планирования, глубина цепочек перестановок в расписании

Агенты ресурсов дополнительно характеризуются функцией стоимости $W_i(plan_i, kpi_i)$, определяющей стоимость размещения задач.

В работе предложена модификация модели ПВ-сети, позволившая ввести неоднородные классы агентов с собственными функциями удовлетворенности и функциями бонусов и штрафов, а также метода сопряженных взаимодействий, позволяющая использовать онтологическую модель предприятия в работе унифицированной МАС, в которой для каждого экземпляра объекта модели будут создаваться собственные экземпляры агентов для анализа ситуации, планирования ресурсов и контроля их использования:

1. В соответствии с текущим состоянием ЦД S_{twin} создаются экземпляры агентов заказов, ресурсов и продуктов, которые получают разрешение от агента системы начать активность.

2. Агент активного заказа a_k считывает из базы знаний технологический процесс изготовления связанного с ним продукта и порождает агентов задач,

соответствующих технологическому процессу и его дочерним операциям, связанных между собой отношениями вложенности и очередности.

3. Агент задачи верхнего уровня проверяет наличие используемых при выполнении задачи продуктов, оценивает требования по ресурсам и подбирает их комбинацию на основе оценки своей продолжительности.

4. Процедура поиска вариантов размещения включает анализ требуемых ресурсов, сопоставление требований задач и возможностей ресурсов, согласование времен доступности всех ресурсов, выбор лучшей комбинации исполнителей на основе метода ветвей и границ.

5. По мере подбора ресурсов определяется множество заказов $\{a_i \mid i \neq k, plan'_k \cap plan_i \neq \emptyset\}$, мешающих размещению на выбранных ресурсах (конфликтное множество), что определяет направленный характер проводимого перебора и существенно сокращает число вариантов.

6. После выбора варианта размещения агент групповой задачи отправляет запрос на планирование агентам дочерних задач.

7. Агенты дочерних задач рекурсивно проводят поиск вариантов размещения с учетом установленных родительской задачей ограничений. Результаты планирования сообщаются агенту родительской задачи верхнего уровня, который уточняет свое размещение или предлагает задачам найти другое размещение.

8. Агент верхней задачи сообщает агенту заказа о выбранном размещении.

9. Агент заказа предлагает конфликтующим заказам найти себе другое место в расписании, сообщив потери, которые им пришлось понести по сравнению с базовым (отправным для текущей версии плана) вариантом расписания (рисунок 1). В результате определяется цепочка перестановок, рассчитываются потери агентов ΔB_i , которых затронули изменения. Цепочка перестановок успешна, если агент заказа может компенсировать потери конфликтующим заказам благодаря достигаемому приросту функции бонусов и штрафов ΔB_k :

$$\Delta B_k \geq \sum_{i \neq k}^n \Delta B_i$$

В этом случае изменение утверждается, иначе – ищутся другие варианты.

10. Агент заказа проверяет наличие связанных с ним отношений «Производится» продуктов и оповещает их агентов о сроках поставки на склад.

11. Процесс завершается, если вышло время, отводимое на построение расписания, или достигнуто условие **«конкурентного равновесия» (консенсуса)** которое состоит в том, что для любого агента a_k больше не находится такого изменения плана работы $plan'_k$, которое привело бы к приросту удовлетворенности ΔY_k и, как следствие, увеличению значения функции бонусов и штрафов ΔB_k , что смогло бы компенсировать суммарные потери остальных агентов a_i , затронутых этим изменением и нашедших другой вариант размещения $plan'_i$, минимизирующий их потери и согласующийся с ранее принятыми изменениями:

$$\Delta B_k + \sum_{i \neq k}^n \Delta B_i < 0 \quad \forall_k.$$

12. По достижению консенсуса мультиагентная система приостанавливает свою работу, выдает построенный новый план исполнителям и переходит в режим ожидания новых событий.

Существенным фактором, снижающим вычислительную сложность алгоритма, является использование направленного поиска вариантов перестановок при адаптивной перестройке расписания, при котором взаимодействие происходит только между конфликтующими заказами.

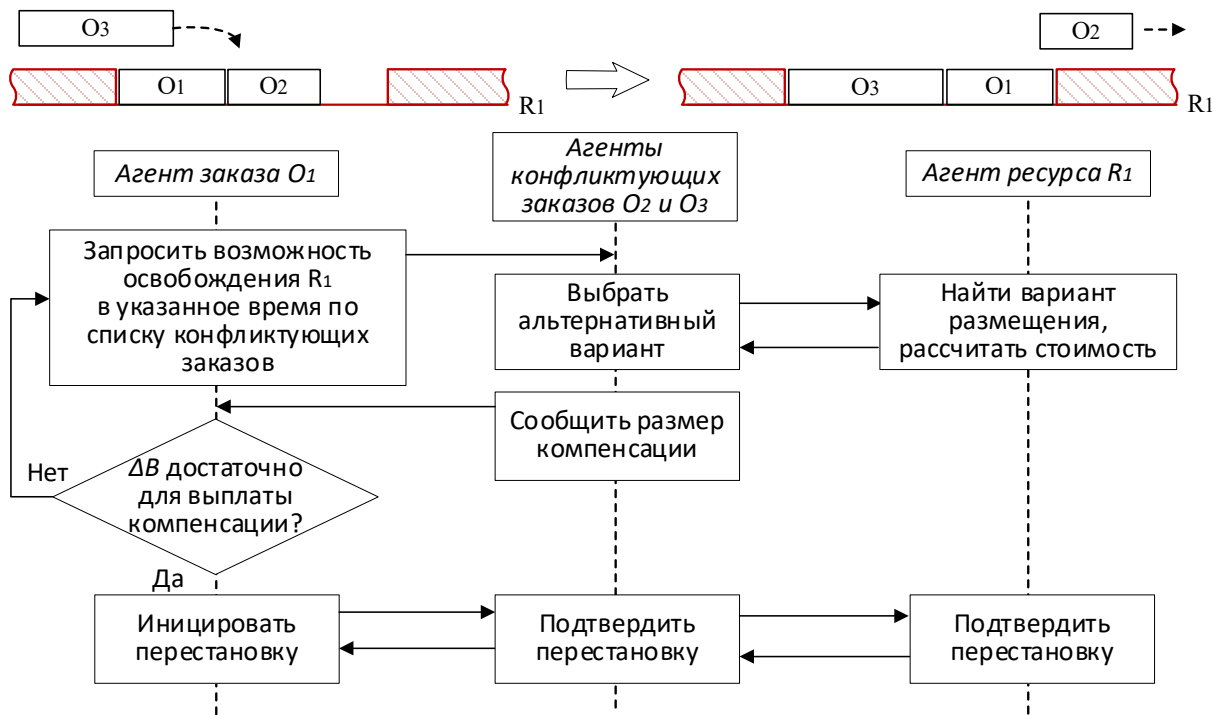


Рисунок 1 – Фрагмент переговоров агентов по разбору конфликта в расписании

В четвертой главе приводится описание функций и архитектуры комплекса инструментальных средств, предназначенных для создания ЦД.

В состав комплекса включен конструктор онтологий (КО) и баз знаний (КБЗ) предприятия (включает как классы, так и экземпляры понятий), конструктор сцен, унифицированная МАС управления ресурсами в реальном времени, очередь сообщений и средства взаимодействия с пользователем.

Основное назначение КО – построение, редактирование и хранение базовой и прикладных онтологий, а также предоставление программного доступа к этим данным. КБЗ предназначен для формирования онтологических моделей предприятий на основе онтологии выбранной предметной области.

МАС управления ресурсами обеспечивает создание и настройку виртуального мира агентов под заданную онтологическую модель каждого предприятия. На основе онтологической модели в виртуальном мире ЦД предприятия создаются экземпляры классов агентов для каждой сущности конкретного предприятия (заказа, станка, технологии, изделия, сотрудника и т.д.) и обрабатываются события, поступающие через очередь событий из мира реального предприятия. Основными функциями МАС являются адаптивное перепланирование расписания выполнения заказов с достижением нового консенсуса агентов по каждому событию, а также последующий мониторинг и контроль их исполнения. Исходные данные, результаты перепланирования и показатели работы МАС размещаются в сцене мира агентов, которая содержит массивы данных истории, текущего состояния и планов работы ЦД, показатели эффективности.

Веб-интерфейс пользователя включает в себя набор визуальных компонент для задания исходных параметров и визуализации результатов.

При загрузке онтологической модели предприятия создается виртуальный мир агентов ЦД, содержащий экземпляры основных агентов, и сцену (набор массивов) данных, отражающую параметры состояния объектов предприятия.

В любой момент времени ЦД предприятия может быть скопирован в отдельную версию для перехода к режиму моделирования «Что будет, если...?», чтобы предсказать реакцию ЦД на события, которые ожидаются, но пока еще не случились (приход нового крупного заказа, ввод в действие новых ресурсов, смена технологических процессов и т.д.).

В пятой главе рассмотрены применения разработанного комплекса программных средств для решения прикладных задач управления ресурсами:

- агрегатно-сборочного производства самолетов МС-21 для ОАО «Иркут»;
- сборочного производства грузовых электромобилей для ООО «ТРА»;
- бурения нефтедобывающих скважин для ООО «Газпромнефть-Ямал»;
- выращивания посевов растений для ОАО «Рассвет»;
- целевого применения группировки космических аппаратов ДЗЗ для СТТ-Групп.

Для каждого из прототипов описаны функциональное назначение и особенности архитектуры, рассмотрены основные сценарии использования и результаты применения.

Представлены результаты исследования разработанных методов и средств для оценки качества и эффективности решения прикладных задач, показавшие, что при небольшой потере качества метод и средства позволяют ускорить поиск решения, обрабатывать большее число заявок, причем по событиям.

Исследование применения разработанного комплекса показало существенное снижение сложности и трудоемкости разработки ЦД. При этом для каждого созданного ЦД оценивался объем изменений, вносимых в базовую онтологию, а также объем доработок основных классов агентов под задачу (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты применения комплекса для создания ЦД предприятий

Прикладная задача	Число классов понятий и отношений			Количество агентов	Время на разработку (чел/м)	
	O_{plan}	O_{domain}	M		БЗ	МАС
Сборка самолетов	61	152	925	> 350	3	3.5
Сборка грузовиков		89	382	> 520	1	2
Бурение скважин		85	441	> 5000	2	3
ЦД посевов		42	236	> 100	1	1
Группировка КА		112	304	> 450	1	4

Представленные данные показывают, что базовая онтология управления ресурсами O_{plan} оказалась построена из примерно 60 классов основных понятий и отношений. Прикладные онтологии расширяют состав понятий и отношений примерно в 2 – 3 раза. Онтологические модели предприятия, включающие экземпляры, имеют от 236 – до 925 экземпляров. Именно эти модели и загружаются в МАС, позволяя автоматически создать требуемое число агентов. Трудоемкость доработки унифицированной МАС для каждого из указанных применений

составила в среднем 2-3 месяца, что по экспертным оценкам позволяет в 3-4 раза сократить сроки и стоимость создания ЦД в сравнении с традиционным подходом.

В заключении диссертации формулируются основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена методика построения ЦД предприятий в виде ИКФС на основе онтологий и мультиагентных технологий.

2. Выполнен системный анализ сложных задач управления производственными ресурсами, формализована и построена базовая онтология управления ресурсами для построения прикладных онтологий и онтологических моделей ЦД, позволяющих настраивать ЦД на специфику предприятий.

3. Формализована постановка задачи поиска баланс интересов (консенсуса) программных агентов ЦД предприятия для оперативной и гибкой реакции на события, нарушающие планы, в реальном времени.

4. Модифицирована модель ПВ-сети предприятия: введены новые классы онтологически-настраиваемых неоднородных агентов и протоколы их взаимодействия, позволяющие применять создаваемые онтологические модели предприятий и расширять состав учитываемых при планировании факторов предметной области в ходе разработки и применения ЦД предприятий.

5. Разработан комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания программных компонент ЦД предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий.

6. Созданы ЦД предприятий для управления агрегатно-сборочным производством на авиастроительном предприятии; производством грузовых электромобилей, бурением нефтяных скважин, выращиванием посевов растений и целевым применением группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, обеспечивающие высокую оперативность управления.

7. Показано существенное (в 3 – 4 раза) сокращение сроков и стоимости разработки ЦД предприятий, получаемое за счет использования онтологических моделей предприятий для настройки систем рассматриваемого класса на особенности предметной области.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Жиляев, А.А. Мультиагентные технологии распределенного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.В. Соллогуб, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, А.В. Царев, М.Е. Степанов, А.А. Жиляев // Информационное общество. – 2013. – № 1-2. – С. 58-68.

2. Жиляев, А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли / А.В. Соллогуб, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, А.В. Царев, М.Е. Степанов, А.А. Жиляев // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 1(62). – С. 16-26.

3. Жилияев, А.А. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий / П.О. Скобелев, В.К. Скимунт, Е.В. Симонова, А.А. Жилияев, В.С. Травин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10(171). – С. 60-70.

4. Жилияев, А.А. Применение онтологии в интеллектуальной системе распределенного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов / П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.А. Жилияев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – № 2(5). – С. 1119-1130.

5. Жилияев, А.А. Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами / А.А. Жилияев // Онтологии проектирования. – 2019. – Т.9, № 2(32). – С 261-281.

В изданиях, индексируемых в Scopus

6. Zhilyaev, A. Real time scheduling of data transmission sessions in a microsatellites swarm and ground stations network based on multi-agent technology / P. Skobelev, E. Simonova, A. Ivanov, I. Mayorov, V. Travin, A. Zhilyaev // ECTA 2014 - Proceedings of the International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications. – 2014. – P. 153-159.

7. Zhilyaev, A. Multi-agent Planning of the Network Traffic between Nanosatellites and Ground Stations / I. Belokonov, P. Skobelev, E. Simonova, V. Travin, A. Zhilyaev // Procedia Engineering. – 2015. – № 104. – P. 118-130.

8. Zhilyaev, A. Using multi-agent technology for the distributed management of a cluster of remote sensing satellites / P. Skobelev, E. Simonova, A. Zhilyaev // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. – 2016. – Vol. 11, № 2. – P. 127-134.

9. Zhilyaev, A. Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing / P. Skobelev, E. Simonova, A. Zhilyaev, V. Travin // Studies in Computational Intelligence. – 2016. – Vol. 640. – P. 309-317.

10. Zhilyaev, A.A. Application of Multi-agent Technology in the Scheduling System of Swarm of Earth Remote Sensing Satellites / P.O. Skobelev, E. V. Simonova, A.A. Zhilyaev, V.S. Travin // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 396-402.

11. Zhilyaev, A.A. Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova, O. Goryanin, A. Zhilyaev, A. Tabachinskiy, V. Yalovenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1703 – P. 1-18.

В других изданиях

12. Жилияев, А.А. Экспериментальные исследования методов взаимодействия малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.В. Соллогуб, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, А.В. Царев, М.Е. Степанов, А.А. Жилияев // Труды научно-технической конференции с международным участием и элементами научной школы для молодежи. – 2012. – С. 213-216.

13. Жилияев, А.А. Экспериментальные исследования методов распределенного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов дистанционного

зондирования Земли / А.А. Жилияев // Сборник трудов международной молодёжной научной конференции «XII Королёвские чтения». – 2013. – С. 187.

14. Жилияев, А.А. Планирование сеансов связи между микроспутниками и сетью наземных станций с использованием мультиагентных технологий / П.О. Скобелев, А.Б. Иванов, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жилияев // Онтология проектирования. – 2014. – Т. 2(12). – С. 92-100.

15. Жилияев, А.А. Мультиагентная технология адаптивного планирования сеансов связи группировки малых космических аппаратов с наземными станциями / П.О. Скобелев, В.С. Травин, А.А. Жилияев, Е.В. Симонова, А.Б. Иванов // Материалы 7-й российской мульти-конференции по проблемам управления РКПУ-2014. – 2014. – С. 701-709.

16. Жилияев, А.А. Эмерджентный интеллект в мультиагентной платформе планирования / П.О. Скобелев, И.В. Майоров, А.А. Жилияев // МКПУ-2017. – 2017. – С. 35-37.

17. Zhilyaev, A. Designing Distributed Multi-Agent System for Aggregate and Final Assembly of Complex Technical Objects on Ramp-up Stage / P. Skobelev, V. Eliseev, I. Mayorov, A. Zhilyaev, V. Travin, E. Simonova // Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – 2018. – P. 250-257.

18. Zhilyaev, A. Conceptual design of smart farming solution for precise agriculture / D. Budaev, A. Lada, E. Simonova, P. Skobelev, V. Travin, O. Yalovenko, G. Voschuk, A. Zhilyaev // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2018. – P. 307-314.

19. Zhilyaev, A. Ontology-Driven Multi-Agent Engine for Real Time Adaptive Scheduling / G. Rzevski, P. Skobelev, A. Zhilyaev, O. Lakhin, I. Mayorov, E. Simonova // Conference: 2018 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO). – 2018. – P. 14-22.

20. Zhilyaev, A. Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management / P. Skobelev, A. Zhilyaev, V. Larukhin, S. Grachev, E. Simonova // Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – 2020. – P. 127-135.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.03
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № ____ от «__» _____ 2021 г.)

Заказ № 277. Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано на типографии.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244