

## Адаптивное мультиагентное планирование производственных ресурсов на основе онтологии

П. О. Скобелев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, заведующий лабораторией, [orcid.org/0000-0003-2199-9557](https://orcid.org/0000-0003-2199-9557)

О. И. Лахин<sup>б</sup>, канд. техн. наук, генеральный директор, [orcid.org/0000-0002-9360-3198](https://orcid.org/0000-0002-9360-3198)

И. В. Майоров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, аналитик, [orcid.org/0000-0002-3130-8142](https://orcid.org/0000-0002-3130-8142)

Е. В. Симонова<sup>в</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0003-2638-2572](https://orcid.org/0000-0003-2638-2572), [simonova.elena.v@gmail.com](mailto:simonova.elena.v@gmail.com)

<sup>а</sup>Институт проблем управления сложными системами РАН, Садовая ул., 61, Самара, 443020, РФ

<sup>б</sup>ООО НПК «Разумные решения», Московское ш., 17, Самара, 443013, РФ

<sup>в</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, Московское ш., 34, Самара, 443086, РФ

**Постановка проблемы:** в настоящее время требуются новые решения для управления ресурсами в промышленности и других областях, которые должны поддерживать высокий уровень адаптивности и оперативности. Классические комбинаторные или эвристические методы и инструменты не обеспечивают адекватные решения задач управления ресурсами в реальном времени. **Цель:** разработка метода планирования производственных ресурсов на основе мультиагентных технологий и онтологии для адаптации системы к непредсказуемым событиям, таким как поступление нового заказа, недоступность ресурса и т. п. **Результаты:** разработан метод адаптивного планирования, в котором агенты непрерывно улучшают показатели системы в режиме реального времени путем выявления и разрешения конфликтных ситуаций, порожденных непредвиденными событиями, при формировании расписаний использования ресурсов. Для настройки мультиагентного планирования в соответствии с особенностями производственного процесса используются семантические сети (онтологии), которые являются основой онтологических баз знаний для хранения информации о специфике конкретного предприятия. В этой связи разработаны: базовая онтология планирования; конструктор онтологии, с помощью которого можно создавать специализированную онтологию предприятия; база знаний в виде семантической Википедии предприятия; мультиагентный планировщик, настраиваемый с помощью базовой и специализированной онтологий в соответствии с особенностями производства и требованиями к операциям технологического процесса. **Практическая значимость:** применение системы, разработанной на основе метода планирования производственных ресурсов, не ограничивается рамками предприятий машиностроительного профиля, а может быть рекомендовано к использованию при управлении проектами, цепочками поставок и т. д.

**Ключевые слова** — сложные системы, управление ресурсами, планирование в режиме реального времени, онтология, база знаний, мультиагентные технологии, сеть потребностей и возможностей, самоорганизация, адаптивность.

**Цитирование:** Скобелев П. О., Лахин О. И., Майоров И. В., Симонова Е. В. Адаптивное мультиагентное планирование производственных ресурсов на основе онтологии. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 6, с. 105–117. doi:10.31799/1684-8853-2018-6-105-117

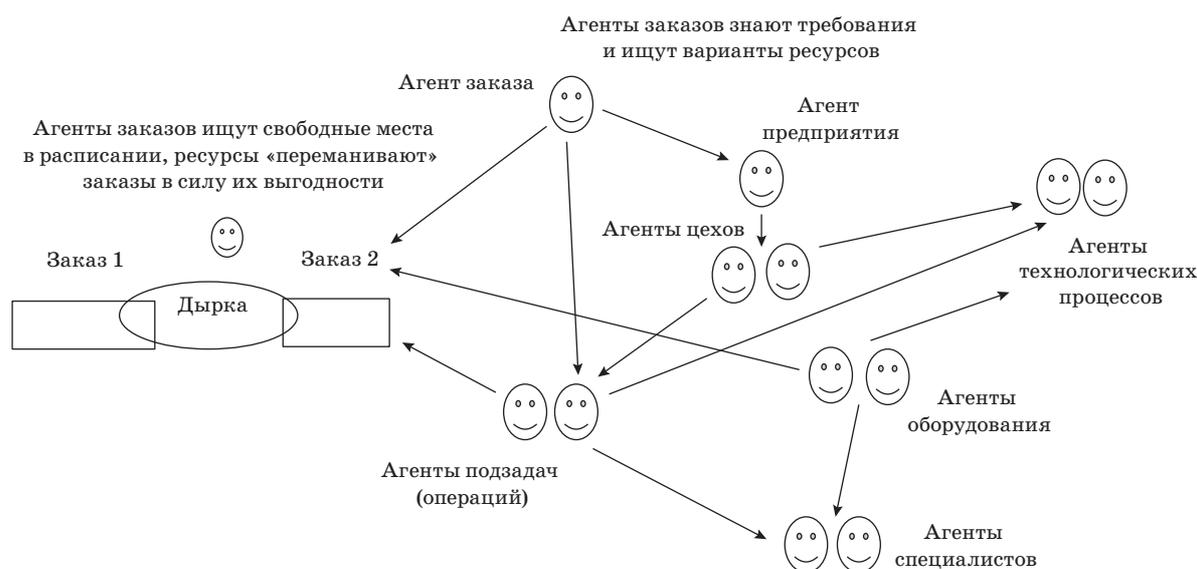
**Citation:** Skobelev P. O., Lakhin O. I., Mayorov I. V., Simonova E. V. Adaptive multi-agent planning of industrial resources based on ontology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 105–117 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-6-105-117

### Введение

На современном этапе развития систем управления производством и систем распределения и планирования ресурсов предприятия работники в условиях высокой динамики сталкиваются со значительными проблемами, порожденными неопределенностью. Неопределенность может быть связана с трудностями учета множества различных факторов, таких как необходимость индивидуального подхода к каждому заказу, динамика цен на комплектующие, вариативность поставок от предприятий-смежников, срыв сроков, непрерывные изменения технологий, возникновение различных непредвиденных событий, непосредственно влияющих на производственные процессы предприятия в целом, и т. д.

Существующие системы управления производством имеют широкий функционал и возможности интеграции с исполнительными модулями. Они сопровождают производственные процессы от выпуска до формирования на доставку. Однако они лишены инструментов поддержки принятия решений и реакции на динамические изменения ситуации [1–4].

Таким образом, поддержание производственных планов в адекватном состоянии на всех уровнях с учетом неопределенности времени и характера изменений становится актуальной задачей. Современные интегрированные производственные системы должны гибко и оперативно реагировать на события, учитывать распределенный характер большинства подсистем управления и отсутствие централизации в них, самостоятель-



■ *Рис. 1.* Сцена мира заказов и ресурсов

■ *Fig. 1.* A scene from the world of orders and resources

но принимать решения об исправлении и парировании непредвиденных ситуаций и выдавать обновленные согласованные планы [5]. Основные принципы построения и внедрения таких систем рассмотрены в работе [6]. Решение подобной плохо формализованной задачи должно выполняться в режиме реального времени, поэтому система управления должна строиться на сетевых принципах и быть адаптивной к изменениям. Системы планирования, основанные на централизованных подходах линейного и математического программирования, нейронных сетях, генетических алгоритмах и эвристиках, не позволяют в полной мере учитывать высокую динамику изменений, поскольку необходимо пересчитывать расписания и показатели для сотен взаимосвязанных производственных ресурсов и тысяч выпускаемых изделий [7–11].

Поэтому для учета непредвиденных событий, неопределенностей, динамики цен и доступности ресурсов большое распространение получают мультиагентные системы, в которых текущее расписание строится при помощи агентов задач и ресурсов, взаимодействующих путем передачи сообщений в сетях потребностей и возможностей (ПВ-сетях) на основе самоорганизации [12].

### Мультиагентные технологии для планирования ресурсов

Разработанный подход основан на концепции сетей потребностей и возможностей [13, 14]. Агенты ПВ-сети [15] взаимодействуют друг с дру-

гом посредством переговоров в сцене мира, которая строится как отражение реальной ситуации в реальной жизни, с текущим планом действий и ожидаемыми результатами, доступными агентам предприятия или подразделения (например, цеха) на соответствующих уровнях (рис. 1). Агент заказа считывает структуру предприятия из онтологии и определяет отношения ресурсов, необходимых для его исполнения. Агент нового заказа, поступив в сцену, обращается к агенту предприятия со своими требованиями. Агент предприятия (штабной агент) активизирует агентов подразделений, которые создают агентов технологических процессов, операций и подзадач, которые направляют запросы к ресурсам — станкам, оборудованию, материалам. Агенты выполняют матчинг по соответствиям типов, производительности, требованиям к персоналу. Ресурсы (станки, специалисты) анализируют локальные расписания и проверяют возможные размещения. Агент нового заказа пытается договориться с мешающими ему заказами о подвижках и соответствующих компенсациях, в режиме проактивности меняя локальные расписания. При достижении консенсуса новое расписание принимается всеми участниками. В противном случае итерации (волны) переговоров затрагивают более глубокие слои расписания с участием отдаленных участников по цепочке.

Такой распределенный подход позволяет повышать сложность решаемых задач, сколь угодно расширяя постановку задачи и вводя новых агентов, например, для учета ремонта оборудования, транспортировки продукции и т. д.

## Метод адаптивного планирования

Формализованная постановка задачи основана на поиске консенсуса между агентами на виртуальном рынке ПВ-сетей и может быть сформулирована следующим образом [16].

Предположим, что все агенты потребностей и возможностей имеют свои собственные цели, критерии, предпочтения и ограничения (например, сроки, стоимость, риски, приоритеты, необходимое оборудование или квалификации работников). Важность каждого критерия может быть представлена весовыми коэффициентами в линейной комбинации критериев для данной ситуации, но может меняться при формировании или исполнении расписания.

Введем функцию удовлетворенности (Satisfaction function) для каждого агента, которая будет показывать отклонение текущего значения этой функции от заданного идеального по любому из критериев текущего шага поиска решения.

Пусть у каждой потребности  $j$  есть несколько индивидуальных критериев  $x_i$  и предложенных идеальных значений  $x_{ij}^{id}$ . Для каждого агента потребности  $j$  нормированная функция вычисляется компонентом  $i$ , заданным, например, как линейная функция  $f_{ij}^{task}(x_i - x_{ij}^{id})$ . В большинстве случаев эта функция имеет форму колокола с вершиной в точке предполагаемого идеального значения. В качестве итогового результата для каждой потребности оценивается сумма виртуальных значений для каждого критерия  $i$  с заданными весовыми коэффициентами  $\alpha_{ij}^{task}$ .

При правильном выборе признаков и формы функции цель каждого агента может быть переформулирована как увеличение (максимизация) значения  $y_j^{task}$  потребности  $j$  (задача верхнего индекса означает, что значения принадлежат агентам потребности):

$$y_j^{task} = \sum_i \alpha_{ij}^{task} \cdot f_{ij}^{task}(x_i - x_{ij}^{id}),$$

где  $\forall j$  весовые коэффициенты нормированы:  $\sum_i \alpha_{ij}^{id} = 1$ .

Проблема нахождения состояний  $x_{ij}^*$  агентов потребностей  $j$ , максимизирующих общую стоимость всех заказов, может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned} y^{task} &= \sum_j \beta_j^{task} \cdot y_j^{task} = \\ &= \sum_j \beta_j^{task} \sum_i \alpha_{ij}^{task} \cdot f_{ij}^{task}(x_i - x_{ij}^{id}), \quad (1) \\ y^{task*} &= \max_{x_i} (y^{task}), \end{aligned}$$

где  $\beta_j^{task}$  — это вес потребности, который позволяет устанавливать и динамически изменять приоритеты, показывающие важность критериев.

Аналогично функция значений может быть задана для ресурсов по критериям  $z_k$ , с функцией  $f_{kl}^{res}(z_k - z_{kl}^{id})$ , весом  $\alpha_{kl}^{res}$  критерия  $k$  для ресурса  $l$  и значением ресурса  $\beta_l^{res}$  для системы (что аналогично весу функций агентов потребностей):

$$\begin{aligned} y^{res} &= \sum_l \beta_l^{res} \cdot y_l^{res} = \\ &= \sum_l \beta_l^{res} \sum_k \alpha_{kl}^{res} \cdot f_{kl}^{res}(z_k - z_{kl}^{id}), \quad (2) \end{aligned}$$

$$y^{res*} = \max_{z_k} (y^{res});$$

$$z_k \in D^K, x_i \in D^I \forall i, k,$$

$$I = \text{Dim}(D^K), K = \text{Dim}(D^K). \quad (3)$$

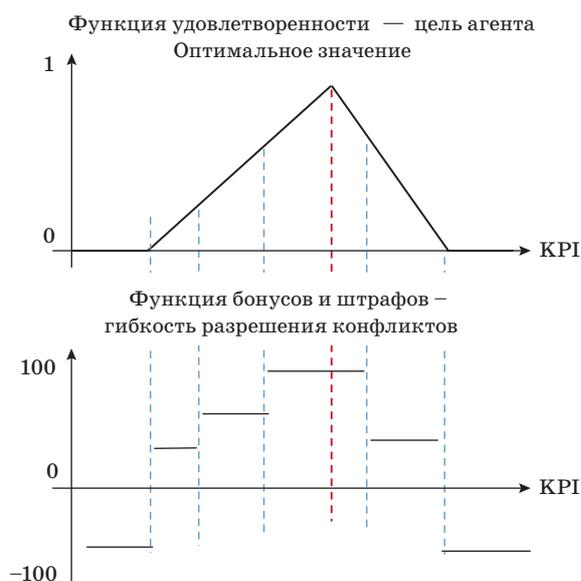
Переменные  $x$  и  $z$  относятся к некоторым областям пространства критериев потребностей и возможностей,  $I$  и  $K$  являются размерами соответствующих пространств критериев, верхний индекс  $res$  означает, что значения принадлежат агентам возможностей.

Таким образом, в ПВ-сети задача оптимизации сформирована как решение (1)–(3). Разработанный метод основан на концепции ПВ-сети, где агенты существуют на виртуальном рынке и постоянно стремятся улучшить свои индивидуальные функции удовлетворенности (которые отражают их заданные многокритериальные цели) с использованием функций бонусов и штрафов (рис. 2).

Агенты пытаются максимизировать свои функции удовлетворенности, используя доступные им виртуальные деньги: чем лучше позиция, тем больше бонус и тем больше денег на виртуальном счете агента. Чем больше денег, тем больше вариантов для перестройки расписания. Функции бонусов и штрафов отражают изменения в функции удовлетворенности агентов и определяют гибкость компромиссов при решении конфликтов.

Протоколы решения конфликтов основаны на модификациях контрактной сети — каждая задача может быть расположена на свободном слоте, сдвинута, отброшена, разделена или заменена. Однако в случае конфликта один агент может предложить компенсацию другому агенту, а второй агент примет предложение, только если его функция удовлетворенности не ухудшится. Разные протоколы могут определять различные методы решения конфликтов.

Основная часть разработанного метода может быть определена следующим образом.



■ **Рис. 2.** Пример функции удовлетворенности агента  
 ■ **Fig. 2.** An example of the agent satisfaction function

1. Возможность вводить число конкретных классов агентов, представляющих специфику предметной области с требуемым уровнем детализации.

2. Функции удовлетворенности и функции бонусов и штрафов определяются линейной комбинацией многокритериальных целей, предпочтений и ограничений каждого агента.

3. Заданы протоколы взаимодействия агентов, которые определяют, как выявлять конфликты и находить компромиссы с открытыми слотами, сдвигами и свопами задач (операций).

4. Итоговое расписание формируется в процессе самоорганизации агентов ПВ-сети.

5. Выбранные протоколы запускаются при возникновении новых событий (например, при поступлении нового заказа):

а) новый заказ поступает в систему, и ему присваивается агент;

б) агент заказа находит технологический или бизнес-процесс в базе знаний (БЗ), создает агентов задач, связанных отношениями, и запускает их для начала решения проблемы;

в) агент задачи считывает список требований из БЗ и отправляет сообщение всем агентам, присвоенным доступным ресурсам, о том, что ему требуется ресурс с определенными параметрами и он может заплатить за этот ресурс определенное количество виртуальных денег;

г) все агенты ресурсов, обладающие указанными функциями (полностью или частично) и стоящие меньше или столько же, сколько было указано агентом задачи, предлагают ему свои услуги;

д) агент задачи выбирает из предложенных наиболее подходящий свободный ресурс. Если подходящих ресурсов нет, агент задачи пытается переманить ресурс, который уже был назначен на другой заказ, предлагая компенсацию;

е) агент задачи, которому была предложена определенная компенсация, рассматривает предложение. Он принимает его только в том случае, если компенсация позволяет ему получить другой удовлетворительный ресурс и одновременно увеличить общую удовлетворенность системы;

ж) если агент задачи принимает предложение, он реорганизует ранее установленные отношения с этим заказом, задачей и ресурсом и ищет новые отношения с ресурсом, увеличивая общую удовлетворенность системы;

з) этот же процесс выполняется и для агентов ресурсов, которые могут генерировать предложения агентам задач с конкретными контекстно-ориентированными требованиями.

6. Данный процесс повторяется до тех пор, пока все ресурсы не будут связаны с заказами и агенты больше не смогут улучшить свое текущее состояние, или до тех пор, пока не будет исчерпано время.

7. В этот момент агент системы начинает пересматривать ключевые показатели эффективности (КПЭ) системы и находить агентов с минимальной удовлетворенностью по наиболее важным критериям.

8. Агенты системы предлагают этим агентам попробовать определить сумму виртуальных денег и ту стоимость, которую можно достичь в ходе переговоров.

9. Получая предложения от этих агентов, агент системы может выбрать предложение с лучшим соотношением ценность — цена для улучшения наиболее важных ключевых показателей эффективности.

При необходимости пользователь может в интерактивном режиме вмешаться в план в любой момент и вручную переделать расписание, перетачив операции — в результате план будет автоматически изменен.

Общее поведение сложных систем — это развитие через взаимодействие агентов, что, в свою очередь, ограничивает их поведение. Такое поведение называется эмерджентным. Оно недетерминировано и непредсказуемо, но не хаотично. Чрезвычайная ситуация приводит к неустойчивым равновесиям, связанным с обоснованным консенсусом многих конфликтующих агентов, которые представляют сбалансированные расписания, обеспечивающие адаптивность к внешним факторам. Более подробно логика принятия решений и протоколы переговоров агентов представлены в работе [6].

## Использование онтологии для настройки мультиагентного планирования

### Онтологическая БЗ для адаптивного управления ресурсами

Переход к цифровой экономике предполагает развитие методов и средств формализованного представления знаний, которые должны обеспечивать возможность унифицированного построения цифровых моделей всех аспектов деятельности предприятий для создания условий по управлению ресурсами предприятий, по поддержке взаимодействия в рамках отраслевых цифровых платформ, прозрачности движения товаров и предоставления услуг и т. д.

Такого рода модели должны включать в себя описание объекта и предмета деятельности предприятия, требования к качеству изделий и процессов, состав подразделений до уровня каждого сотрудника с их компетенциями и ими применяемыми инструментами, технологические или бизнес-процессы и другую нормативно-техническую документацию, регламенты взаимодействий подразделений и специалистов, результаты модельных и натурных испытаний объектов и т. д.

Такие знания можно эффективно хранить в виде онтологий и использовать для управления ресурсами предприятий. Известные конструкторы онтологий (Protégé, OntoEdit, OntoLingva и др.) преследуют исследовательские цели, не предназначены для построения моделей деятельности, тем более масштаба предприятий, не дают возможность строить БЗ с тысячами экземпляров, сложны и трудоемки в использовании.

В этой связи становится актуальной и значимой разработка методов и средств формализованного представления знаний, которые позволят связать в единую семантическую сеть различные по своим форматам данные, обеспечить удобный доступ пользователей к этой информации, а также сделать эти знания пригодными для компьютерной обработки. При этом важно предоставить пользователям возможность семантизации информации (классификации и параметризации квантов знаний, их связывания и т. п.), включая построение семантических дескрипторов (метаданных), подходящих для компьютерной обработки. Но сама природа систем знаний не статична, она постоянно развивается — в этой связи нужно сделать знания активными за счет применения мультиагентных технологий, чтобы иметь возможность поддерживать процессы сопоставления квантов знаний, их категоризации, классификации, связывания и т. д.

В результате знания предприятия могут быть организованы в интуитивно понятную систему типа Википедии, в которой поддерживаются процессы самоорганизации таким образом, что-

бы знания были по возможности полными и связанными, не противоречивыми, наглядными и прозрачными, открытыми к изменениям.

Текущие тенденции развития интеллектуального производства связаны с использованием таких методов, как онтологическое представление знаний, машинное обучение, базы знаний и т. д., которые являются очень важными и перспективными для применения в промышленности.

В [17] представлена интеллектуальная мультиагентная система управления производством на основе онтологий. С помощью семантических технологий обеспечиваются высокая адаптивность и реактивность настройки мелкосерийного производства высокотехнологичной продукции, такой как производство самолетов, на стадии ramp-up.

В [18] описывается применение онтологий в распределенной семантической сети производственных цехов предприятия для формирования эффективной и масштабируемой системы взаимодействия и поиска данных по информационным запросам.

В [19] рассматривается возможность применения онтологий для разбиения сложных задач на составные — до уровня автономных. Однако онтологическое описание отдельных операций не производится.

В [20] показано, что разработка онтологий облегчает правильное понимание предметной области, следовательно, знания из внешних источников могут распространяться через связанные открытые данные или напрямую интегрироваться (сопоставляться) с использованием подхода сопоставления онтологий. Показано, как описание онтологических данных может способствовать взаимодействию между моделью данных компании и новыми источниками информации, а также обновлению сохраненных данных путем сопоставления онтологий. Демонстрируется возможность применения онтологий для интеграции данных, что, однако, не решает задачу их онтологического описания.

В [21] отражена возможность конфигурации сервисов, построенных на онтологиях. Показан прототип для изучения гибкой производственной системы, позволяющий проверить осуществимость «жадной» локальной реконфигурации услуг для конкурентных и совместных ситуаций промышленной автоматизации.

В [22] показывается возможность координации и контроля подобной сложной системы через взаимодействие участников с использованием методов и техник проектирования, проверки и развертывания сервисов, возможно, «на лету», что делает проектирование сервисов неизбежным подходом к разработке нового поколения цифровых производственных систем. Подобные сервисы, которые могут инкапсулировать или абстрагировать не только программное обеспечение, но

и физическое поведение (как это делают цифровые двойники), относятся к интеллектуальным адаптивным системам сборки. Предоставляется глубокая семантическая информация, которая дополняет абстрактный уровень онтологий совместимости сервисов.

В [23] описывается использование онтологии для настройки интерфейса взаимодействия человека и автономных агентов в человеко-машинных командах.

Важный пример применения онтологий дается в [24]: распределение задач и управление ими играют важнейшую роль в процессе взаимодействия «человек — робот» во время поисково-спасательных операций. Авторы разрабатывают и оценивают онтологию, которая предоставляет общий словарь для членов команды, как людей, так и роботов. Онтология используется для облегчения обмена данными и выполнения миссий, а также обеспечения необходимой поддержки автоматизированного управления задачами. Результаты свидетельствуют о том, что предлагаемая онтология: 1) облегчает обмен информацией во время миссий; 2) помогает руководителю группы в распределении задач и управлении ими и 3) обеспечивает автоматическую поддержку управления службой городских поисково-спасательных операций.

Из этих примеров уже видно, что онтологии становятся средством управления приложениями, но возможность детального описания задач не была исследована.

Рассмотрим основные этапы создания прототипа новой БЗ, основанной на онтологии, для адаптивного планирования. БЗ включает информацию, в настоящее время отсутствующую в имеющемся учетном контуре существующих баз данных предприятий [25], а именно сведения:

— об организации подразделений в части связи рабочих станций с персональным составом рабочих;

— о том, какие части изделия на каких участках выполняются;

— о связи изделий и технологических процессов, рабочих центров, оснастки, материалов и других;

— о связях технологических операций (между собой: параллельные и последовательные, принадлежность рабочим центрам, связь с компетенциями рабочих и другие);

— о компетенциях рабочих (их реальных навыках и умениях);

— о возможности усиления операций техпроцессов дополнительными рабочими;

— о совместимости рабочих в сменах;

— о типах рабочих, которые должны комбинироваться в смене;

— другие сведения (о планируемых ремонтах и т. д.).

Кроме того, в начале разработки программного обеспечения очень сложно формализовать скрытые знания, и они становятся доступными только тогда, когда первые варианты расписаний, сгенерированные системой, поступают к пользователям.

В качестве *первого этапа* была разработана «Базовая онтология планирования», в которой описываются следующие ключевые понятия:

— заказ — описывает, какой продукт или услуга требуется;

— технологический или бизнес-процесс — описывает набор выполняемых задач (операций);

— задача (операция) — определяет работу, которая должна быть выполнена, включая все необходимые ресурсы;

— ресурс — люди, оборудование или материалы, необходимые для выполнения задач или операций;

— продукт — добавление выпускаемой продукции, используемой в операциях;

— отдел — состоит из ресурсов разных типов.

Кроме того, был введен ряд классов отношений для увязки вышеупомянутых понятий, в том числе:

— заказ «создает» объекты — описывает, какие объекты будут созданы для заказа;

— объект 1 «является-частью» объекта 2 — описывает сборку объектов;

— объект «имеет» бизнес-процесс — описывает технологические или бизнес-процессы, доступные для производства объектов;

— задача 2 «является-следующей-или-предыдущей» для задачи 1 — описывает взаимозависимость задач в бизнес-процессе;

— задача «требует» ресурс — описывает правила соответствия для выбора ресурсов;

— задача «производит» продукт — описывает производимые объекты для задач;

— задаче «нужны» материалы — описывает входные объекты для задач и т. д.

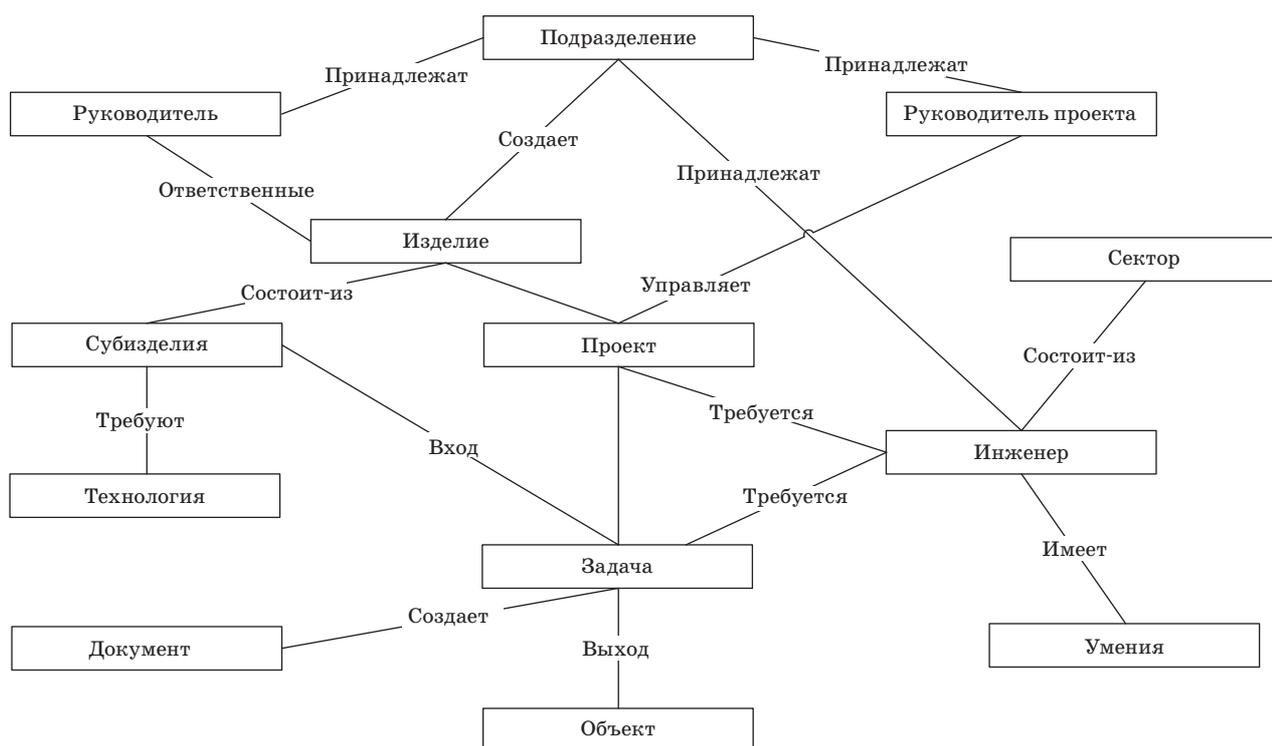
На *втором этапе* были разработаны конструктор онтологии и база знаний, созданная в виде семантической Wiki (рис. 3).

С помощью конструктора онтологии можно спроектировать онтологию планирования для определенной предметной области, а затем на основе этой онтологии домена разработать онтологическую модель (онтомоделю) предприятия.

В онтологию машиностроительного предприятия входят следующие основные разделы:

— организационно-штатная структура предприятия, описывающая перечень подразделений, сотрудников, их профессии, должности, компетенции и т. д.;

— инфраструктурная модель предприятия, описывающая основные технические средства (оборудование, инструменты, материалы, участ-



■ **Рис. 3.** Фрагмент базовой онтологии планирования  
 ■ **Fig. 3.** A fragment from the basic Planning Ontology

ки производства, сооружения, характеристики материальных объектов, физико-технические принципы работы и т. д.);

— бизнес-процессы предприятия, описывающие процессы основной деятельности (технология производства);

— изготавливаемые изделия и услуги, предоставляемые предприятием, ключевые показатели качества и эффективности реализации услуг;

— профессиональная специализация и компетенции рабочих;

— другие знания, необходимые для планирования операций технологических процессов.

Ключевые понятия и отношения онтологии оперативного планирования для машиностроения приведены на рис. 4.

Основной частью БЗ является понятие «задача» и ее экземпляры для выполнения конкретных бизнес-операций или технологических задач, например для заводов (рис. 5) [26].

Главная идея здесь заключалась в том, чтобы разработать агента задачи, который может считывать и интерпретировать отношение «необходимый» в качестве правила соответствия для динамического поиска указанных ресурсов.

Эти отношения связывают понятие «задача» с другими сущностями для планирования, которые могут использоваться агентами задач следующим образом:

«Предыдущая задача» (1) и «Следующая задача» (6) — позволяют агенту задачи находить предыдущую задачу с просьбой передвинуться ранее, перепланировать или найти следующую задачу и отправить ее агенту сообщение о задержке;

«Входные объекты» (2) и «Выходные объекты» (5) — показывают, какие агенты нужны для начала выполнения задачи, а также что будет являться результатом выполнения задачи;

«Составная задача (Часть-Целое)» (3) — показывает, что задача является частью сборки, агент которой получает параметры расписания, и факт выполнения задачи;

«Требования к сотруднику» (4) — определяет требования к исполнителю задачи;

«Кто делал в прошлый раз?» (7) — находит сотрудников, которые уже выполняли подобные задачи.

Разработанный подход позволяет добавлять новые правила соответствия «на лету» с учетом новых факторов сложности, выявленных при планировании конечными пользователями. Например, объект «Исполнитель задач» выбирается для каждой задачи по ее требованиям:

- в каком подразделении работает;
- на каком рабочем центре;
- какую квалификацию имеет;
- какие компетенции имеет;

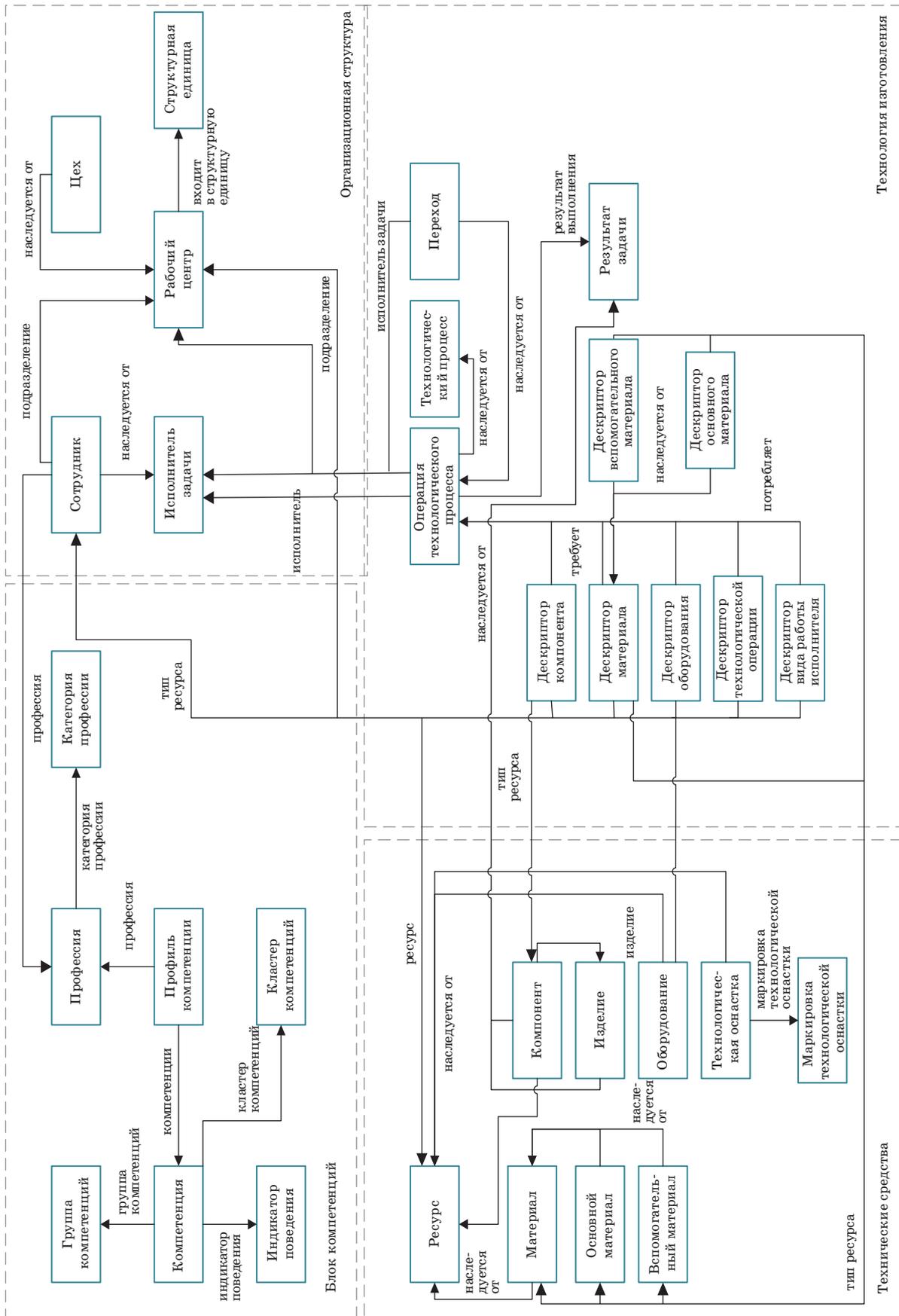
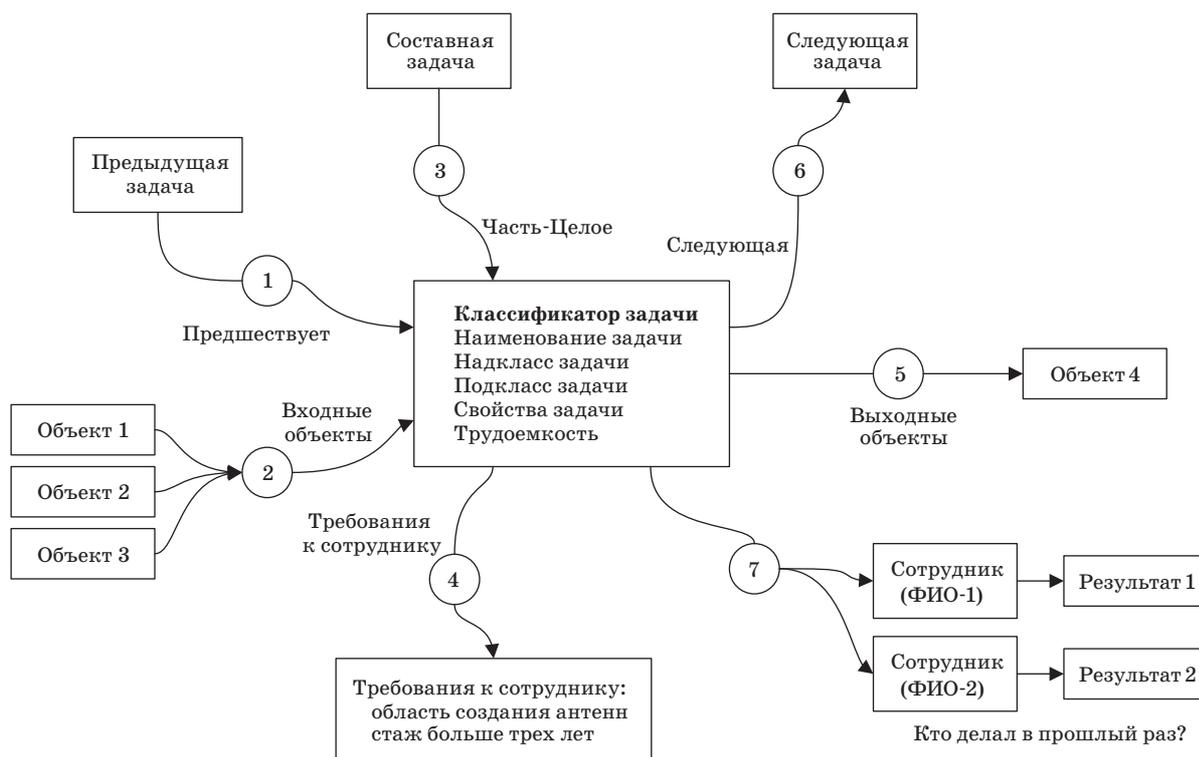


Рис. 4. Общая структура онтологии оперативного планирования для предприятия машиностроения  
 Fig. 4. General structure of ontology of operational planning for a machine-building enterprise



■ **Рис. 5.** Основные типы отношений класса «Задача»  
 ■ **Fig. 5.** The main types of relations in the «Task» class

— умеет ли работать с электронной моделью изделия;

— какие задачи ранее выполнял исполнитель и т. п.

Объект «Технологический процесс» определяет, какие операции можно делать последовательно или параллельно и как усилить операцию при необходимости:

— какое изделие собирается;

— что входит в состав изделия (комплектующие);

— какая часть является закладной, позволяя раньше начинать сборку;

— в каком(их) подразделении(ях) делается;

— из каких операций состоит процесс;

— какие части можно делать только последовательно, а какие — параллельно или последовательно;

— на каких рабочих центрах делается;

— можно ли усилить выполнение процесса;

— в каких частях процесс можно усилить.

Объект «Изделие» задает комплектующие, наличие которых для операций сборки проверяется по плану комплектации или на складе:

— какая это часть более сложного изделия;

— каким технологическим процессом собирается;

— какие комплектующие на входе нужны;

— на каком рабочем центре собирается.

В качестве *третьего этапа* был разработан мультиагентный планировщик на основе общей БЗ, который может быть настроен для любого типа предприятия. Новые отношения в БЗ добавляются в качестве новых правил соответствия, что дает возможность конечным пользователям расширять онтологию предметной области и онтомоделю предприятия «на лету» и тем самым улучшать качество расписаний.

**Пример использования БЗ при планировании операций технологического процесса**

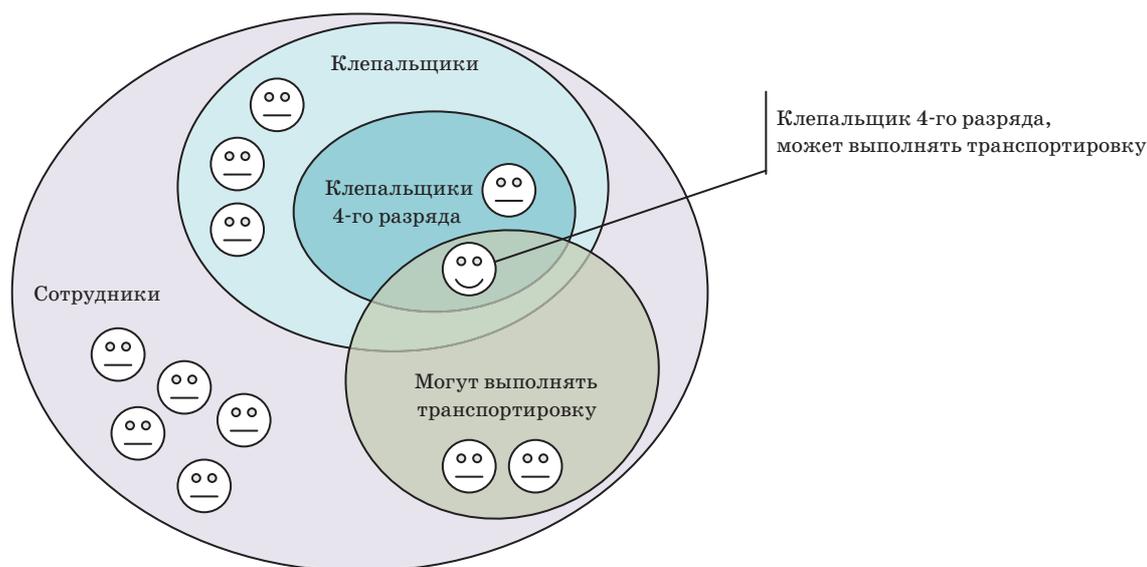
Одной из функций БЗ является ее использование для спецификации требований к планированию каждой операции технологического процесса. В этих целях могут быть заданы параметры структуры изделия, технологических процессов, особенности рабочих и оборудования, а также иные обычно плохо определенные и неформализованные экспертные сведения, важные для планирования работы предприятия.

Список ресурсов, необходимых для выполнения задачи, оформляется в виде набора требований. Каждое требование характеризуется:

— количеством ресурсов данного вида;

— трудоёмкостью для этого вида ресурса;

— перечнем атрибутов, ограничивающих множество подходящих под описание ресурсов.



■ **Рис. 6.** Графическая интерпретация требований к ресурсам  
 ■ **Fig. 6.** Graphical interpretation of requirements to resources

- Пример описания шаблона технологического процесса
- An example for description of a technological process template

Описание задачи (субъект)	Отношение	Описание задачи (объект)
Задача «Сборка отсека Ф2»	Имеет подзадачу	Задача «Сборка ТСЕ_7620»
Задача «Сборка отсека Ф2»	Имеет подзадачу	Задача «Сборка ТСЕ_7550»
Задача «Сборка ТСЕ_7620»	Производит	Компонент «ТСЕ_7620»
Задача «Сборка ТСЕ_7550»	Потребляет	Компонент «ТСЕ_7620»
Задача «Сборка ТСЕ_7620»	Имеет подзадачу	Задача «Сборка каркаса ТСЕ 7620»
Задача «Сборка каркаса ТСЕ 7620»	Требует	Ресурс «Рабочий»: профессия = сборщик-клепальщик разряд > 4

На рис. 6 показано последовательное сужение множества возможных исполнителей задачи в соответствии с требованиями: любой сотрудник → клепальщик → клепальщик 4-го разряда → клепальщик 4-го разряда, имеющий компетенцию «может выполнять транспортировку».

Пример описания технологического процесса в виде набора записей в БЗ показан в таблице.

### Результаты адаптивного управления ресурсами

Описанные разработки помогают достичь следующих результатов [27]:

- управление сложностью для нужд производственных компаний, управление цепочками поставок и другими сетями;
- решение «неразрешимых» проблем с возможностью привлечения большего количества факторов, критериев, предпочтений и ограничений;
- поддержка командной работы с пользователями, формирующими баланс интересов;
- детальное представление объектов и процессов реального мира;
- адаптивное реагирование на события в режиме реального времени;
- использование знаний, относящихся к конкретной предметной области или компании, для создания допустимых расписаний, которые соответствуют противоречивым предпочтениям и ограничениям лиц, принимающих решения;
- поддержка БЗ предприятия для управления ресурсами с помощью семантической Wiki в конструкторе онтологий;
- визуализация процессов принятия решений и поддержка вовлечения пользователей для интерактивной корректировки решений с последующим интеллектуальным ручным перерасчетом расписаний;
- возможность пересматривать ограничения, балансовую стоимость, прибыль и уровень обслуживания в индивидуальном порядке для заказов и ресурсов;

— прозрачность и интеграция процессов планирования по всем корпоративным и бизнес-процессам;

— возможность проводить моделирование «что если» параллельно с основным потоком оперативного планирования;

— поддержка подробного расчета затрат на основе действий для заказов и ресурсов;

— работа с ограничениями в существующих технологических решениях.

## Заключение

В статье описан метод применения мультиагентного подхода и баз знаний на основе онтологий для задач планирования ресурсов в реальном времени. Обсуждаются ключевые требования к системе и поведению агентов, влияющие на процесс принятия решений и оптимизацию текущих планов по поступающим событиям. Показано, что

мультиагентная система обеспечивает адаптивность построенного плана, а использование онтологии предметной области обеспечивает гибкость системы для преодоления ограничений и построения консенсусного решения. Преимущество в использовании онтологий заключается в построении отношений понятий задач и ресурсов, что дает возможность учитывать особенности новых задач и осуществлять планирование на основе новых описаний задач и ресурсов. Предлагаемый подход проиллюстрирован примером использования БЗ для разработки шаблона технологической операции предприятия машиностроения.

Статья подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках госбюджетной темы ИПУСС РАН № АААА-А16-116040410059-7 «Разработка и исследование моделей, методов и алгоритмов построения планов сменно-суточных заданий при производстве продукции в условиях неопределенности и высокой динамики изменений производственной обстановки».

## Литература

1. Ugarte S., Artiba A., et al. Manufacturing execution system — a literature review. *Production Planning & Control*, 2009, vol. 20, no. 6, pp. 525–539.
2. Kletti J. *Manufacturing Execution System*. Springer, 2010. 272 p.
3. Jeon B. W., et al. An architecture design for smart manufacturing execution system. *Computer-Aided Design and Applications*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 472–485.
4. Strang D., Galaske N., Anderl R. Dynamic, adaptive worker allocation for the integration of human factors in cyber-physical production systems. *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future*. Springer, 2016, pp. 517–529.
5. Giret A., Trentesaux D., Prabhu V. Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, vol. 37, no. 1, pp. 126–140.
6. Rzevski G., Skobelev P. *Managing complexity*. WIT Press, 2014. 198 p.
7. Framinan J. M., Leisten R., García R. R. *Manufacturing Scheduling Systems*. Springer, 2014. 400 p.
8. Leung J. Y. T. (Ed.). *Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis*. CRC Press, 2004. 1216 p.
9. Voß S. Meta-heuristics: The state of the art. *Local Search for Planning and Scheduling*. Ed. A. Nareyek. LNAI 2148, Springer, 2001, pp. 1–23.
10. Binitha S., Siva Sathya S. A survey of bio inspired optimization algorithms. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 137–151.
11. Xhafa F., Abraham A. *Metaheuristics for scheduling in industrial and manufacturing applications*. Series: Studies in Computational Intelligence. Springer, 2008, vol. 128. 346 p.
12. Skobelev P. Multi-agent systems for real time adaptive resource management. *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Eds. Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos. Elsevier, 2015, pp. 207–230.
13. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений. *Автометрия*, 2002, т. 38, № 6, с. 45–61.
14. Skobelev P., Vittikh V. Multiagent interaction models for constructing the needs-and-means networks in open systems. *Automation and Remote Control*, 2003, vol. 64, no. 1, pp. 177–185. doi:10.1023/A.1021836811441
15. Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени. *Автометрия*, 2009, т. 45, № 2, с. 78–87.
16. Mayorov I., Skobelev P. Towards thermodynamics of real timescheduling. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, WIT Press, 2015, vol. 10, iss. 3, pp. 213–223. doi:10.2495/DNE-V10-N3-213-223
17. Meridou D. T., Kapsalis A. P., Papadopoulou M.-E. Ch., et al. An ontology-based smart production management system. *IT Professional*, 2015, vol. 17, iss. 6, pp. 36–46.
18. Saeidlou S., Saadat M., Amini Sharifi E., Jules G. D. An ontology-based intelligent data query system in manufacturing networks. *Production & Manufacturing Research Journal*, 2017, vol. 5, iss. 1, pp. 250–267.
19. Klima M., Gregor J., Harcuba O., Marik V. Agent-based shop floor scheduling. *Proceedings of the 8th*

- International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2017)*, Lion, France, August 28–30, 2017, LNAI 10444, Springer, 2017, pp. 24–38.
20. Jirkovsky V., Kadera P., Rychtyckij N. Semi-automatic ontology matching approach for integration of various data models in automotive. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2017)*, Lion, France, August 28–30, 2017, LNAI 10444, Springer, 2017, pp. 53–65.
21. Rodrigues N., Leitão P., Oliveira E. An agent-based approach for the dynamic and decentralized service reconfiguration in collaborative production scenarios. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2017)*, Lion, France, August 28–30, 2017, LNAI 10444, Springer, 2017, pp. 140–154.
22. André P., Cardin O. Trusted services for cyber manufacturing systems. *Proceedings of the 7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing (SOHOMA17)*, Nantes, France, October 19–20, 2017. *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence*. Eds. Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., Cardin O. Springer, 2018, vol. 762, pp. 359–370.
23. Vecht B. van der, Diggelen J. van, Peeters M., Barnhoorn J., and Waa J. van der. SAIL: A social artificial intelligence layer for human-machine teaming. *Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018)*, Toledo, Spain, 20–22 June, 2018. *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity*. Eds. Y. Demazeau, et al. Springer, 2018, LNAI 10978, pp. 262–274.
24. Saad E., Hindriks K. V., Neerincx M. A. Ontology design for task allocation and management in urban search and rescue missions. *Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018)*, Funchal, Madeira, Portugal, 16–18 January, 2018, SciTePress, 2018, vol. 2, pp. 622–629.
25. Skobelev P., Kozhevnikov S., Mayorov I., Poludov D., Simonova E. Smart projects: Multi-agent solution for aerospace applications. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 492–504. doi:10.2495/DNE-V12-N4-492-504
26. Skobelev P., Eliseev V., Mayorov I., Travin V., Zhilyaev A., Simonova E. Designing distributed multi-agent system for aggregate and final assembly of complex technical objects on ramp-up stage. *Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018)*, Funchal, Madeira, Portugal, 16–18 January, 2018, SciTePress, 2018, vol. 1, pp. 250–257.
27. Skobelev P. Towards autonomous AI systems for resource management: Applications in industry and lessons learned. *Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018)*, Toledo, Spain, 20–22 June, 2018. *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity*. Eds. Y. Demazeau, et al. Springer, 2018, LNAI 10978, pp. 12–25.

UDC 338.984

doi:10.31799/1684-8853-2018-6-105-117

**Adaptive multi-agent planning of industrial resources based on ontology**P. O. Skobelev<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Acting Head of Labs, orcid.org/0000-0003-2199-9557O. I. Lakhin<sup>b</sup>, PhD, Tech., Chief Executive Officer, orcid.org/0000-0002-9360-3198I. V. Mayorov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Analyst, orcid.org/0000-0002-3130-8142E. V. Simonova<sup>c</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-2638-2572, simonova.elena.v@gmail.com<sup>a</sup>Institute for the Control of Complex Systems of RAS, 61, Sadovaya St., 443020, Samara, Russian Federation<sup>b</sup>Software Engineering Company «Smart Solutions», 17, Moscovskoe St., 443013, Samara, Russian Federation<sup>c</sup>Samara National Research University, 34, Moscovskoe St., 443086, Samara, Russian Federation

**Introduction:** Currently, new solutions are required in managing industrial resources, in order to maintain a high level of adaptability and efficiency. Classical combinatorial or heuristic methods and tools cannot provide adequate solutions for real-time resource management. **Purpose:** Development of a method for planning industrial resources based on multi-agent technologies and ontology, in order to adapt the system to unforeseen events, such as new orders, unavailable resources, etc. **Results:** An adaptive planning method has been developed, in which agents continuously improve the system performance in real time by identifying and resolving conflict situations caused by unforeseen events. To adjust multi-agent planning to specific features of the production process, semantic networks (ontologies) are used, which are the basis of ontological knowledge bases for storing information about the peculiarities of a particular enterprise. In this regard, the following elements have been developed: the basic planning ontology, an ontology editor for creating a specialized enterprise ontology, a knowledge base in the form of a semantic Wikipedia for the enterprise, and a multi-agent scheduler which can be customized using the basic and specialized ontologies in accordance with specific production features and requirements for the technological operations. **Practical relevance:** Application of the system developed with the method of planning industrial resources is not limited to machine-building enterprises, but can be recommended for managing projects, supply chains, etc.

**Keywords** — complex systems, resource management, real-time scheduling, ontology, knowledge base, multi-agent technology, demand-resource network, self-organizing, adaptability.

**Citation:** Skobelev P. O., Lakhin O. I., Mayorov I. V., Simonova E. V. Adaptive multi-agent planning of industrial resources based on ontology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 105–117 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-6-105-117

## References

- Ugarte S., Artiba A., et al. Manufacturing execution system — a literature review. *Production Planning & Control*, 2009, vol. 20, no. 6, pp. 525–539.
- Kletti J. *Manufacturing Execution System*. Springer, 2010. 272 p.
- Jeon B. W., et al. An architecture design for smart manufacturing execution system. *Computer-Aided Design and Applications*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 472–485.
- Strang D., Galaske N., Anderl R. Dynamic, adaptive worker allocation for the integration of human factors in cyber-physical production systems. *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future*. Springer, 2016, pp. 517–529.
- Giret A., Trentesaux D., Prabhu V. Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, vol. 37, no. 1, pp. 126–140.
- Rzevski G., Skobelev P. *Managing complexity*. WIT Press, 2014. 198 p.
- Framinan J. M., Leisten R., García R. R. *Manufacturing Scheduling Systems*. Springer, 2014. 400 p.
- Leung J. Y. T. (Ed.). *Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis*. CRC Press, 2004. 1216 p.
- Voß S. Meta-heuristics: The state of the art. *Local Search for Planning and Scheduling*. Ed. A. Nareyek. LNAI 2148, Springer, 2001. pp. 1–23.
- Binitha S., Siva Sathya S. A survey of bio inspired optimization algorithms. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 137–151.
- Xhafa F., Abraham A. *Metaheuristics for scheduling in industrial and manufacturing applications*. Series: Studies in Computational Intelligence. Springer, 2008, vol. 128. 346 p.
- Skobelev P. Multi-agent systems for real time adaptive resource management. *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Eds. Paulo Leitão, Stamatios Karnouskos. Elsevier, 2015, pp. 207–230.
- Skobelev P. Open multi-agent systems for decision making support. *Avtometriya*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 45–61 (In Russian).
- Skobelev P., Vittikh V. Multiagent interaction models for constructing the needs-and-means networks in open systems. *Automation and Remote Control*, 2003, vol. 64, no. 1, pp. 177–185. doi:10.1023/A.1021836811441
- Vittikh V., Skobelev P. The compensation method of agents interactions for real time resource allocation. *Avtometriya*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 78–87 (In Russian).
- Mayorov I., Skobelev P. Towards thermodynamics of real timescheduling. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, WIT Press, 2015, vol. 10, iss. 3, pp. 213–223. doi:10.2495/DNE-V10-N3-213-223
- Meridou D. T., Kapsalis A. P., Papadopoulou M.-E. Ch., et al. An ontology-based smart production management system. *IT Professional*, 2015, vol. 17, iss. 6, pp. 36–46.
- Saeidlou S., Saadat M., Amini Sharifi E., Jules G. D. An ontology-based intelligent data query system in manufacturing networks. *Production & Manufacturing Research Journal*, 2017, vol. 5, iss. 1, pp. 250–267.
- Klima M., Gregor J., Harcuba O., Marik V. Agent-based shop floor scheduling. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2017)*, Lion, France, August 28–30, 2017, LNAI 10444, Springer, 2017, pp. 24–38.
- Jirkovsky V., Kadera P., Rychtyckyj N. Semi-automatic ontology matching approach for integration of various data models in automotive. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2017)*, Lion, France, August 28–30, 2017, LNAI 10444, Springer, 2017, pp. 53–65.
- Rodrigues N., Leitão P., Oliveira E. An agent-based approach for the dynamic and decentralized service reconfiguration in collaborative production scenarios. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2017)*, Lion, France, August 28–30, 2017, LNAI 10444, Springer, 2017, pp. 140–154.
- André P., Cardin O. Trusted services for cyber manufacturing systems. *Proceedings of the 7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing (SOHOMA17)*, Nantes, France, October 19–20, 2017. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence. Eds. Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., Cardin O. Springer, 2018, vol. 762, pp. 359–370.
- Vecht B. van der, Diggelen J. van, Peeters M., Barnhoorn J., and Waa J. van der. SAIL: A social artificial intelligence layer for human-machine teaming. *Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018)*, Toledo, Spain, 20–22 June, 2018. Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity. Eds. Y. Demazeau, et al. Springer, 2018, LNAI 10978, pp. 262–274.
- Saad E., Hindriks K. V., Neerinx M. A. Ontology design for task allocation and management in urban search and rescue missions. *Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018)*, Funchal, Madeira, Portugal, 16–18 January, 2018, SciTePress, 2018, vol. 2, pp. 622–629.
- Skobelev P., Kozhevnikov S., Mayorov I., Poludov D., Simonova E. Smart projects: Multi-agent solution for aerospace applications. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 492–504. doi:10.2495/DNE-V12-N4-492-504
- Skobelev P., Eliseev V., Mayorov I., Travin V., Zhilyaev A., Simonova E. Designing distributed multi-agent system for aggregate and final assembly of complex technical objects on ramp-up stage. *Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018)*, Funchal, Madeira, Portugal, 16–18 January, 2018, SciTePress, 2018, vol. 1, pp. 250–257.
- Skobelev P. Towards autonomous AI systems for resource management: Applications in industry and lessons learned. *Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018)*, Toledo, Spain, 20–22 June, 2018. Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity. Eds. Y. Demazeau, et al. Springer, 2018, LNAI 10978, pp. 12–25.